

APLICAÇÃO DO TORNEAMENTO LFV PARA CISALHAMENTO DE CAVACOS PROVENIENTES DO AÇO ABNT-1020

Cláudio Parreira Lopes, claudio@div.cefetmg.br¹

José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br²

¹CEFET Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus V, Rua Álvares de Azevedo 400, Bela Vista, Divinópolis, MG, CEP 35503-822

²PUC Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30535-901

Resumo: Materiais dúcteis são amplamente utilizados pelas indústrias, porém, durante sua usinagem, produzem cavacos contínuos. Esta forma de cavaco é responsável por uma série de inconvenientes operacionais, como riscamento de superfícies já finalizadas, segurança do operador, rompimento de tubulações pressurizadas, danos à pintura da máquina, estragos em vedações, entre outros. Apesar das ações corretivas para seu controle (adição de elementos de liga ao material, alteração dos parâmetros de corte, utilização de fluido a alta pressão, utilização de ferramentas com quebra cavaco), ainda encontram-se dificuldades para prever, elaborar e padronizar cavacos com a geometria operacional desejada. Este trabalho tem como objetivo estudar a aplicação do método LFV (low frequency vibration) para a otimização do cisalhamento de cavacos provenientes de um material dúctil (aço ABNT-1020). Os corpos de prova foram usinados em três níveis de velocidades de corte (v_{c1} , v_{c2} e v_{c3}), três níveis de avanço (f_1 , f_2 e f_3) e dois níveis de profundidades de corte (a_{p1} e a_{p2}), onde a rugosidade (R_a), a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f) e a microdureza (HV) foram mensuradas e comparadas após usinagem convencional e corte frequencial. Através da análise micrográfica das raízes do material cortado, avaliou-se as regiões de fluxo estabelecidas, buscando-se compreender os fatores responsáveis pelo cisalhamento do cavaco. Os resultados mostraram que, independente do parâmetro de corte utilizado, a usinagem LFV gerou condições favoráveis para formação do cavaco, promovendo seu cisalhamento em todos os ensaios realizados. O método LFV também mostrou-se eficaz para alterar a microdureza do material a ser cortado, sendo capaz de inserir regiões pontuais de encruamento. Observou-se que não houve diferenças significativas no estado de superfície entre corte frequencial e usinagem convencional e, apesar do método LFV ter gerado maiores forças de avanço, as componentes vetoriais da força ativa foram melhor distribuídas.

Palavras-chave: material dúctil, torneamento, formação de cavacos, vibração de baixa frequência, corte frequencial.

1. INTRODUÇÃO

Apesar das diversas alternativas utilizadas para o controle da formação de cavacos, ainda encontram-se dificuldades para prever, elaborar e padronizar sua geometria operacional. Um exemplo é encontrado na manufatura dos materiais dúcteis. Largamente utilizados pelas indústrias, estes materiais produzem cavacos contínuos quando são usinados, o que é considerado um sério inconveniente para o processo.

Para cisalhar cavacos de materiais dúcteis, um método utilizado consiste na adição de elementos de liga, como chumbo, telúrio, selênio ou enxofre. O objetivo destes elementos é reduzir a tensão de cisalhamento necessária para fragilizar o material (MACHADO et al., 2011, p. 68; MILLS e REDFORD, 2012, p. 70; MANG, BOBZIN e BARTELS, 2011, p. 77). Consequentemente, a adição de elementos de liga altera propriedades metalúrgicas, o que não é desejável do ponto de vista mecânico e estrutural.

Outra alternativa consiste no controle dos parâmetros de corte, podendo-se citar a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. Pode-se dizer que esta opção é a mais utilizada, porém, na maioria dos casos, é necessária uma combinação específica de fatores para que ocorra a quebra do cavaco no material dúctil, tornando o processo de usinagem mais complexo do que de fato é.

A usinagem aplicando-se fluido de corte à alta pressão é outra provável solução para o problema (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013, p. 169; BIRMINGHAM et al., 2012, p. 762; HABAK e LEBRUN, 2011, p. 5; KRAMAR e KOPAC, 2009, p. 686; LAUWERS, 2011, p. 246). Este método produz resultados satisfatórios do ponto de vista da formação e remoção do cavaco, porém gera problemas relacionados à utilização, manuseio e descarte dos fluidos de corte. Além disso, esta escolha é contrária às premissas de projeto das ferramentas modernas, que são aptas a trabalharem em condições de mínima lubrificação (MQL) ou preferencialmente sem a utilização de fluidos de corte.

A utilização do chamado quebra cavaco é outra opção aplicada para promover a descontinuidade do cavaco. O quebra cavaco tem como objetivo alterar o fluxo do material cortado, influenciando sua curvatura vertical e lateral. Normalmente pastilhas intercambiáveis possuem o quebra cavaco moldado, o que torna este método bastante prático.

Entretanto, estas geometrias são eficientes somente para determinadas condições de corte, o que torna sua utilização limitada para promover deformações e alterar a continuidade do cavaco.

Excluindo-se estas alternativas, o cisalhamento de cavacos provenientes de materiais dúcteis ainda é um problema a ser resolvido pela usinagem. Este trabalho propõe a utilização da usinagem vibratória com baixa frequência (LFV), de modo a induzir a ruptura do cavaco pelo corte frequencial. Admite-se, por hipótese, que este tipo de técnica produz zonas de encruamento devido à indentação, criando esforços adicionais para formação do cavaco, que normalmente não são observados nas condições normais de fabricação. Ao criarem-se regiões indentadas com dureza heterogênea, as regiões menos encruadas tornam-se mais susceptíveis à deformação, permitindo que zonas de maior dureza formem barreiras para o fluxo do material. Estas barreiras agem como freios, alterando a trajetória do cavaco e ocasionando sua quebra em pontos específicos, produzindo diferentes espessuras de material cortado.

2. USINAGEM ASSISTIDA POR VIBRAÇÃO

Segundo Sugihara e Enomoto (2016, p. 647), a usinagem assistida por vibração (VAM) é um método alternativo de fabricação onde a ferramenta de corte realiza deslocamentos com amplitudes controladas. Neste processo, a ferramenta é acionada por um dispositivo externo (transdutor) que basicamente realiza dois tipos de deslocamentos: linear (VAM 1D), orientado na mesma direção que o avanço da ferramenta e elíptico (VAM 2D), cujo movimento oblongo ocorre na mesma direção que a velocidade de corte. Quando são alcançadas combinações apropriadas entre velocidade de corte, amplitude e frequência de vibração, o contato da ferramenta com a peça é suprimido, ocasionando a formação de cavacos com espessura variável.

Segundo Hong, Gu e Xiang (2010, p. 648), o corte por vibração pode ser classificado em duas categorias: baixa frequência (vibração menor que 200 Hz) e alta frequência (vibração acima de 200 Hz). Os autores apontam algumas vantagens do corte com baixa frequência:

- Formação de uma camada de óxidos, quando ocorre a separação entre ferramenta e peça, melhorando as condições de lubrificação;
- Concentração de deformações em regiões específicas;
- Aumento teórico da velocidade de corte.

A usinagem utilizando alta frequência é também conhecida como UAT (torneamento ultrassônico assistido). O que basicamente difere a usinagem LFV do processo UAT, além da frequência de vibração, é o campo de aplicação do processo. Segundo Sharma e Pandey (2016, p. 1) o processo UAT está mais voltado para o corte de materiais com difícil usinabilidade, como ligas de níquel, ligas de titânio e materiais compostos. O desgaste excessivo da ferramenta, a dificuldade para formação do cavaco, a baixa qualidade do estado de superfície e as forças de corte elevadas justificam o emprego do método UAT em substituição à usinagem convencional. Entretanto, o método UAT é limitado pelo uso de baixas velocidades de corte, baixos avanços e pequenas profundidades de usinagem (devido às propriedades mecânicas dos materiais usinados), o que ocasiona pequenas taxas de remoção de material.

Segundo Maurotto et al. (2013, p. 5), a usinagem por vibração ultrassônica faz com que o material trabalhado tenha uma mudança drástica no seu estado elastoplástico, devido às condições de contato existentes. A fricção a seco na região de interação entre as superfícies em atrito transforma o contato num regime quase-viscoso, onde a energia acústica é absorvida pelo deslocamento dos grãos de fronteira. Estas modificações que ocorrem durante a usinagem ultrassônica podem justificar as limitações presentes no método.

Como exemplo de aplicação do processo UAT, Shaw (2005, p. 589) descreve que Moriwaki e Shamoto desenvolveram um modelo de ferramenta vibratória ultrassônica que aplicava o conceito VAM2D. O porta-ferramenta ficava apoiado em placas piezoelétricas, de modo a ressonar numa frequência em torno de 20 kHz. Tensões sinusoidais eram aplicadas às placas, que através de um desvio de fase, produziam um padrão elíptico de vibração, com amplitude de 4 mm. Para que o movimento elíptico fosse eficaz, era necessário que a velocidade de corte fosse menor que a velocidade de vibração. No modelo de ferramenta proposto pelos autores, a velocidade de corte máxima permitida era igual a 40 m/min.

Brehl e Dow (2007, p. 153) estudaram a usinagem assistida por vibração. Os autores afirmaram que existia uma velocidade de avanço crítica, numa determinada frequência, onde a ferramenta de corte seria capaz de quebrar periodicamente o cavaco gerado. Segundo os autores, quando a ferramenta move-se com avanço e velocidade específica, sua posição e velocidade podem ser determinadas através das Equações 1 e 2, onde $x(t)$ é a posição no tempo (t) , $x'(t)$ a velocidade instantânea e (ω) a frequência angular relacionada com a frequência de vibração (f) , através da Equação 3. O modelo estudado pelos autores está ilustrado na Figura 1.

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t) + V_t \quad (1)$$

$$x'(t) = \omega A \cdot \cos(\omega t) + V \quad (2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3)$$

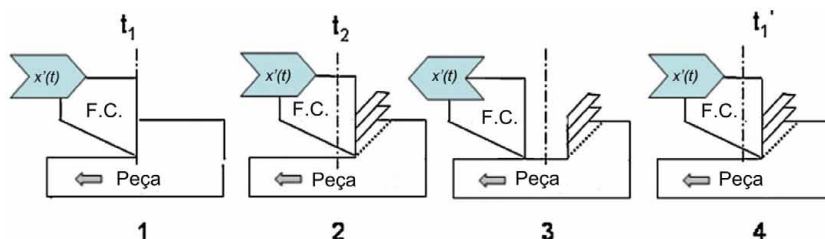


Figura 1. Modelo de usinagem assistida por vibração (1D) Brehl e Dow (2007, p. 155).

Utilizando usinagem ultrassônica, Nath e Rahman (2008, p. 14) investigaram os efeitos da velocidade de corte e do avanço no torneamento do aço Inconel 718. A qualidade do corte foi avaliada em função das forças de usinagem, desgaste da ferramenta, formação do cavaco e rugosidade superficial. Apesar dos resultados obtidos terem sido considerados satisfatórios, as ferramentas de CBN apresentaram avarias e rendimento válido somente para determinada faixa de velocidade de corte.

Muhammad et al. (2012, p. 351) realizaram torneamento do aço Ti-15333 através de vibração assistida ultrassônica, comparando os resultados com o processo convencional. Os autores observaram que ocorreu um declínio de aproximadamente 77% das forças de corte, inclusive quando aumentou-se a profundidade de usinagem. Apesar das temperaturas na região cortada terem sido superiores aquelas da usinagem convencional, as temperaturas na ferramenta foram menores, o que pode minimizar os mecanismos de desgaste presentes.

Recentemente MMTS (2016) desenvolveu um dispositivo utilizando o conceito de usinagem vibratória a baixa frequência. A oscilação da ferramenta, na mesma direção que o avanço, ocorria pelo sincronismo com o giro da árvore. Neste mecanismo, a amplitude alcançada atingiu um valor máximo igual 0,03 mm no final da segunda rotação. Para usinagem de canais, o mesmo mecanismo realizava a vibração na direção radial da peça, onde o cisalhamento do material ocorria por cavitação.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O material utilizado neste trabalho foi o aço ABNT-1020 laminado a quente, fornecido em barras de 38,1 mm de diâmetro, com dureza compreendida entre 120-170 HB. Os ensaios de torneamento foram realizados num torno Romi modelo Tormax 20A utilizando-se usinagem convencional e corte frequencial. Para a usinagem LFV utilizou-se o dispositivo fabricado mostrado na Figura 2. As raízes dos cavacos foram obtidas através de um sistema de quick-stop adaptado ao mecanismo de corte LFV. Para o torneamento dos corpos de prova utilizaram-se ferramentas de metal duro, classe ISO P20, com quebra cavaco tipo MA e recobertas por TiN. O código chave para identificação das ferramentas foi o WNMG080408, segundo Mitsubishi (2012, p. A-121).

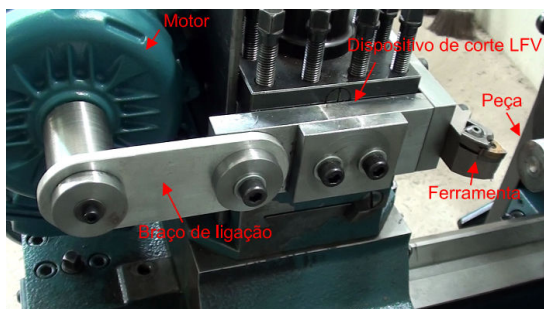


Figura 2. Dispositivo para corte frequencial.

Os parâmetros de usinagem utilizados foram três níveis de velocidade de corte ($v_{c1} = 47$ m/min., $v_{c2} = 73$ m/min. e $v_{c3} = 116$ m/min.), três níveis para avanço ($f_1 = 0,057$ mm/volta, $f_2 = 0,073$ mm/volta e $f_3 = 0,104$ mm/volta) e dois níveis para profundidade de usinagem ($a_{p1} = 2$ mm e $a_{p2} = 3$ mm). Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013, p. 49) e Machado et al. (2011, p. 71), em baixas velocidades de corte, cavacos geralmente não apresentam problemas com relação à sua ruptura. Optou-se por trabalhar apenas com uma das velocidades de corte (v_{c3}) próxima dos valores de referência de catálogo, a fim de comprovar-se a influência da baixa velocidade de corte na alteração da geometria do cavaco. As profundidades de usinagem e os avanços mantiveram-se dentro dos valores de referência.

As variáveis de resposta foram a rugosidade (R_a), a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f) e a microdureza (HV). A medição da rugosidade foi realizada através de um rugosímetro Tesa modelo Rugosurf 20. As forças de corte foram mensuradas através de um sistema de aquisição composto por uma célula de carga IWM modelo ICA com capacidade

de 0,5 toneladas e um indicador industrial para célula de carga Mypin modelo LM8-RRD. A microdureza foi medida através de um microdurômetro Shimadzu HVM-2T.

Para cada etapa subsequente da preparação dos corpos de prova os mesmos foram lixados e polidos em intervalos de tempos cronometrados, a fim de minimizarem-se os efeitos do acréscimo de tensões. As micrografias da região de deformação foram realizadas através de um microscópio eletrônico de varredura Jeol modelo IT-300. Para análise estatística assumiu-se um modelo de efeitos fixos, com ensaios totalmente aleatorizados. As variáveis dependentes foram verificadas por teste de normalidade, análise de variância (ANOVA) e contraste estatístico da diferença, considerando-se um nível de significância igual a 0,05.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os gráficos da Figura 3 apresentam o comportamento da força de corte de acordo com as condições de ensaio realizadas. Pode-se observar de maneira geral que a velocidade de corte $v_{c3} = 116$ m/min. produziu menor força de corte quando comparada às demais velocidades. Menores forças de corte também foram observadas quando utilizou-se a menor profundidade de usinagem $a_{p1} = 2$ mm.

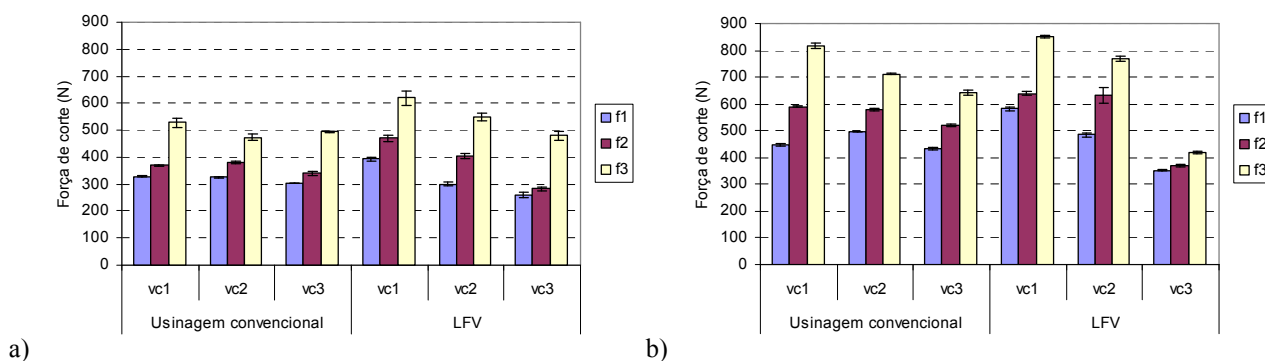


Figura 3. a) Força de corte para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p1} = 2$ mm;
b) Força de corte para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p2} = 3$ mm.

Quando realizou-se a comparação entre o método de usinagem convencional e o método LFV, para mesma profundidade de usinagem, observou-se que o corte frequencial produziu forças de corte pouco maiores. Esta variação da força de corte pode ser explicada pela presença ou pela eliminação da APC (aresta postiça de corte). Na Figura 4 a), proveniente do corte convencional, pode-se observar que parte do material que constituía a APC foi separada da ferramenta, deixando uma porção fixada na interface de contato com a raiz do cavaco. Na Figura 4 b), a frequência de indentação da ferramenta ocasionou o cisalhamento do material proveniente da APC. Analisando-se os valores da força de corte para ambas as situações, percebeu-se que a falta de estabilização da APC, devido ao corte LFV, produziu maior força de corte, pois o material foi removido com um menor ângulo de saída da ferramenta. De forma contrária, durante o período de ocorrência da APC, o corte ocorreu com maior ângulo de saída da ferramenta, ocasionando menores forças de corte.

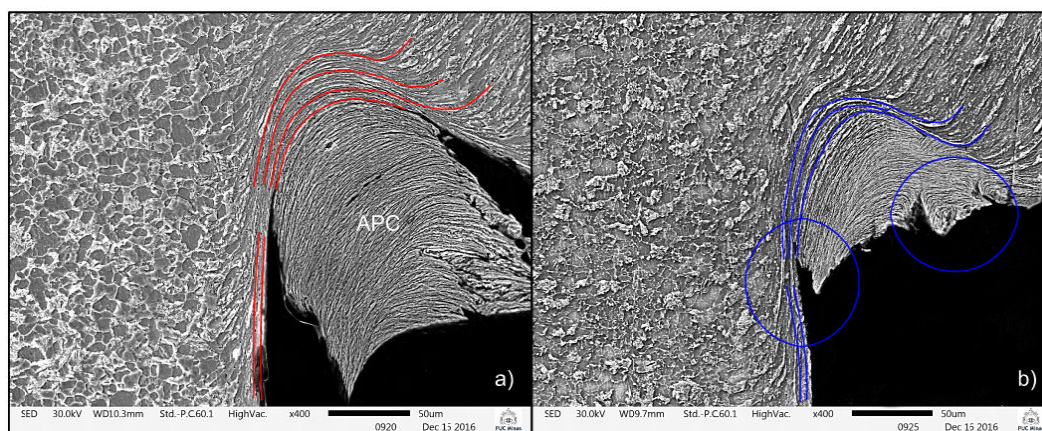


Figura 4. a) Raiz do cavaco na usinagem convencional em v_{c1} , f_1 e a_{p1} ;
b) Raiz do cavaco na usinagem LFV em v_{c1} , f_1 e a_{p1} .

Além disso, observando-se a Figura 4 a), parte do material formado pela APC também promoveu maior raio de curvatura na zona de deformação, quando analisou-se a raiz do cavaco pelo método convencional. Maiores raios de curvatura podem indicar que o material possui menores taxas de deformação, enquanto que menores raios de curvatura podem ser associados à maior concentração de tensões. Segundo Stephenson e Agapiou (2016, p. 408), evidências experimentais indicam que a curvatura do cavaco resulta diretamente da deformação primária. Esta deformação inicia-se abaixo do ponto de contato entre ferramenta e peça, conforme foi observado.

Na Figura 4 b) pode-se notar a ocorrência de menores raios de curvatura para usinagem LFV, o que sugere a formação de regiões mais deformadas e menos susceptíveis a recuperação elástica. Regiões mais deformadas também podem ser entendidas como prováveis causas para o aumento da microdureza, o que promove restrições ao fluxo do material cortado e aumentam a possibilidade de ruptura do cavaco.

Segundo Childs et al. (2000, p. 53), fatores que podem influenciar o raio de curvatura dos cavacos estariam relacionados com as variações de trabalho no encruamento, em função da variação da espessura do cavaco. Acredita-se que a usinagem pelo método LFV apresentou maior influência na alteração do raio de curvatura quando comparada ao método convencional. Prova disso foi a obtenção de cavacos com espessura variável e encruados, que diferem-se de cavacos com baixa espessura e dúcteis, provenientes da usinagem convencional. Devido aos maiores níveis de recalque encontrados nesta condição, pode-se afirmar que cavacos provenientes da usinagem LFV apresentam maiores taxas de deformação, tornando-se mais susceptíveis ao cisalhamento.

Os gráficos da Figura 5 apresentam o comportamento da força de avanço de acordo com as condições de ensaio realizadas. Analisando-se as variações da força de avanço, para mesma profundidade de usinagem, pode-se notar que também ocorreu um crescimento de seus valores quando utilizou-se o processo de usinagem LFV.

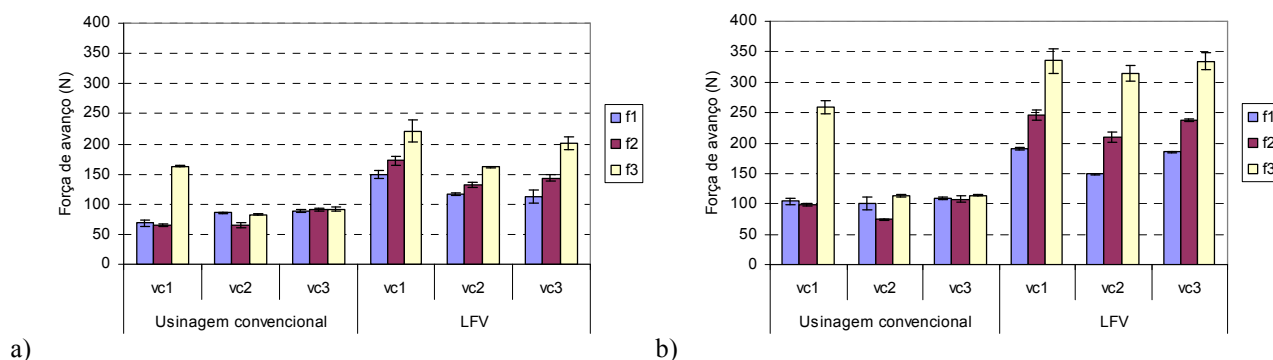
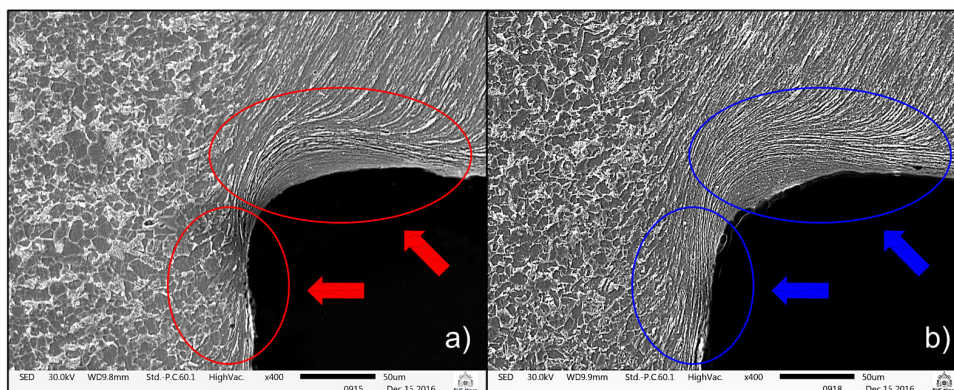


Figura 5. a) Força de avanço para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p1} = 2$ mm;
b) Força de avanço para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p2} = 3$ mm.

Este crescimento pode ser explicado através da análise da zona de aderência. Segundo Trent e Wright (2000, p. 41), na usinagem de materiais que apresentam cavacos contínuos, é comum observar-se uma zona de aderência na interface cavaco e superfície de saída da ferramenta. O movimento do cavaco nesta região acontece devido a sucessivos cisalhamentos do material, apresentando deformações mais elevadas do que aquelas encontradas no próprio plano de cisalhamento. A zona de aderência ocorre devido às altas tensões de compressão e deformação localizadas, sendo favorecida por altas velocidades de corte e por longos tempos de usinagem. Assim, através da observação dos diferentes efeitos produzidos pelos métodos de usinagem empregados, pode-se notar a ocorrência de diferentes zonas de aderência.

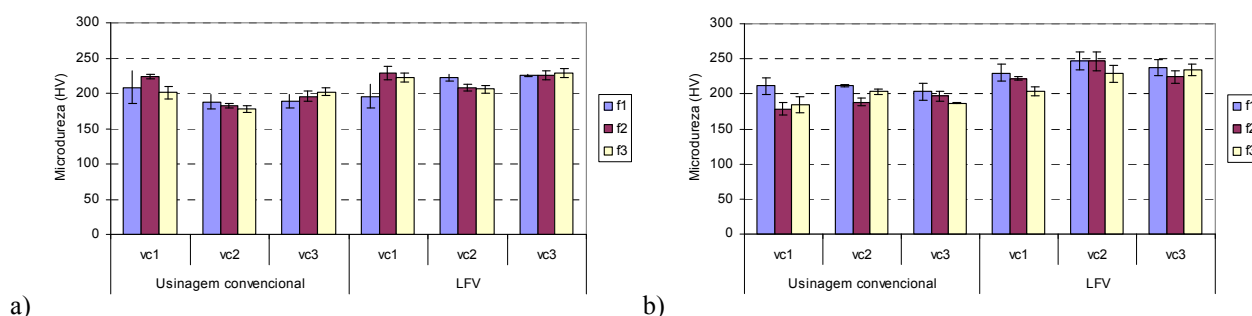
Na Figura 6 a), o fluxo que caracteriza esta região encontrou-se localizado somente acima da área referente à superfície de saída da ferramenta, enquanto que na Figura 6 b) o mesmo fluxo pode ser observado na região da superfície de saída e também à frente da região que representa a superfície de folga da ferramenta. Este fluxo adicional ocorreu devido à inserção de tensões provenientes do mecanismo de indentação do corte LFV, com consequente aumento da microdureza. No caso da Figura 6 b), o método frequencial gerou uma operação de corte livre da APC, com maior comprimento de contato entre cavaco e superfície de saída, ocasionando formação de maiores zonas de aderência. Consequentemente, a ocorrência de maiores zonas de aderência aumentou o valor da força de avanço.

Baseando-se nos valores da força de corte e da força de avanço encontrados, pode-se dizer que as forças de usinagem obtidas pelo corte LFV produziram menores componentes vetoriais para força ativa, o que significa que ocorreu um melhor aproveitamento da potência disponível. Neste caso, a maior força de usinagem (força de corte) ficou menos concentrada na aresta principal de corte da ferramenta, proporcionando indiretamente menor tendência à ocorrência de mecanismos de desgaste.



**Figura 6. a) Raiz do cavaco na usinagem convencional em v_{c3} , f_3 e a_{p2} ;
b) Raiz do cavaco na usinagem LFV em v_{c3} , f_3 e a_{p2} .**

A medição da microdureza foi realizada em duas regiões de interesse: região central do corpo de prova embutido (não afetada pelo processo de corte) e região de interface entre peça e ferramenta (região de indentação). Para execução das marcações, foram obedecidas as distâncias mínimas entre bordas e indentador citadas na norma ASTM-E384. Comparando-se a região não afetada pelo processo de corte com a região de interface, observou-se que esta manteve os valores de microdureza iguais aos valores dos corpos de prova sem usinagem, ou seja, os resultados coletados indicam que não houve aumento da microdureza nesta região. O gráfico da Figura 7 apresenta o resultado da microdureza medida na região de indentação da ferramenta.

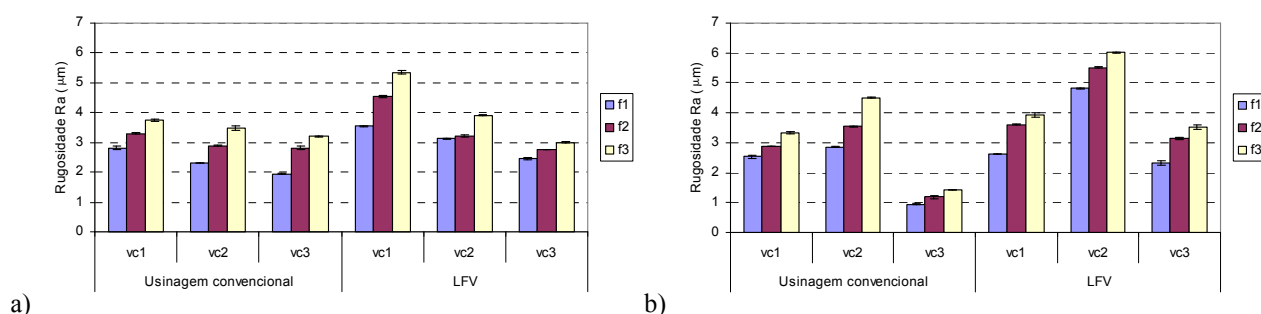


**Figura 7. a) Microdureza para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p1} = 2$ mm;
b) Microdureza para usinagem convencional e usinagem LFV para $a_{p2} = 3$ mm.**

De maneira geral, o valor da microdureza tendeu ao crescimento quando utilizou-se a usinagem LFV e diminuiu quando utilizou-se a usinagem convencional, conforme esperado. Menores velocidades de corte, na usinagem convencional, foram responsáveis por menores níveis de microdureza devido à ausência de uma zona de fluxo variável, conforme ocorreu no processo LFV. Não existindo condições de alteração no escoamento, o material não conseguiu reter deformações que, em curtos intervalos, poderiam proporcionar a quebra do cavaco. Como regiões menos encruadas são mais susceptíveis à deformação, pode-se afirmar que o corte frequencial conseguiu ocasionar deformações heterogêneas na zona de fluxo, o que permitiu um comportamento diferenciado do cavaco. Como materiais dúcteis necessitam de grande deformação para romperem-se, é correto afirmar que o mecanismo LFV gerou diferentes estados de tensão, alterando a microdureza principalmente quando utilizou-se maior velocidade de corte.

Os gráficos da Figura 8 apresentam os resultados referentes à medição da rugosidade. Analisando-se os valores obtidos, notou-se que a velocidade de corte foi o fator de maior influência para seu aumento, sendo a velocidade de corte $v_{c3} = 116$ m/min. aquela que menos contribuiu estatisticamente. Este fato pode ser explicado pelas características físicas do material usinado. A rugosidade encontrada na usinagem de aços com baixo teor de carbono é afetada pela alta deformabilidade do material, que é composto basicamente por ferrita livre. A grande tendência de adesão da ferrita promove incrustações na superfície trabalhada, principalmente em baixas velocidades de corte, conforme observado. Segundo Klocke (2011, p. 252) este fenômeno pode ser minimizado à medida que a estrutura apresenta maior concentração de perlita, o que geralmente ocorre quando o teor de carbono do material aumenta.

Outra provável explicação para a adesão das partículas seria o fenômeno denominado fratura subsuperficial. Segundo Shaw (2005, p. 437), este tipo de fratura gera um padrão de rugosidade resultante do alcance da tensão máxima de cisalhamento, onde a superfície cortada alterna entre tons brilhantes e regiões cinzentas, que correspondem a superfícies maçantes ou não cortadas. Este padrão de superfície pode ser observado na Figura 9.



**Figura 8. a) Rugosidade R_a para usinagem convencional e usinagem LFV com $a_p=2$ mm;
b) Rugosidade R_a para usinagem convencional e usinagem LFV com $a_p=3$ mm.**

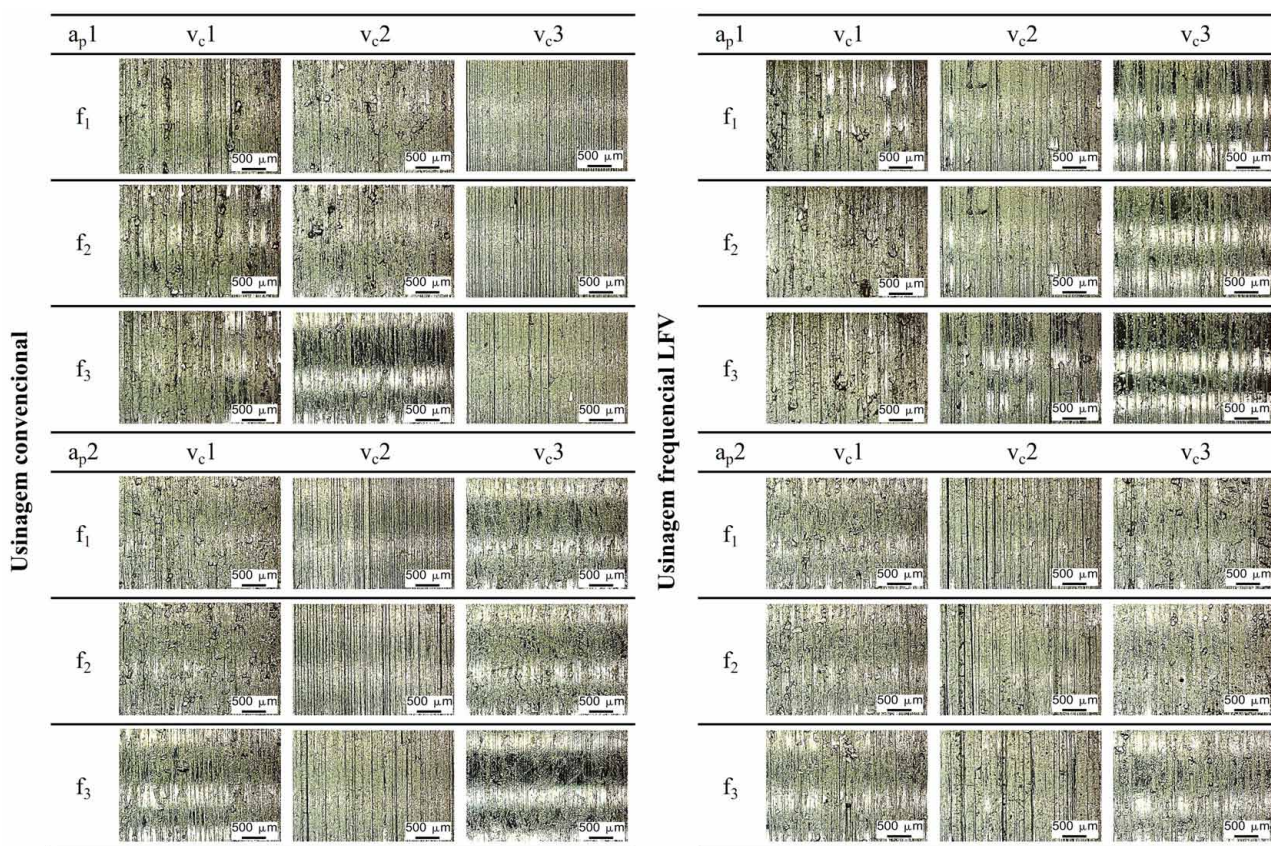


Figura 9. Rugosidade R_a para profundidade $a_{p1} = 2$ mm e $a_{p2} = 3$ mm na usinagem convencional e na usinagem LFV.

Para o intervalo de profundidades de usinagem estudadas neste trabalho, observou-se que não houve influência significativa das mesmas nos valores da rugosidade. Através de análise estatística, verificou-se que o maior avanço ($f_3 = 0,104$ mm/volta) foi aquele que mais influenciou na rugosidade, conforme mostrado nos gráficos da Figura 8 a) e da Figura 8 b), entretanto, os maiores valores de rugosidade foram encontrados quando empregou-se a usinagem pelo método LFV, para profundidade de corte ($a_{p2} = 3$ mm), conforme mostrado no gráfico da Figura 8 b). Na Figura 9 a) e na Figura 9 b) observa-se a variação gradual do estado de superfície à medida que o avanço aumentou. Comparando-se com a sequência para profundidade (a_{p2}) notou-se claramente que o corte frequencial produziu maior quantidade de sulcos na superfície dos corpos de prova, principalmente para velocidade ($v_{c2} = 73$ m/min.). O aumento da rugosidade utilizando-se corte frequencial pode ser explicado pelo avanço variável proporcionado pelo dispositivo de corte, que promoveu um acréscimo de comprimento (dL) da aresta principal de corte da ferramenta e, consequentemente, deslocamentos adicionais. Apesar das maiores rugosidades encontradas (o que de certa forma pode ser considerado como desvantagem do processo), a usinagem LFV mostrou-se um método alternativo e eficaz de fabricação. É preferível trabalhar-se com maiores velocidades de corte (o que permite vantagens no acabamento, obtendo-se

cisalhamento total dos cavacos), do que operar-se em condições geométricas desfavoráveis, conforme mostrado na Figura 10 quando utiliza-se a usinagem convencional.

Com relação à geometria final obtida entre os métodos de usinagem comparados, para o intervalo de velocidades de corte estudadas neste trabalho, observou-se que a utilização de ferramenta com quebra cavaco não foi capaz de realizar o cisalhamento do material na usinagem convencional. Entretanto, quando o método LFV foi utilizado, houve cisalhamento dos cavacos em todos os ensaios realizados. Numa análise crítica, pode-se atribuir o cisalhamento do material no corte LFV ao uso da ferramenta com quebra cavaco, porém, ensaios preliminares com ferramentas sem quebra cavaco (que não fazem parte deste escopo) mostraram que o cavaco manteve-se contínuo nas mesmas condições de ensaio para o corte convencional. Neste caso, o cavaco foi cisalhado pelo método LFV, mesmo sem a presença de quebra cavaco na ferramenta. Comparações entre as geometrias dos cavacos obtidos podem ser realizadas através da observação da Figura 10.

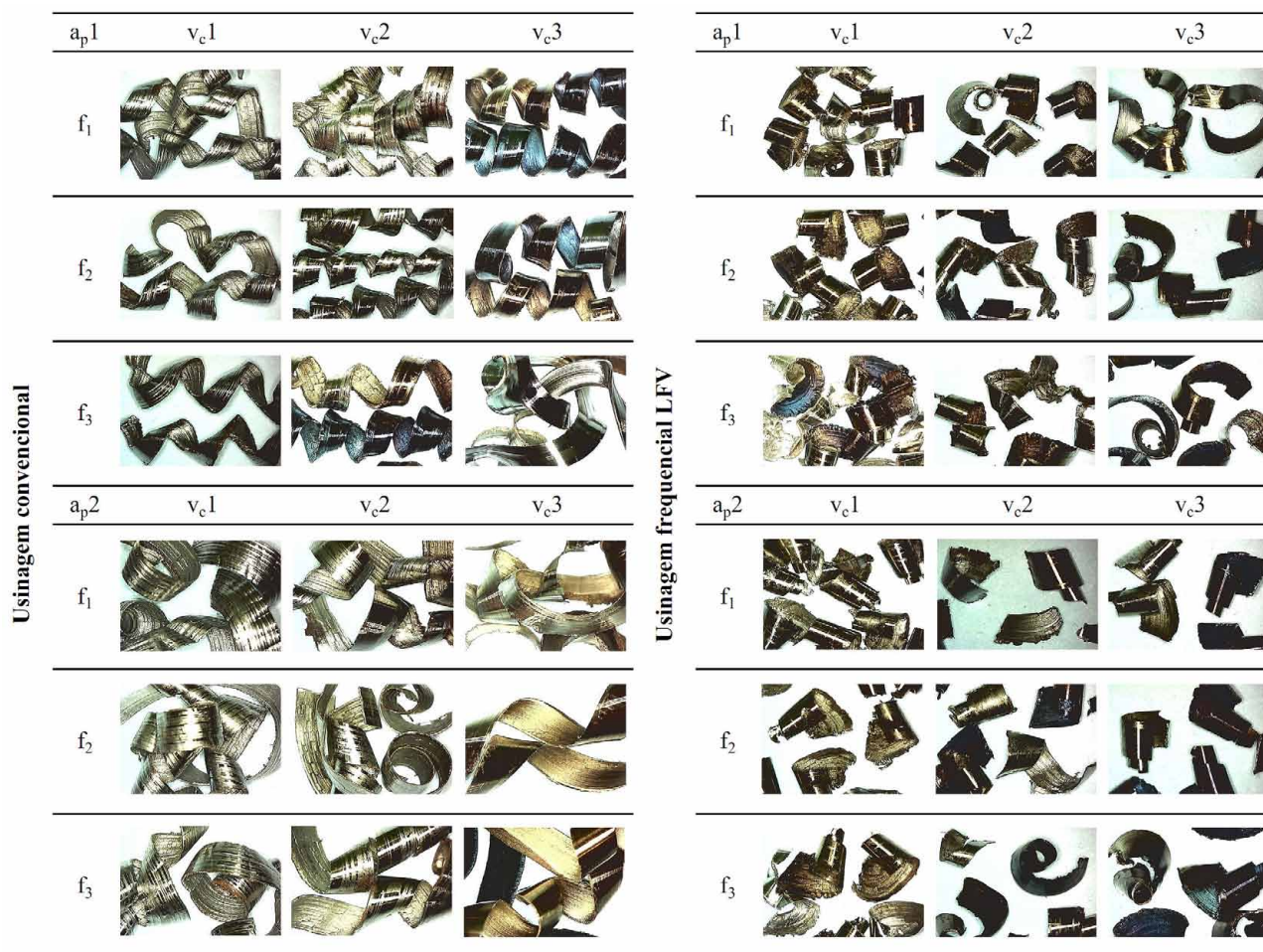


Figura 10. Geometria dos cavacos para usinagem convencional e usinagem LFV.

5. CONCLUSÕES

Da aplicação do torneamento LFV para otimização do cisalhamento de cavacos no aço ABNT-1020 pode-se concluir que:

- A usinagem LFV favoreceu a ocorrência de tensões localizadas gerando maiores taxas de deformação, o que promoveu a ocorrência de descontinuidades no material cortado;
- A usinagem LFV reduziu a ocorrência da aresta postiça de corte, inclusive quando realizou-se usinagem com baixa velocidade de corte;
- Nas condições dos ensaios realizados, a usinagem LFV permitiu o cisalhamento do cavaco proveniente de um material dúctil em todos os casos analisados;
- De maneira geral, o método de usinagem LFV gerou valores de rugosidade pouco maiores quando comparado ao método convencional, entretanto, a utilização de maiores velocidades de corte através do método LFV favoreceu o decréscimo da rugosidade.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET MG, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMINAS, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e da Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG.

7. REFERÊNCIAS

- BERMINGHAM, M.J. PALANISAMY, S. KENT, D. DARGUSCH, M.S. A Comparison of Cryogenic and High Pressure Emulsion Cooling Technologies on Tool Life and Chip Morphology in Ti-6Al-4V Cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012.
- BREHL, D.E. DOW, T.A. Review of Vibration-Assisted Machining. *Science Direct Precision Engineering*. United States, 2007.
- CHILDS, Thomas. MAEKAWA, Katsuhiro. OBIKAWA, Toshiyuki. YAMANE, Yasuo. *Metal Machining Theory and Applications*. 1th ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- DINIZ, Anselmo Eduardo. MARCONDES, Francisco Carlos. COPPINI, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.
- HABAK, Malek. LEBRUN, Jean Lou. An Experimental Study of the Effect of High-Pressure Water Jet Assisted Turning (HPWJAT) on the Surface Integrity. *International Journal of Machining Tools and Manufacture*. 2011.
- HONG, Qi. GU, Lizhi. XIANG, Chunjiang. Research Progress of Low-Frequency Vibration Cutting and Its Development Tendency. *Applied Mechanics and Materials*. China, 2010.
- KLOCKE, Fritz. *Manufacturing Processes 1 Cutting*. 1th ed. Germany: Springer Verlag, 2011.
- KRAMAR, Davorin. KOPAC, Janez. High Pressure in the Machining of Hard-to-Machine Materials. *Journal of Mechanical Engineering*. 2009.
- LAUWERS, B. Surface Integrity in Hybrid Machining Processes. *CIRP Conference on Surface Integrity SciVerse ScienceDirect*. 2011.
- MACHADO, Alisson Rocha. ABRÃO, Alexandre Mendes. COELHO, Reginaldo Teixeira. SILVA, Márcio Bacci. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.
- MANG, Theo. BOBZIN, Kirsten. BARTELS, Thorsten. *Industrial Tribology Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. 1 th ed. Germany: Wiley VCH Verlag & Co., 2011.
- MAUROTTO, Agostino. MUHAMMAD, Riaz. ROY, Anish. SILBERSCHMIDT, Vadim V. Enhanced Ultrasonically Assisted Turning of a β -Titanium Alloy. *Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University*. United Kingdom, 2013.
- MILLS, B. REDFORD, A.H. *Machinability of Engineering Materials*. 2 th ed. London: Springer Science Publishers, 2012.
- MITSUBISHI. Catálogo Geral Ferramentas de Torneamento, Ferramentas Rotativas e Soluções de Fixação. 2012.
- MMTS. McClain Machine Tool Solutions. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/results?search_query=What+is+CITIZEN-CINCOM+Low+Frequency+Vibration>. Acesso em 23 out. 2016.
- MUHAMMAD, Riaz. AHMED, Naseer. ROY, Anish. SILBERSCHMIDT. Numerical Modelling of Vibration- Assisted Turning of Ti-15333. 5o. *CIRP Conference on High Performance Cutting*. 2012.
- NATH, Chandra. RAHMAN, M. Effect of Machining Parameters in Ultrasonic Cutting. *Department of Mechanical Engineering National University of Singapore*. Singapore, 2008.
- SHARMA, Varun. PANDEY, Pulak M. Recent Advances in Ultrasonic Assisted Turning: a Step Towards Sustainability. *Production and Manufacturing Cogent Engineering*. 2016.
- SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2th ed. New York: Oxford University Press, 2005.
- STEPHENSON, David A. AGAPIOU, John S. *Metal Cutting Theory and Practice*. 3th ed. Florida: CRC Press, 2016.
- SUGIHARA, Tatsuya. ENOMOTO, Toshiyuki. Ultra-Low-Frequency Vibration Assisted Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *International Journal of Automation Technology*. 2016.
- TRENT, Edward. WRIGHT, Paul. *Metal Cutting*. 4th ed. Massachusetts: Butterworth Heinemann Publications, 2000.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

APPLICATION OF LFV TURNING FOR SHEAR CHIPS FROM STEEL ABNT-1020

Cláudio Parreira Lopes, claudio@div.cefetmg.br¹
José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br²

¹CEFET Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus V, Rua Álvares de Azevedo 400, Bela Vista, Divinópolis, MG, CEP 35503-822

²PUC Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30535-901

Abstract: Ductile materials are widely used in industries, however, during their use, they produce continuous chips. This chip shape is responsible for a number of operational drawbacks, such as surface scratching, operator safety, rupture of pressurized piping, damage to machine paint, damage to seals, and more. In spite of corrective actions for its control (addition of alloying elements to the material, alteration of cutting parameters, use of high pressure fluid, use of tools with chip breaking), still difficulties to predict, elaborate and standardize chips with an operational geometry Desired. This work aims to study an application of the LFV (low frequency vibration) method for the shear optimization of chips from a ductile material (ABNT-1020 steel). The test specimens were machined at three levels of cutting speeds (v_{c1} , v_{c2} and v_{c3}), three feed levels (f_1 , f_2 and f_3) and two depth depths (a_{p1} and a_{p2}), where a roughness A shear force (F_c), an advance force (F_f) and microhardness (HV) were measured and compared after conventional machining and frequency. By means of the micrographs analysis of the roots of the cut material, they were evaluated as established regions of flow, looking for the factors of flow of the chip of the chip. The results showed that, regardless of the cutting parameter used, LFV machining generated favorable conditions for chip formation, promoting its shear in all tests performed. The LFV method has also been shown to be effective in altering a microhardness of the material to be cut, capable of inserting punch regions of hardening. It was observed that there were no significant differences in the surface state between frequencies and conventional machining, and although the LFV method generated greater forces of advance, as vector components of the better force.

Key words: ductile material, turning, chip formation, low frequency vibration, frequency cut.