

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NO AÇO-FERRAMENTA AISI H13 EM OPERAÇÃO DE FRESAMENTO COM FERRAMENTA DE METAL DURO

Denis Boing, denis.boing@gmail.com¹
Sueli Fischer Beckert, sueli@sociesc.org.br²
Adilson José de Oliveira, adilson.jose@sociesc.org.br²

¹ SENAI SC Unidade Blumenau, Rua São Paulo, 1147 - CEP: 89012-001, Blumenau-SC, Brasil

² Instituto Superior Tupy/SOCIESC, Rua Albano Schmidt, 3333 - CEP 89206-001, Joinville-SC, Brasil

Resumo: Componentes funcionais de moldes e matrizes necessitam de elevada dureza para suportar os esforços envolvidos nos processos de conformação e de injeção de plástico. Com o propósito de aumentar a dureza destes componentes, tipicamente construídos em aços-ferramenta, tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são realizados para mudança da microestrutura do material. Estes tratamentos térmicos podem ser realizados antes ou depois das operações de usinagem. Entretanto, a usinagem de aços-ferramenta com dureza superior a 45 HRC, principalmente em operações de desbaste, torna-se uma tarefa dispendiosa. Deste modo, a definição se a operação de desbaste deve ser realizada antes ou depois de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento está relacionada ao volume de material removido. O objetivo deste trabalho é determinar a influência do estado do aço-ferramenta AISI H13 (normalizado e temperado e revenido) na formação do cavaco e na rugosidade da superfície usinada. Realizou-se um planejamento fatorial com ensaios de fresamento em operação de desbaste com três variáveis - velocidade de corte, profundidade radial de usinagem e estado do material - e em dois níveis utilizando fresas de topo reto de metal duro. A análise estatística dos resultados demonstra que o estado do material, a velocidade de corte e a profundidade radial de usinagem têm influência significativa nos valores de rugosidade. Além disso, a formação lamelar com o material no estado temperado e revenido é nítida e regular, enquanto que no caso do material recozido, não há uma definição clara da formação de lamelas.

Palavras-chave: tratamento térmico, fresamento, metal duro, rugosidade, formação do cavaco

1. INTRODUÇÃO

Moldes e matrizes são agrupamentos de componentes de suporte e funcionais. Componentes de suporte são normalmente peças padronizadas e que asseguram o funcionamento da montagem em áreas como alinhamento, mecanismo de injeção, aquecimento e resfriamento do molde. Com a utilização de componentes padronizados, o tempo necessário de manufatura de um molde ou matriz é dedicado, principalmente, à confecção dos componentes funcionais, os quais estão relacionados com a forma das peças produzidas pelo ferramental (ALTAN et al., 1993).

Componentes funcionais de moldes e matrizes necessitam de elevada dureza para suportar os esforços envolvidos no processo de conformação e de injeção de plásticos. Com o propósito de aumentar a dureza destes componentes, tipicamente construídos em aços-ferramenta, tratamentos térmicos de têmpera e revenimento são empregados para a mudança da microestrutura do material. Estes tratamentos térmicos podem ser realizados antes ou depois das operações de usinagem. Entretanto, a usinagem de aços-ferramenta com dureza superior a 45 HRC, principalmente em operações de desbaste, torna-se uma tarefa dispendiosa. Deste modo, a definição se a operação de desbaste deve ser realizada antes ou depois do tratamento térmico de têmpera e revenimento está relacionada com o volume de material removido. (STOECKHERT e MENNIG, 1998).

O principal limitante para a usinagem dos aços-ferramenta com dureza superior a 45 HRC é a taxa de desgaste nas ferramentas. A determinação de parâmetros de usinagem adequados para que não ocorra troca de ferramenta durante cada operação de usinagem deve ser realizada. Caso isto não ocorra, pequenas marcas na superfície usinada surgirão e o processo de usinagem deve ser reiniciado de uma posição intermediária. Irregularidades na superfície usinada, tais como marcas oriundas interrupções na usinagem, promovem um forte aumento no tempo de polimento das superfícies de moldes e matrizes (LACALLE et al., 2002).

Ensaio de usinagem considerando o fim de vida da ferramenta em aços-ferramenta tornam-se uma tarefa dispendiosa e morosa em função do custo dos materiais e das ferramentas, além do tempo necessário. Contudo, alguns indicadores podem demonstrar o comportamento do processo. Entre estes indicadores, pode-se ressaltar a rugosidade, a

morfologia dos cavacos, a taxa de desgaste das ferramentas ou avarias além da análise de sinais de monitoramento do processo (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006).

Krajnik e Kopac (2004) descrevem que, do ponto de vista de formação do cavaco, há alteração na morfologia com a alteração da velocidade de corte. Diante do fresamento do aço-ferramenta X63CrMoV51 (similar ao AISI A2) em dois estados (recozido, e temperado e revenido), demonstraram a transição do cavaco de contínuo para segmentado. No caso do material no estado recozido, o fresamento com uma velocidade de corte de 150 m/min promoveu cavacos contínuos, mas com a utilização de uma velocidade de corte dez vezes maior (1500 m/min), os cavacos tornaram-se segmentados. Contudo, no caso do fresamento do aço no estado temperado e revenido (52 HRC) e velocidade de corte de 150 m/min, os cavacos apresentaram-se segmentados. Com a redução da velocidade de corte para 50 m/min, os cavacos tornaram-se contínuos. Segundo os autores, diante da formação de cavacos contínuos, o encruamento é o processo dominante, mas com o aumento da velocidade de corte, a formação de trincas e o amolecimento em função da temperatura tornam-se os elementos preponderantes. Dolinseka, Ekinovic e Kopac (2004) demonstraram que no fresamento do mesmo aço-ferramenta, mas somente no estado temperado e revenido, o aumento da velocidade de corte nos patamares de cavaco segmentado, promove o aumento na frequência de formação de lamelas. Na velocidade de corte de 150 m/min, a frequência foi de 3,84 kHz, em 300 m/min a frequência passou para 15,6 kHz, e em um valor de 1500 m/min, a frequência era de 100,6 kHz. A alteração na mudança da morfologia do cavaco, nas referidas pesquisas, é associada à faixa de transição de velocidades de cortes convencionais para altas velocidades. Zhang e Guo (2009) também descrevem uma fase de transição de cavacos contínuos para segmentados no fresamento do aço-ferramenta AISI H13 temperado e revenido (dureza de 50 HRC). Neste caso, a faixa de transição situa-se entre 100 e 200 m/min. Contudo, incrementam que o valor do avanço por dente também influencia na fase de transição. Como exemplo, com o valor de velocidade de corte de 150 m/min, o incremento do avanço por dente de 0,10 para 0,15 mm promoveu a transição do cavaco de contínuo para segmentado.

As marcas provocadas na superfície devido às trajetórias seguidas pela ferramenta de corte são denominadas rugosidade. A rugosidade influencia no comportamento de componentes nas mais diversas aplicações, principalmente nos submetidos à fadiga mecânica. Vários trabalhos já foram realizados para avaliação de superfícies usinadas com o processo de fresamento. Polli et al. (2005) fizeram uso do Parâmetro Ra, enquanto que Nunes et al. (2008) utilizaram os parâmetros Ra e Rz para quantificar a rugosidade nas superfícies estudadas de moldes e matrizes. Nicola (2008) analisou as superfícies fresadas através dos parâmetros Ra, Rz e Rz1max. Este concluiu que os 3 parâmetros têm relação entre si e que seus comportamentos indicam conclusões semelhantes na análise experimental.

Do ponto de vista da rugosidade no fresamento de aços-ferramenta, Camunscu e Aslan (2005) demonstraram o incremento nos valores ao longo da vida da ferramenta. Os autores realizaram experimentos utilizando fresas de topo reto de metal duro com cobertura na usinagem do aço-ferramenta AISI D3 (35 HRC de dureza) e estabeleceram como critério de fim de vida o valor de desgaste de flanco $VB_B = 0,3$ mm. Os parâmetros de usinagem utilizados foram: velocidade de corte de 100 m/min, avanço por dente de 0,1 mm, profundidade axial de usinagem de 0,4 mm e profundidade radial de usinagem de 30 mm. Os resultados indicam uma variação média dos valores de rugosidade Ra em 55%. Os valores de Ra variaram entre 0,3 e 0,8 μ m diante das ferramentas utilizadas.

Apesar de o parâmetro Ra ser o principal parâmetro encontrado na literatura para indicar o estado da rugosidade, segundo Stoeckhert e Mennig (1998) e Machado (2009) não é o mais adequado para a caracterização das superfícies de componentes funcionais em moldes de injeção. De acordo com Stoeckhert e Mennig (1998), o parâmetro mais indicado para análise de superfícies de moldes é o Rt, sendo que Machado (2009) sugere caracterizar superfícies complexas de moldes através os parâmetros Ra, Rz e o Rmr com nível "c" de forma conjunta. Enquanto o parâmetro Ra apresenta uma rugosidade média da superfície, os parâmetros Rz e Rmr(c) caracterizam a amplitude das marcas no comprimento de amostragem e a distribuição dos picos no comprimento de avaliação, respectivamente. As definições e representações dos parâmetros convencionais de rugosidade podem ser obtidos na norma NBR ISO 4287(2002).

O objetivo deste trabalho é determinar a influência microestrutura do aço-ferramenta AISI H13 (recozido com dureza de 264 HBS e temperado e revenido com dureza de 53HRC) na formação do cavaco e na rugosidade da superfície usinada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos desta pesquisa foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical de 3 eixos, com 7,6 kW de potência no eixo-árvore e máxima rotação de 6000 rpm.

Utilizou-se fresas de topo reto de 20 mm de diâmetro com dois insertos intercambiáveis. O conjunto (porta-ferramenta e insertos) foi montado em um mandril utilizando pinça cônica com um balanço de 60 mm. Os insertos eram de metal duro da classe ISO H10-H20 (código do fabricante HM90 APKT 1003 e classe IC908) com cobertura TiAlN depositada pelo método PVD. O corpo do porta-ferramenta era de aço e a especificação do fabricante é HM90 E90A-D20-2-C20-B-C. Os insertos e o porta-ferramenta foram produzidos pela empresa Iscar.

Os corpos-de-prova foram confeccionados com o aço-ferramenta AISI H13 (composição química média: C = 0,4%, Cr = 5,2%, Mo = 1,5%, Si = 1,0%, V = 0,9% e Mn = 0,35 % - em massa), sendo suas dimensões de 200 x 50 x 40 mm. Os corpos-de-prova foram fixados na máquina-ferramenta com o auxílio de uma morsa mecânica utilizando as superfícies de 200 x 40 mm. Os parâmetros fixos no processo usinagem foram: avanço por dente (0,10 mm) e profundidade axial de usinagem (0,5 mm). Utilizou-se o corte concordante, estratégia de usinagem de passes paralelos longitudinais na face de 200 x 50 mm e usinagem isenta de fluido de corte.

Para avaliar a influência da microestrutura do aço-ferramenta AISI H13 (nos estados recozido, e temperado e revenido) sobre a rugosidade da superfície usinada, foi conduzido um experimento tendo como variável de resposta os parâmetros de Rugosidade Ra, Rq e Rz. Como fatores a serem investigados, além da microestrutura do material, foram estudados também os fatores velocidade de corte (v_c) e profundidade radial de usinagem (a_e). Desta forma, aplicou-se um planejamento fatorial 2^3 , com três réplicas, sendo os níveis relacionados na Tab. (1).

Tabela 1. Caracterização do planejamento fatorial 2^3

| Fator | Nível baixo | Nível alto |
|--|-------------|----------------------|
| Estado da microestrutura do aço-ferramenta | Recozido | Temperado e revenido |
| velocidade de corte (v_c), em m/min | 75 | 150 |
| Profundidade radial de usinagem (a_e), em mm | 5 | 10 |

O material no estado recozido tinha dureza de 264 HBS, e no estado temperado e revenido a dureza de era de 53 HRC. Para fins de comparação, utilizando a norma E 140 -05 (ASTM, 2005), tem-se que a dureza do material recozido corresponde a 279 HV, enquanto que a dureza do material temperado e revenido é equivalente a 560 HV. É importante ressaltar que o volume removido utilizando a menor velocidade de corte (75 m/min) e a maior profundidade radial de usinagem (10 mm) promove a mesma taxa de remoção por unidade de tempo na condição inversa ($v_c = 150$ m/min e $a_e = 5$ mm).

Para medição da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo modelo SJ-201, ajustado para medir 5 comprimentos de amostragem (λ_c) de 0,8 mm, o que gerou um comprimento de avaliação de 4 mm. As medições foram realizadas em 3 posições distintas sobre cada superfície usinada, sendo considerada a mediana dos valores obtidos para as análises dos resultados. A avaliação da rugosidade da superfície usinada do aço-ferramenta AISI H13 foi compilada no software Minitab®, para os parâmetros de saída Ra, Rq e Rz. Devido à similaridade nas conclusões obtidas para os diferentes parâmetros, neste trabalho são apresentadas as discussões sobre o parâmetro Rz.

As análises de morfologia dos cavacos foram realizadas como auxílio de um Microscópio Óptico da marca Olympus (modelo BX51) com uma câmera digital acoplada (modelo LC Color da marca Evolution) e utilização do programa Image Pro-Plus. As amostras de cavaco foram lixadas, polidas e submetidas a um ataque com nital (3%) por 10 segundos.

Portanto, um ensaio consistia na realização de sucessivos passes paralelos na superfície de 200 x 50 mm, com os parâmetros estabelecidos pelo planejamento fatorial. O critério de final de vida é a usinagem de uma área de 10000 mm². Após este momento, os corpos-de-prova eram retirados da máquina-ferramenta para análise da rugosidade. Os insertos eram removidos do porta-ferramenta para troca e um novo corpo-de-prova e conjunto de insertos eram montados na morsa e no porta-ferramenta, respectivamente, para início de um novo ensaio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise da Morfologia dos Cavacos

A Fig. (1) mostra a análise da morfologia dos cavacos para os diferentes estados aço AISI H13 e os parâmetros de usinagem utilizados.

Conforme a Fig. (1), dois tipos de cavacos são evidentes: contínuo e segmentado. O cavaco contínuo pode ser observado praticamente para todas as condições de usinagem com o aço AISI H13 no estado recozido. Apesar de o cavaco ser relativamente curto em função do comprimento de contato ferramenta-peça, nenhuma evidência de fratura ou trinca é identificado em seu comprimento. Segundo Machado e Silva (2004), na presença do cavaco contínuo, o material cisalha na zona de cisalhamento primária com elevada taxa de deformação e permanece de forma homogênea sem fragmentação. Esta característica pode ser observada em todas as situações com a usinagem do material no estado recozido. Com $v_c = 75$ m/min e $a_e = 5$ mm não há indícios de presença de lamelas no cavaco. Contudo, o incremento nos parâmetros de usinagem (v_c e a_e) promove uma tendência à ondulação na superfície do cavaco que não entra em contato com a superfície de saída da ferramenta, mas também sem a presença de lamelas definidas no corpo do cavaco. A ondulação ocorre em uma frequência aproximada de 4,0 kHz para a $v_c = 75$ m/min e $a_e = 10$ mm e 8,7 kHz para $v_c = 150$ m/min e $a_e = 5$ mm. No caso do cavaco formado com o a $v_c = 150$ m/min e $a_e = 10$ mm também não se tem uma clara definição da frequência de ondulação.

Ainda na Fig. (1), com o aço AISI H13 no estado temperado e revenido existe uma clara tendência à formação de lamelas. Com a velocidade de corte de 75 m/min, as frequências são de aproximadamente 6,0 e 4,8 kHz para $a_e = 5$ mm e 10 mm, respectivamente. No caso do $a_e = 10$ mm, a frequência de formação é similar ao estado do material recozido (4,0 kHz). O incremento da v_c para 150 m/min promoveu uma forte elevação na frequência. Com $a_e = 5$ mm, a frequência é de aproximadamente 13,3 kHz. No caso de $a_e = 10$ mm, a frequência aumenta para 19,7 kHz. A transição de cavaco contínuo para segmento com o aumento da velocidade de corte foi descrita por Krajnik e Kopac (2004) na usinagem de aço-ferramenta. Zhang e Guo (2009) descreveram que o incremento no valor do avanço por dente também promove a referida transição para um mesmo valor de velocidade de corte. Os resultados desta pesquisa mostraram um claro aumento da frequência de formação de lamelas com o aço-ferramenta no estado temperado e revenido com o

incremento na velocidade de corte de 150 m/min. Porém, no maior patamar de velocidade de corte também identifica o incremento na frequência com a alteração da profundidade radial de usinagem (a_e) de 5 para 10 mm.

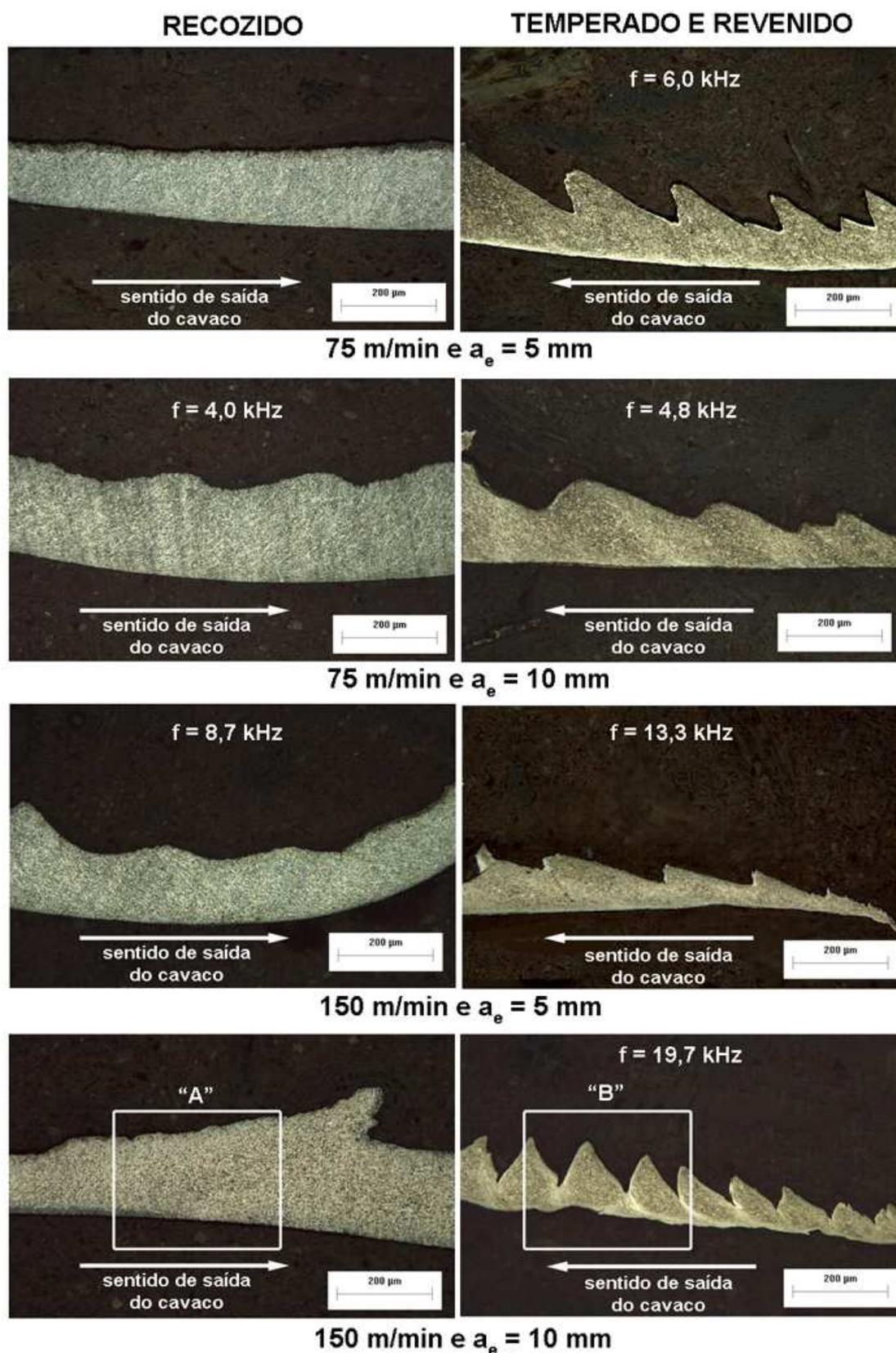


Figura 1. Morfologia dos cavacos do aço AISI H13 para as todas as condições do experimento

Com o objetivo de melhorar a compreensão da morfologia dos cavacos nos estados recozido e temperado e revenido, duas regiões da condição de $v_c = 150$ m/min e $a_e = 10$ mm foram identificadas na Fig. (1) (regiões "A" e "B") e ampliadas na Fig. (2).

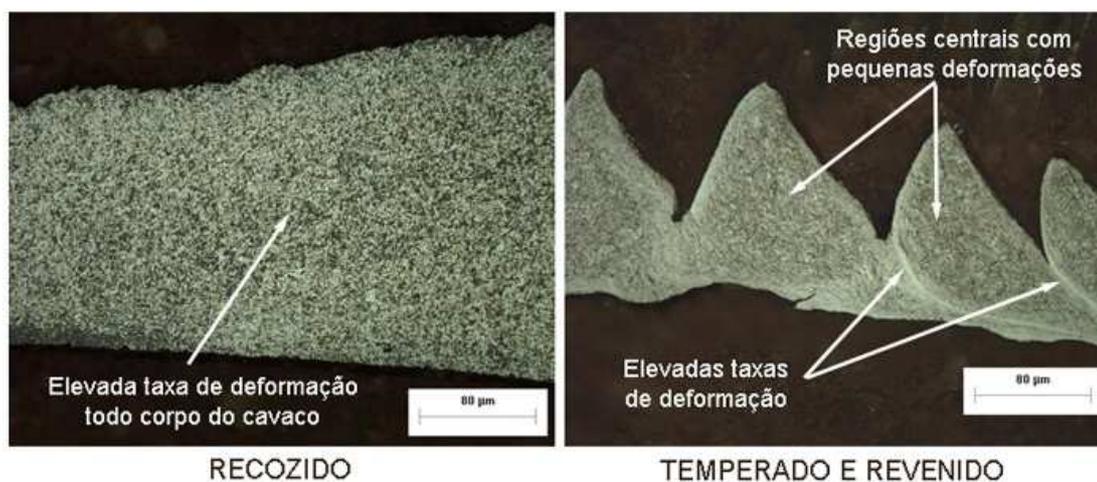


Figura 2. Ampliação da morfologia dos cavacos do aço AISI H13 nos estados recozido e temperado e revenido ($v_c = 150$ m/min e $a_e = 10$ mm)

Conforme a Fig. (2), o material recozido apresenta elevada taxa de deformação em todo o corpo do cavaco e de forma homogênea. Além disso, a identificação do ângulo de cisalhamento torna-se complexa em função da homogeneidade microestrutural da região. Por outro lado, a alteração do estado do material para temperado e revenido promove cavacos tipicamente segmentados, caracterizados por regiões entre lamelas com elevadas taxas de deformação ao longo de estreitas faixas no plano de cisalhamento e por regiões centrais das lamelas com pequena ou nenhuma deformação quando comparadas com a microestrutura do material antes da usinagem.

Alguns aspectos tornam importante a compreensão da frequência de formação do cavaco, o que é principalmente demonstrado nesta pesquisa diante da usinagem do material no estado temperado e revenido. Inicialmente, o aumento da frequência está relacionado à limitação da área do cavaco com elevadas taxas de deformação, conforme também demonstrado por Dolinsek, Ekinovic e Kopac (2004). Este fato sugere menor energia para a remoção do mesmo volume unitário de material por cisalhamento, já que uma menor região do cavaco é severamente deformada. Em consequência, presumi-se menor geração de calor na região de corte por unidade de volume. Além disso, em função de menores partículas – devido ao maior número de trincas no corpo do cavaco – imagina-se maior facilidade de remoção de cavacos da região de corte. Em alguns casos da manufatura de moldes e matrizes, a remoção do cavaco necessita ser feita em cavidades profundas e estreitas sem o auxílio de fluido de corte aquoso. Outro aspecto imprescindível é a observação da frequência de formação do cavaco em análises dinâmicas do sistema como fonte de vibração. Segundo Astakhov (2006), este aspecto é praticamente negligenciado em análises dinâmicas nos processos de usinagem, o que pode induzir a interpretações equivocadas dos resultados.

Considerando que os cavacos são gerados em um material destinado aos componentes funcionais de moldes e matrizes, a ausência de camada branca no aço H13 (ver Fig. (1) e (2)) principalmente no estado temperado e revenido é de fundamental importância, pois sugere a inexistência da referida modificação microestrutural na superfície usinada. Zhang e Guo (2009) identificaram a presença de camada branca no fresamento mesmo aço-ferramenta (AISI H13) com dureza de 50 HRC utilizando uma velocidade de corte próxima a esta condição ($v_c = 200$ m/min). A camada branca (descritas pelos autores como austenita retida com finos grãos – fase γ) é normalmente frágil e com elevado níveis de tensões residuais de tração. Estas características promovem a nucleação e, posterior propagação de trincas. Este fato restringe a vida do componente funcional diante dos inúmeros ciclos de processo ao qual o componente será submetido.

Elevadas deformações em todo o corpo do cavaco, como as identificadas no aço AISI H13 no estado recozido, sugerem que a superfície usinada também é submetida a níveis de tensões plásticas e, principalmente, elásticas maiores do que do material no estado temperado e revenido. Um provável efeito da usinagem diante de elevados níveis de deformações elásticas são valores de rugosidade superiores aos determinados por condições similares as do estado temperado e revenido. Esta hipótese pode ser verificada com a posterior análise da rugosidade nas superfícies usinadas.

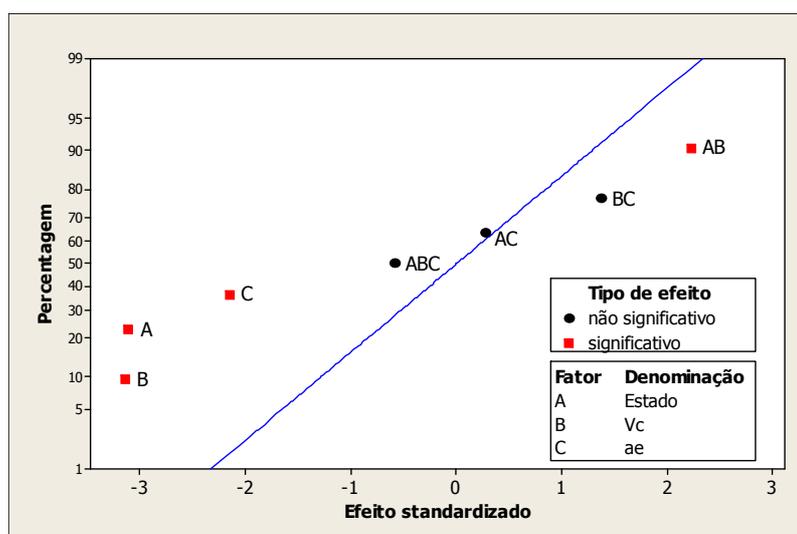
3.2. Análise da Rugosidade

A Tab. (2) apresenta a estimativa dos efeitos e estatística t para cada fonte de variação, bem como o respectivo valor P , sendo que este representa o menor nível de significância em que a hipótese nula (fonte não significativa) seria rejeitada.

Tabela 2. Estatística t para cada efeito no planejamento fatorial 2^3

| Fonte de variação | Estimativa do efeito (μm) | Estatística t | P |
|------------------------|--|---------------|-------|
| Estado | -1,2553 | -3,11 | 0,007 |
| v_c | -1,2650 | -3,14 | 0,006 |
| a_e | -0,8667 | -2,15 | 0,047 |
| Estado X v_c | 0,8983 | 2,23 | 0,041 |
| Estado X a_e | 0,1100 | 0,27 | 0,789 |
| v_c X a_e | 0,5517 | 1,37 | 0,190 |
| Estado X v_c X a_e | -0,2383 | -0,59 | 0,563 |

Com base nos efeitos padronizados (ou standardizado), a probabilidade normal auxilia na interpretação dos resultados (ver Fig. (3)). Para um nível de significância de 0,10, os resultados demonstram que os três fatores avaliados são significativos – estado do material, velocidade de corte e profundidade radial de usinagem –, bem como existe uma interação com o estado do material e a velocidade de corte.

Figura 3. Probabilidade normal dos efeitos, a partir do planejamento fatorial 2^3

Como mencionado anteriormente, a formação do cavaco é distinta com a alteração do estado do material (recozido, e temperado e revenido). Enquanto no estado recozido o cavaco é contínuo e associado a elevadas tensões plásticas e elásticas, no estado temperado e revenido, o cavaco tende a ser segmentado. Portanto, no estado recozido, os valores de rugosidade tendem a maiores níveis em função de recuperações elásticas na superfície usinada. Esta diferença na formação do cavaco, em consequência das deformações envolvidas no corte – tanto na peça como no cavaco –, é uma hipótese para a influência significativa do estado do material na rugosidade da superfície usinada. A velocidade de corte tem influência direta na frequência de formação de lamelas (Krajnik e Kopac, 2004). Como observado na Fig. (2), a região central das lamelas praticamente não é submetida a elevadas taxas de deformação, e apenas no contorno da lamela são identificadas regiões com elevadas taxas de deformações. Uma hipótese para a influência significativa da velocidade de corte na rugosidade é atribuída a menores taxas de deformação no corpo do cavaco com o aumento da frequência de formação de lamelas. Como demonstrado na Fig. (1), a profundidade radial de usinagem também tem efeito na frequência de formação de lamelas, mas é importante ressaltar que sua influência significativa na rugosidade pode também ser relacionada à maior estabilidade do processo em função do aumento da área de contato entre ferramenta e peça na superfície perpendicular ao eixo da ferramenta.

Com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão dos resultados de rugosidade, a Fig. (4) apresenta as interações no planejamento fatorial 2^3 .

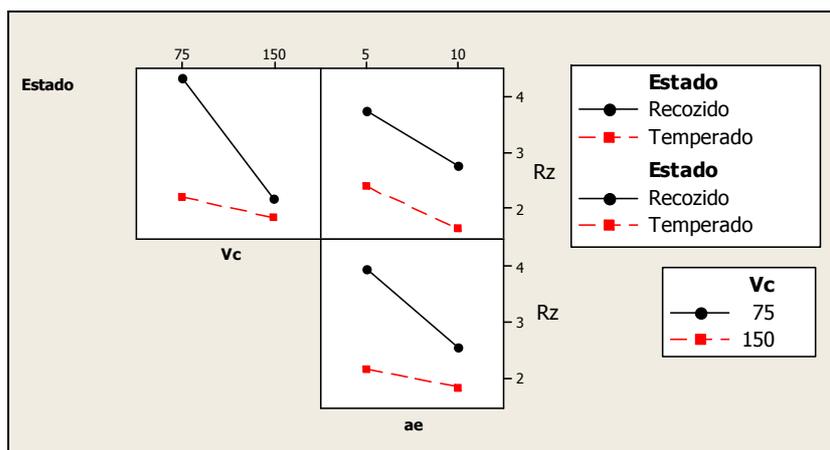


Figura 4. Interações no planejamento fatorial 2^3 , para o parâmetro Rz (em μm)

Baseados nos resultados da Fig. (4), é possível realizar as seguintes inferências:

- interação entre o estado do material usinado e a velocidade de corte: pode-se determinar que o efeito da velocidade de corte no estado temperado e revenido é pequeno, enquanto que no estado recozido houve uma redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte;
- interação entre estado do material usinado e a profundidade radial: nenhuma interação é percebida, apenas evidenciando que o material no estado recozido apresenta sistematicamente uma rugosidade maior, quando comparado com o material no estado temperado e revenido;
- para o nível de significância $\alpha = 0,10$, não existe interação entre a velocidade de corte e a profundidade radial de usinagem. Mas observando a Fig. (4) de interação, verifica-se que a rugosidade não é alterada significativamente com o aumento da profundidade radial de usinagem, quando a velocidade de corte é de 150 m/min. No entanto, com a diminuição da velocidade de corte e com o aumento da profundidade radial, ocorre uma redução no valor da rugosidade superficial. É importante destacar que os valores médios apresentados são decorrentes dos materiais nos estados recozido e temperado e revenido.

Como o estado do material afeta a rugosidade da superfície usinada, é recomendável subdividir os resultados obtidos no experimento. Desta forma, os dados foram extratificados para o material recozido e para o material temperado e revenido. Portanto, cada análise caracterizou-se como um planejamento fatorial 2^2 . Baseado na probabilidade normal dos efeitos no material recozido (Fig. (5)), verifica-se que a alteração na velocidade de corte gera um efeito significativo na rugosidade da superfície usinada, para um nível de significância de 0,10. No entanto, evidencia-se que também existe uma influência, embora em menor escala, da profundidade radial e da interação entre os dois fatores, uma vez que todos os pontos encontram-se afastados da linha da probabilidade normal cumulativa.

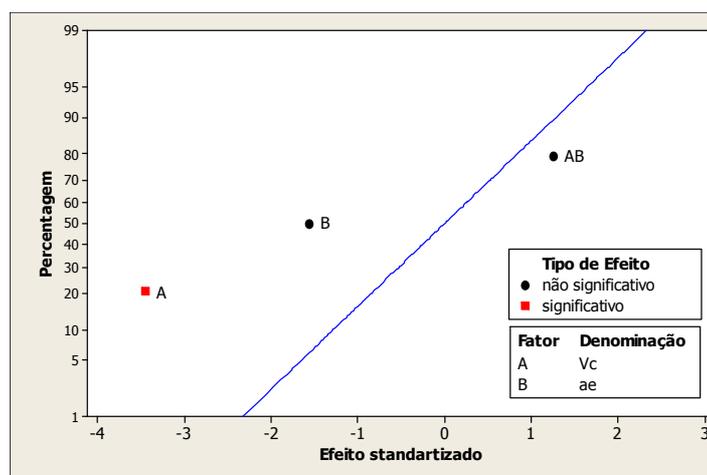


Figura 5. Probabilidade normal dos efeitos, para o material recozido

Isto pode ser melhor visualizado nas interações demonstradas na Fig. (6). Enquanto que para a velocidade de 150 m/min, a variação na profundidade radial não provoca alterações na rugosidade da superfície usinada, na velocidade de corte 75 m/min, a rugosidade diminui com o aumento da profundidade radial. Na referida figura também é evidenciado

o efeito principal da velocidade de corte, visto que a velocidade de corte de 75 m/min apresenta os maiores valores rugosidade, quando comparado com a velocidade de corte de 150 m/min.

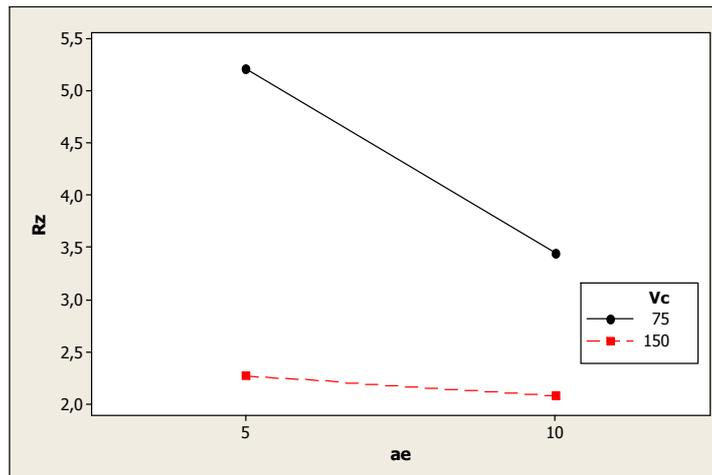


Figura 6. Interação dos fatores v_c x a_e , para o material recozido, para o parâmetro Rz (em μm)

Ao se realizar a mesma análise para o material temperado e revenido, a probabilidade normal, conforme a Fig. (7), verifica-se nenhum efeito significativo decorrente dos fatores testados, considerando um $\alpha = 0,10$. Apesar disto, é possível evidenciar que os pontos estão próximos a linha da probabilidade normal cumulativa, mas não distribuídos simetricamente em relação a ela, mostrando que pode haver um pequeno efeito decorrente da variação dos fatores.

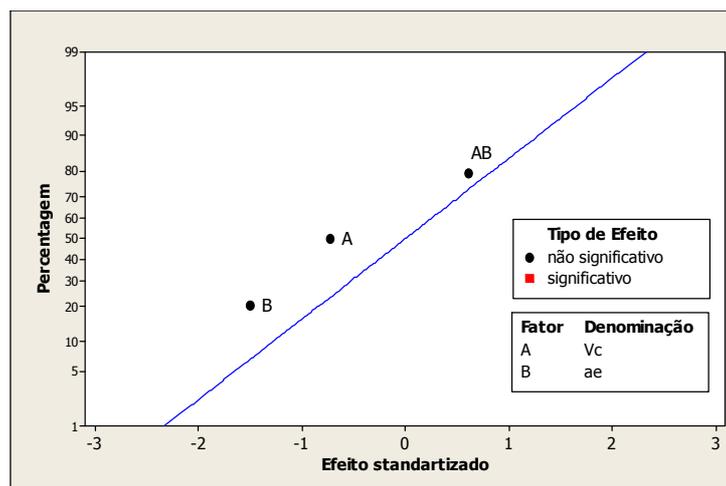


Figura 7: Probabilidade normal dos efeitos, para o material temperado e revenido

Utilizando a Fig. (8) e mantendo a mesma escala para os valores da rugosidade Rz, verifica-se que o efeito decorrente das variações dos fatores foi pequena considerando a dispersão dos valores originalmente obtidos. Assim, pode-se inferir que a rugosidade da superfície usinada no material temperado e revenido não é significativamente afetada pelas mudanças na velocidade de corte e na profundidade radial de usinagem.

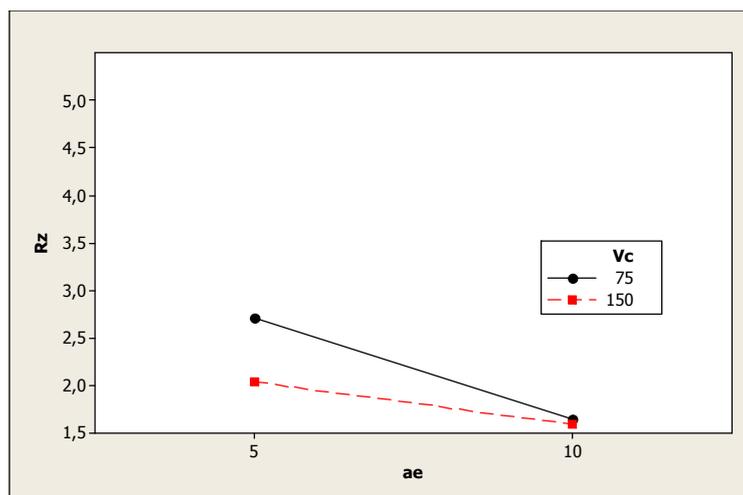


Figura 8: Interação dos fatores v_c x a_e , para o material temperado e revenido, para o parâmetro Rz (em μm)

4. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir para o fresamento do aço AISI H13 no estado recozido e temperado e revenido com ferramentas de metal duro com cobertura que:

- a morfologia dos cavacos no estado recozido demonstra cavacos contínuos, indiferente ao parâmetro de usinagem utilizado; no estado temperado e revenido, os cavacos apresentam-se segmentados com tendência ao aumento da frequência com o incremento na velocidade de corte;
- elevadas taxas de deformação são identificadas em todo corpo do cavaco do material recozido, enquanto que no estado temperado e revenido são identificadas elevadas taxas de deformação somente no contorno da lamela;
- o estado do material, a velocidade de corte e a profundidade radial de usinagem afetam significativamente os valores de rugosidade da superfície usinada ao se considerar todas as variáveis envolvidas;
- ao se desagregar os resultados de rugosidade em função do estado do material usinado, a velocidade de corte tem um efeito significativo, e no caso do material no estado temperado e revenido, nenhum dos fatores tem influência para o nível de significância $\alpha = 0,10$.

5. REFERÊNCIAS

- ALTAN, T. et al. ,1993, “Advanced techniques for die and mould manufacturing”, Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 2, pp. 707-716.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E 140: 2005, “Standard Hardness Conversion Tables for Metals – Relationship among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness and Scleroscope Hardness”, ASTM International.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287:2002, “Especificação Geométrica do Produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade”. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASTAKHOV, V.P., 2006, “Tribology of Metal Cutting”, Elsevier Publisher, London, United Kingdom, 1 ed. 425 p.
- CAMUSCU, N.; ASLAN, E., 2005, “A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, No. 1/2, pp. 121-126.
- DOLINSEKA, S., EKINOVIC, S., KOPAC, J., 2004, “A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157/158, No. 1, pp. 485-490.
- KRAJNIK, P., KOPAC, J., 2004, “Modern machining of die and mold tools”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 157-158, No. 1, pp. 543-552.
- LACALLE, L.N.L. et al., 2002, “Improving the surface finish in high speed milling of stamping dies”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 123, No. 2, pp. 292-302.
- MACHADO, A.R.; SILVA, M.B., 2004, “Usinagem dos Metais”, Ed. Intergraf, Uberlândia, Brasil, 8 ed. 266 p.
- MACHADO, A., 2009, “Avaliação da rugosidade em superfícies complexas”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Tupy, Sociosc, Joinville.
- NICOLA, G.L., 2008, “Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido”. Dissertação (Mestrado), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

- NUNES, J.M.; GOMES, J.O.; SOUZA, G.G.; SUTÉRIO, R., 2008, “Influência da interpolação da trajetória da ferramenta no fresamento a altas velocidades de superfícies complexas”, Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, Vol.4, No. 4, pp. 37- 42.
- POLLI, M.L.; WEINGAERTNER, W.L.; SCHROETER, R.B.; ZEILMANN, R.P., 2005, “Influência das vibrações decorrentes da dinâmica do processo de fresamento de topo esférico a altas velocidades de corte sobre a qualidade da superfície da peça”, Revista Máquinas e Metais, Vol. 479, pp. 62-69.
- STEPHENSON, D.A.; AGAPIOU, J.S., 2005, “Metal Cutting Theory and Practice”. Ed. Taylor & Francis, Londres, UK, 2 ed. 864 p.
- STOECKHERT, K.; MENNIG, G., 1998, “Mold-making handbook”, Ed. Hanser Gardner, Munique, Alemanha, 2 ed. 561p.
- ZHANG, S.; GUO, Y. B., 2009, “An experimental and analytical analysis on chip morphology, phase transformation, oxidation, and their relationships in finish hard milling”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, No. 11, pp. 805-813.

6. DIREITOS AUTORAIS

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