

Avaliação do consumo de energia elétrica e desgaste de ferramenta durante o processo de fresamento sobre diferentes trajetórias

RESUMO

Giovani Conrado Carlini

giovani.carlini@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Jaraguá do Sul, SC, Brasil

Cassiano Rodrigues Moura

cassiano.moura@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Jaraguá do Sul, SC, Brasil

Cristiano da Silva

cristiano.silva@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Jaraguá do Sul, SC, Brasil

Esta pesquisa busca realizar uma avaliação do consumo de energia elétrica e do desgaste da ferramenta durante o processo de fresamento, que se trata de um dos processos de fabricação mais utilizados ultimamente, este busca dar forma as peças e se utiliza de energia elétrica como fonte principal de trabalho. Foram realizados estudos do processo produtivo baseados na variação da trajetória de usinagem sobre o desgaste de flanco (VBmax) e consumo energético no processo de fresamento do aço AISI P20. Utilizou-se como ferramenta de corte uma fresa de topo inteiriça em metal duro com revestimento de AlCrN, com quatro arestas de corte, possuindo diâmetro de corte de 10mm e comprimento útil de corte de 22 mm. Os ensaios de fresamento foram realizados com parâmetros fixos de velocidade de avanço (V_f) de 2000 mm/min, profundidade de corte axial (a_p) de 3 mm, profundidade de corte radial (a_e) de 2 mm e velocidade de corte (v_c) de 200 m/min com movimento de corte concordante e lubrificação por solução miscível em água. As usinagens foram realizadas utilizando três tipos de trajetórias diferentes fornecidas pelo software *EdgeCAM*: *Spiral*, *Waveform* e *Laceform*. Para a coleta de consumo de energia elétrica utilizou-se um analisador de qualidade de energia, onde foram coletados dados de potência a cada 200 ms durante as usinagens. Os resultados mostraram que houve diferenças significativas nos tempos de usinagem total, o desgaste de flanco se diferenciou de forma moderada e linear entre as réplicas, contudo, a trajetória com melhor comportamento médio no desgaste foi a *Waveform*.

PALAVRAS-CHAVE: Processo de Fresamento. Trajetória de usinagem. Eficiência energética. Desgaste de flanco.

INTRODUÇÃO

Diante do avanço e da modernidade industrial, novas tecnologias, máquinas e ferramentas são desenvolvidas para melhorar de forma continuada a produção de peças e componentes para alimentação de diversos setores, o processo de usinagem por fresamento ocupa uma colocação muito importante no contexto atual. Sendo muito utilizado no ramo metal mecânico, pois, proporciona à peça formato, dimensões e acabamentos em superfícies de geometrias complexas. Geralmente, trabalhos efetuados por processo de fresamento são muito utilizados na indústria, principalmente, por encontrarmos uma gama muito grande e diferenciada de equipamentos, ferramentas de corte, materiais para fabricação de peças e sistemas de controle e comando, sendo assim, um processo de contínuo estudo e pesquisa internacional, nas diversas grandezas que este processo proporciona otimizações.

Dentre os processos de fabricação a usinagem é um dos mais utilizados, este processo confere forma específica às peças e se utiliza da energia mecânica como fonte principal de trabalho (PERES, UEMURA e ZANGHETTIN, 2017). Diversos trabalhos vêm estudando consumo energético nos processos de usinagem, especificamente em máquinas ferramenta e projetos de equipamentos (PERES, UEMURA e ZANGHETTIN, 2017; PELEGRINO, 2018; COSTA, RIALTO, GUSSOLI E GUIMARÃES, 2017; VIJAYARAGHAVAN e DORNFELD, 2010; WAIDE & BRUNNER, 2011; GUTOWSKI, DAHMUS & THIRIEZ, 2006).

Segundo Qjulian *et al.* (2013) os impactos ambientais das indústrias de usinagem são repensados por causa da crise energética e do aquecimento global sobre o mundo. Um exemplo típico é o setor de usinagem. Muito se revelou que as máquinas ferramenta foram amplamente utilizadas e consumindo muita energia. Também mostrou que a eficiência energética das máquinas era geralmente muito baixa, de modo que o estudo energético é significativo para o potencial de economia de energia. Conforme descrito por Pelegrino (2018) a busca por equipamentos de produção mais econômicos é uma tendência mundial. Esta tendência também se aplica as maquinas ferramenta, como tornos, retificas e fresadoras

De acordo com Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2019), a demanda de energia da indústria nacional cresceu, em média, 3,3% ao ano entre 1990 e 2012. A partir de 2013 com a crise nacional e internacional, houve um decréscimo neste histórico que apresentou aumento novamente a partir de 2015. De acordo com os dados de consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional), o consumo industrial em 1995 foi de 111.626 (GWh), aumentando para 169.549 (GWh) em 2018, o que representa um aumento expressivo na demanda de energia elétrica do setor industrial.

O contexto internacional, no âmbito da eficiência energética, que se trata de uma ferramenta para reduzir o impacto que os custos de energia têm sobre nossas atividades diárias preocupando-se com a demanda futura de energia da sociedade brasileira e mundial (MÉNDEZ, 2006). Recorrentemente este assunto tem sido apontado em diversos estudos, onde podem se destacar o *World Energy Outlook* e o *Energy Efficiency Market Report* (ambos produzidos pela Agência Internacional de Energia - IEA), com fatores de criticidade para a alimentação energética em 2030. Contudo, este estudo apresenta indicadores de consumo de energia com relação direta ao setor da fabricação mecânica por fresamento, o

apontamento dos fatores mais significativos neste processo em relação aos tempos de usinagem a variação das trajetórias de usinagem para a confecção de uma cavidade.

Durante o fresamento a ferramenta de corte é submetida a um esforço intenso devido ao corte do tipo interrompido, que causam fortes impactos. Esses esforços tendem a gerar desgastes e avarias de origem mecânica na fresa, que frequentemente causam problemas como lascamento, trincamento ou quebras (SANTOS & SALES, 2007).

Conforme descrito por Machado (2009) para melhorar o desempenho de uma fresa submetida ao processo de fresamento é importante conhecer e avaliar os mecanismos de desgastes e avarias que ocorrem durante o procedimento. Dessa forma, é possível selecionar uma classe de material adequada para reduzir o efeito desse desgaste ou avaria. Normalmente, para os problemas do tipo avarias como lascamento ou quebra podem ser selecionadas classes de materiais mais tenazes, bem como ferramentas com geometria positiva e adequação dos parâmetros de corte, como, por exemplo, a redução do avanço. Para problemas como desgaste excessivo, a solução pode ser aumentar a classe de dureza do material, avaliar outro tipo de revestimento ou alterar os parâmetros de corte (SANDVIK, 2005).

Diversos trabalhos têm sido realizados para avaliar o desgaste e avaria que ocorre durante o processo de fresamento considerando diferentes parâmetros de corte, tipos de ferramentas, bem como os materiais da fresa e da peça. Silva; Naves; Melo; Andrade & Guesser (2011) apresentaram um estudo sobre o desgaste de flanco em fresas de metal duro revestidas com Al_2O_3 durante a usinagem de diferentes classes de ferro fundido cinzento e vermicular. Moura; Resende; Silva; Machado & Sales (2015) avaliaram o desempenho de fresas de topo inteiriças de metal duro com diferentes revestimentos e parâmetros de corte na usinagem de aços P20. Outros trabalhos, nessa mesma linha de pesquisa, podem ser observados na literatura (JAWAID; SHARIF & KOKSAL, 2000; ZHANG, 2010; ANDRADE, PEREIRA, VIEIRA, 2016; MARQUES *et al.*, 2007; SILVA, COELHO & CATAI, 2004).

Outra possibilidade de melhorar o desempenho quanto ao desgaste é atuar na estratégia de entrada, de saída, bem como nas trajetórias da ferramenta durante o processo de fresamento. Dentro desse conceito foram realizados alguns trabalhos como Ibaraki, Yamaji & Matsubara (2010) que avaliaram o desgaste no fresamento considerando movimento da fresa do tipo trocoidal. Salehi *et al.*, (2016) compararam o desempenho das trajetórias epicicloidial e trocoidal quanto aos tempos de usinagem, a força de corte e a vibração na ferramenta. González & Ferreira (2015) criaram um sistema para geração de trajetórias trocoidais e espirais para o fresamento de cavidades 2,5d com múltiplas ferramentas e avaliaram o desgaste em um aço AISI P20. Pleta, Ulutam & Mears (2015) avaliaram dois tipos de trajetórias no fresamento de uma liga a base de níquel, sendo uma que utiliza movimentos do tipo trocoidal e outra trajetória denominada de movimento padrão, os resultados mostraram um melhor resultado quanto ao desgaste para o movimento do tipo trocoidal. Além dos critérios de desgaste da ferramenta, outro ponto verificado foi a eficiência energética nas diferentes trajetórias.

Uma quantidade substancial de pesquisas vem sendo realizados sobre condições e formas de reduzir o consumo nos processos de usinagem e temas relacionados a eficiência energética. Chen; Hinduja & Barrow (1989) e Hinduja & Sandiford (2004) criaram modelos e metodologias para seleção de condições de corte na usinagem, com base na minimização dos custos de processos de fresamento. Narita; Desmira & Fujimoto (2008) descreveram uma metodologia para reduzir o impacto ambiental de um processo de usinagem. Chapman (1974) sugeriu que a energia pode ser reduzida através do estudo de cada aspecto do processo de usinagem. Mantivenga & Rajemi (2011) afirmam que a otimização. Deve ser realizada para selecionar a combinação de profundidade de corte (ap e ae), alimentação (Vf) e velocidade de corte (vc) que minimiza o consumo de energia. Porém, nenhum destes temas abordou as trajetórias de usinagem como fonte de melhoria e eficiência energética.

Diante do exposto o presente trabalho apresenta uma avaliação do desgaste de flanco em fresas de topo de metal duro inteiriças e do consumo energético do processo considerando três diferentes estratégias de trajetória da ferramenta, geradas via software CAM, comparando com a eficiência energética em cada estratégia estipulada, aplicadas através de um processo de fresamento sobre um aço ferramenta AISI P20.

MATERIAIS E MÉTODO

MATERIAIS

O equipamento utilizado no ensaio de fresamento foi o centro de usinagem Romi D600 com fixação da peça por morsa hidráulica e a fresa de topo inteiriça com fixação por cone Hidráulico. Utilizou-se como ferramenta de corte uma fresa de topo inteiriça de metal duro com revestimento de AlCrN e quatro arestas de corte possuindo diâmetro de corte de 10mm, comprimento útil de corte de 22 mm e comprimento total de 74 mm.

O material utilizado nos ensaios foi o aço ferramenta do tipo P20 -1.2711. Esse material foi selecionado devido à sua elevada resistência e grande utilização em moldes de injeção de termoplásticos. A Tabela 1 mostra a composição química nominal do aço utilizado no estado beneficiado e com uma dureza de 32 HV.

Tabela 1 – Dimensões das páginas para todo o texto

Classe	C	Mn	Cr	Mo	Ni	P	Si
P20	0,5-0,6	0,5-0,8	0,6-0,8	0,25-0,35	1,5-1,8	0,07-0,12	0,15-0,35

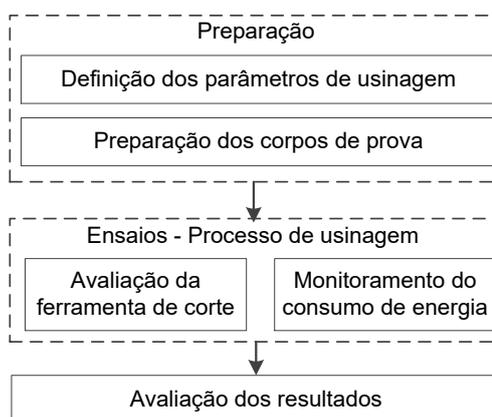
Fonte: Favorit (2019)

MÉTODOS

O fluxo metodológico utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa pode ser observado na Figura 1, que descreve as fases aplicadas, sendo: Preparação, Ensaio – Processo de usinagem e Avaliação dos resultados.

Na fase inicial foram definidos os parâmetros de usinagem utilizados, estes foram fixos em velocidade de avanço (v_f) de 2000 mm/min, profundidade de corte axial (a_p) de 3 mm, profundidade de corte radial (a_e) de 2mm, rotação da ferramenta de 6600 rpm e velocidade de corte (v_c) de 200 m/min com movimento de corte concordante e lubrificação por solução miscível em água.

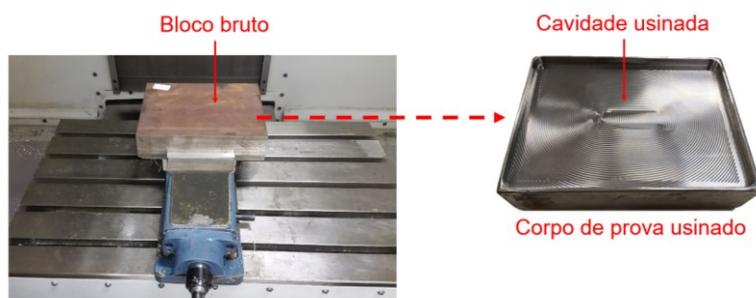
Figura 1 - Fluxo metodológico aplicado na pesquisa



Fonte: Autores (2019)

Os ensaios foram realizados em uma cavidade de geometria retangular com largura x comprimento x profundidade de respectivamente: 145 x 195 x 3mm, executados a partir de um bloco cúbico previamente usinado. O volume de material removido foi de aproximadamente 85 cm³ para cada ensaio, conforme pode-se observar na Figura 2, que mostra uns dos corpos de prova utilizado (bloco bruto) para os ensaios fixado na morsa do equipamento de fresagem e também o corpo de prova após o processo de usinagem. Foram realizadas 4 réplicas para cada condição de usinagem para fins estatísticos.

Figura 2 - Usinagem do Corpo de prova.

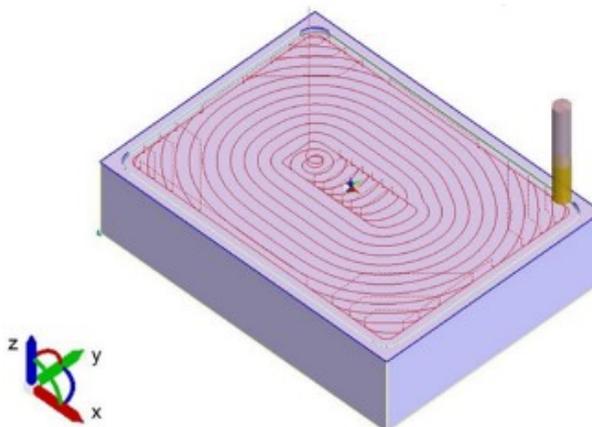


Fonte: Autores (2019)

Posteriormente para o desenvolvimento do trabalho foram executados ensaios de fresamento em cavidades geométricas retangulares para verificar o desgaste nas três diferentes estratégias de usinagem adotadas. Essas diferentes trajetórias para usinagem por desbaste foram elaboradas com o uso do software *EdgeCAM*, que são os tipos *Spiral*, *Waveform* e *Laceform*. Essas estratégias se diferenciam principalmente pelo método de entrada da ferramenta na peça, a quantidade de eixos movimentando-se simultaneamente e os tempos de usinagem.

A trajetória de usinagem do tipo *Waveform*, tem o objetivo de reduzir o desgaste. Ao manter a carga na ferramenta o mais constante possível com uma espessura de corte aproximadamente igual, principalmente na ocorrência de cantos vivos e geometrias curvas na peça. Esta trajetória utilizou, na peça usinada, uma combinação de movimentos do tipo toroidal no centro e nos cantos e uma espiral circular no restante da peça. A Figura 3 mostra a trajetória *Waveform* na cavidade ensaiada.

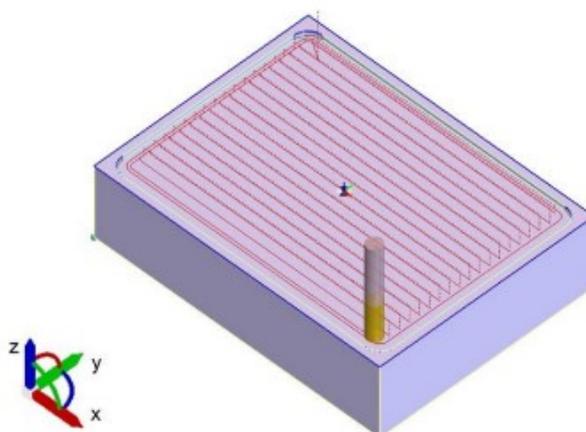
Figura 3 - Trajetória do tipo *Waveform*



Fonte: Autores (2019)

A trajetória do tipo *Laceform* utiliza uma série de percursos paralelos. A entrada ocorre em curva no eixo Z e o deslocamento linear em relação ao eixo X e Y. No modelo aplicado, o posicionamento do ponto de entrada localizou-se à esquerda da peça, deslocando no sentido do eixo X, retornando rapidamente ao ponto de entrada e iniciando um novo movimento com incremento (ae) no sentido y, conforme pode-se observar na Figura 4 que mostra a trajetória do tipo *Laceform* utilizada.

Figura 4 - Trajetória do tipo *Laceform*

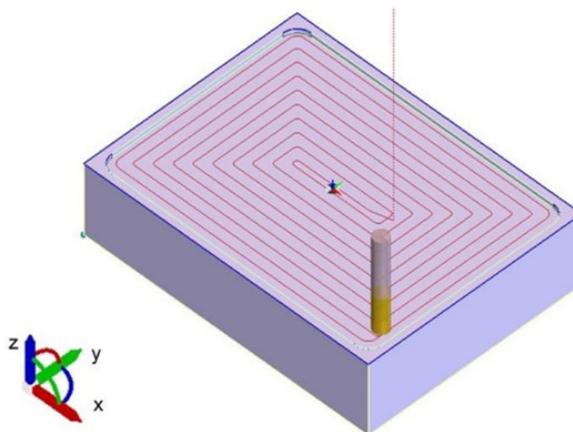


Fonte: Autores (2019)

A trajetória *Spiral* reproduz uma entrada em rampa com ângulo de 10° localizada no centro da usinagem seguida por uma interpolação linear em

formato de espiral. A mudança de sentido entre os eixos X e Y é suavizada com uma interpolação circular parcial. Nesse método não houve tempos secundários durante a formação de cavaco, mantendo a ferramenta em constante trabalho. A Figura 5 mostra a trajetória percorrida pela ferramenta na peça.

Figura 5 - Trajetória do tipo *Spiral*



Fonte: Autores (2019)

Na etapa final foi realizada a avaliação da ferramenta de corte (fresa) foi desenvolvida a partir da medição do máximo desgaste de flanco VB_{max} , pela diferença de altura do gume antes e depois da usinagem. Tal medida foi obtida por meio do Microscópio Estereoscópio marca *Mitutoyo*, modelo *Stemi 4000t*, juntamente a câmera de captura *Zeiss* e software *Axion vision 5.0*. Dessa forma, foi possível observar e medir com clareza e precisão essa diferença através da ampliação da imagem da ferramenta antes e depois da usinagem.

O equipamento utilizado para o monitoramento do consumo de energia foi o analisador de qualidade de energia *Fluke434 II* - Número de entradas 4 (3 fases + neutro) CC pareada. Voltagem máxima de entrada 1000 Vrms. Limite de voltagem nominal selecionável: 1 V a 1000 V de acordo com IEC61000-4-30 (2011). A frequência de coleta da amostragem foi de 0,2 Hz em cada canal simultaneamente. Amostragem RMS 5000 amostras em 10/12 ciclos em conformidade com IEC 61000-4-30 (2011). Sincronização PLL 4096 amostras em 10/12 ciclos em conformidade com IEC 61000-4-7 (2009).

O software *Power Log* foi utilizado para carregar dados de tendência e forma de onda e capturas de tela no formato com comunicação para microcomputador. A montagem é realizada no painel com leituras de tensão e corrente simultâneas, todos os dados são importados para o software que realiza a contagem dos dados coletados. Os dados do consumo de energia são evidenciados através da medição de potência do equipamento ao desenvolver cada trajetória. Utilizou-se também um alicate amperímetro para realizar um controle visual secundário em uma das fases elétricas durante os ensaios, conforme mostra a Figura 6, onde pode-se observar a ligação dos equipamentos de medição para monitoramento do consumo de energia.

Figura 6 - Monitoramento do consumo de energia



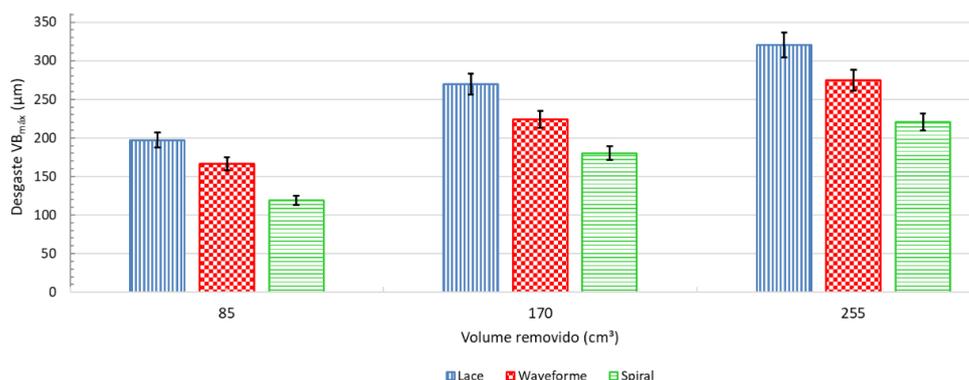
Fonte: Autores (2019)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados foi possível avaliar os desgastes que ocorreram nas três diferentes estratégias de usinagem. Os resultados dos ensaios mostram a predominância de desgaste com alguns casos de lasca-mento da aresta de corte da fresa.

A Figura 7 apresenta o desgaste máximo de flanco VB para a estratégia de usinagem do tipo *laceform*, *Waveform* e *Spiral*, para um volume removido de material de 85 cm³, 170 cm³ e 255 cm³ respectivamente. É possível verificar que o maior desgaste ocorre na estratégia do tipo *Laceform*, o menor na estratégia tipo *Spiral*, sendo que a do tipo *Waveform* apresentou valores intermediários de desgaste.

Figura 7 - Desgaste de flanco para três estratégias de usinagem



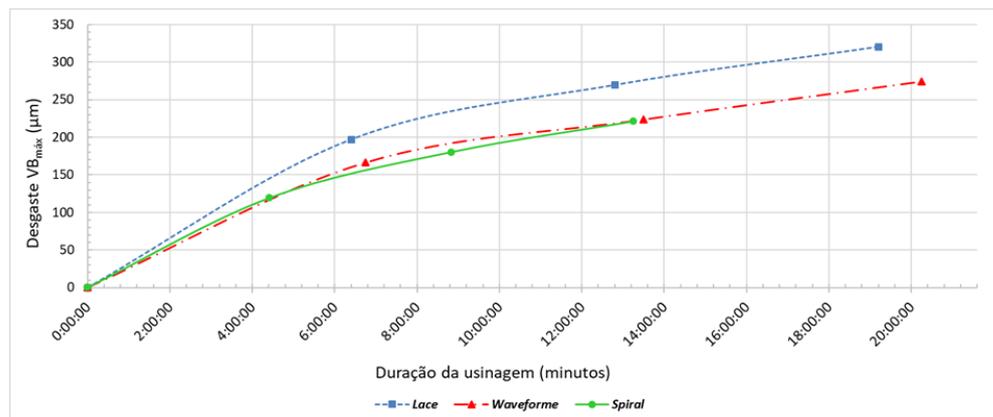
Fonte: Autores (2019)

A Figura 8 mostra a evolução do desgaste de flanco máximo VB para as três diferentes estratégias de usinagem avaliadas. É possível verificar que a curva de desgaste da estratégia tipo *Laceform* apresenta valores maiores do que as demais, devido principalmente ao maior número de entradas e saídas da ferramenta ao longo do processo. As curvas de desgaste das estratégias *Waveform* e *Spiral* podem ser consideradas semelhantes. Entretanto, a estratégia *Waveform* demandou um tempo maior para a usinagem da peça, devido à série de movimentos realizados. Por esse motivo a trajetória do tipo *Spiral* apresentou

melhores resultados para o ensaio realizado. Outro aspecto interessante a observar nas curvas da Figura 8 são as duas regiões existentes.

Na região inicial, denominada de região primária, ocorreu um desgaste mais intenso nas três estratégias avaliadas. Essa região se estendeu até um tempo de aproximadamente 6 minutos. Na região secundária, que ocorreu a partir de 6 minutos, a evolução do desgaste foi menos acentuada, entretanto, a curva do tipo *Spiral* apresentou uma inclinação maior do que a *Waveform*.

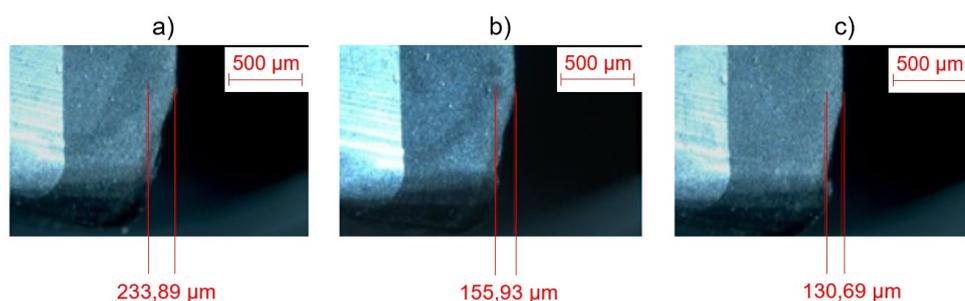
Figura 8 - Evolução do desgaste VB para cada trajetória



Fonte: Autores (2019)

A Figura 9 mostra o desgaste máximo de flanco na aresta de corte da fresa de topo de metal duro ao aplicar a estratégia *Laceform*. Na Figura 9(a) pode-se observar o desgaste para um volume de material removido de 85 cm³, na Figura 9(b) tem-se o desgaste para um volume de material removido de 170 cm³, e na Figura 9(c) o desgaste para um volume de material removido de 255 cm³.

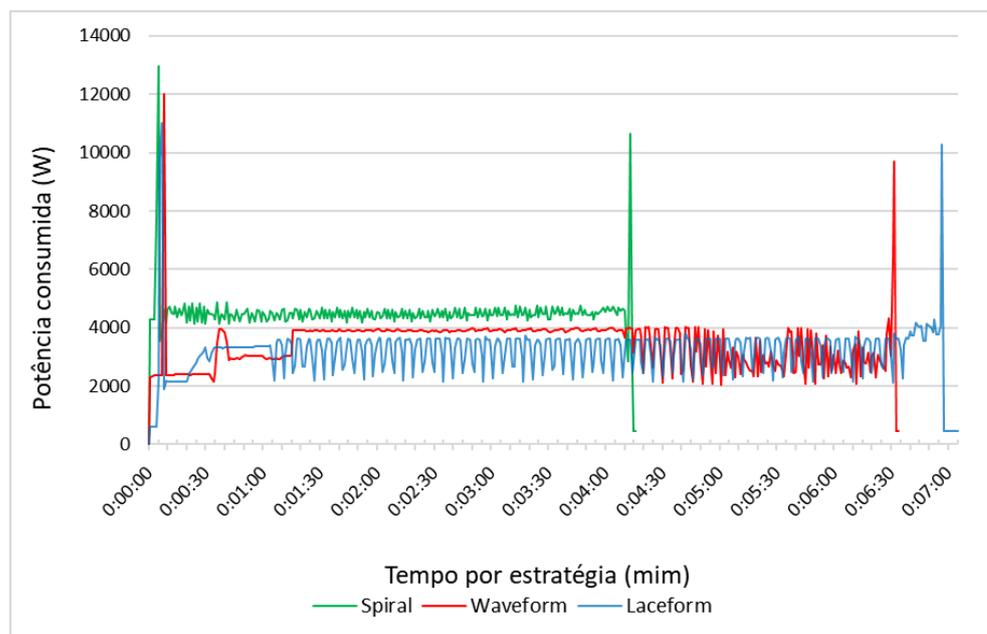
Figura 9 - Desgaste de flanco máximo VB: (a) volume de material removido de 85 cm³, (b) volume de material removido de 170 cm³, (c) volume de material removido de 250 cm³



Fonte: Autores (2019)

A Figura 10 representa o consumo de energia durante o processo de um passe na cavidade para cada trajetória, é possível observar oscilações cíclicas, devido ao comportamento da movimentação máquina x ferramenta gerada através dos elementos finitos no *software* CAM. Pode-se observar que a média de potência consumida (Wh) é maior para a condição *Spiral*.

Figura 10 - Coletas sobrepostas da potência consumida



Fonte: Autores (2019)

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos através da coleta de dados do analisador de qualidade de energia, tabulados através das médias dos consumos de potência das usinagens para cada trajetória em relação ao tempo de duração da mesma. Apesar da trajetória *Spiral* apresentar o maior consumo médio de energia ela possui o menor tempo de usinagem, bem como o menor valor médio de desgaste final. A trajetória *Laceform* apresenta o menor consumo médio de energia, porém apresenta o maior desgaste médio final. Já a trajetória *Waveform* apresentou resultados intermediários em termos de consumo e desgaste, porém com relação ao tempo de usinagem seus resultados foram similares ao da trajetória *Laceform*.

Tabela 2 - Resultados das análises

Trajetoária	Consumo médio (W)	Tempo usinagem (s)	Desgaste médio final (μm)
<i>Spiral</i>	4469,60	771	220,94
<i>Waveform</i>	3422,64	1185	274,53
<i>Laceform</i>	3168,73	1260	320,40

Fonte: Autores (2019)

CONCLUSÕES

Os ensaios realizados mostraram que a trajetória de desgaste é um fator que afeta fortemente o processo de fresamento, por permitir uma redução do tempo de usinagem e um melhor controle dos esforços de corte. A melhor estratégia de desbaste depende de uma série de fatores, como a geometria da peça e da ferramenta. Por esse motivo é importante que os estudos visando a otimização

do fresamento considere, além dos parâmetros de corte e materiais das ferramentas, uma avaliação criteriosa das estratégias de desbaste e um meio sustentável para uma produção com menor impacto ambiental.

Observando a inclinação das linhas na Figura 8, com um tempo maior de usinagem a estratégia *Waveform* possuiu uma tendência menor de desgaste, porém, através da medição do consumo durante esta estratégia, foi a que necessitou de maior energia para a produção da mesma geometria de usinagem.

O tempo de usinagem se diferenciou significativamente em relação as trajetórias, a estratégia *Spiral* obteve um tempo aproximado 50% menor em relação as demais, sua eficiência energética ficou com aproximadamente 31% menor que as estratégias testadas. Isto ocorre porque a estratégia *Spiral* mantém durante toda a usinagem o eixo z estacionado na mesma posição e alternando os movimentos ente os eixos X e Y, de maneira que apenas 1 eixo movimenta por vez, exceção se faz no momento da troca de trajetória, onde acontece pequena interpolação circular.

Com isso pode-se concluir, mediante ao contexto utilizado para realização do estudo, em função dos resultados obtidos, que:

- a estratégia de usinagem com melhor tempo e menor consumo de kWh é a estratégia em que a ferramenta possui pouco tempo secundário de usinagem;
- o menor consumo de energia se dá na estratégia em que o movimento de avanço na usinagem é dado, preferencialmente em eixo único;
- apesar de aparentemente o gráfico da Figura 5 apresentar a estratégia *Laceform* como maior consumo em geral, podemos observar que a sua variação é cíclica na grande parte do tempo, fazendo o consumo médio ser relativamente menor que a estratégia *Waveform*;
- a trajetória *Waveform* possui um tempo menor de usinagem do que a *Laceform*, sendo, o tempo um fator muito significativo para uma empresa competitiva, qualquer processo de otimização tem foco em diminuição de tempo na usinagem;
- a determinação da estratégia de usinagem, mesmo elaborada matematicamente e geralmente por um software CAM, é programada por um profissional, este deve estar atento aos modelos ensaiados universalmente. A escolha mais significativa em qualquer processo é a somatória dos conhecimentos adquiridos, estudados e praticados continuamente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina.

Evaluation of power consumption and tool wear during the milling process over different paths

ABSTRACT

The international context, in the field of energy efficiency, has been strongly concerned with the future energy demand of Brazilian and world society. Given this, this research seeks to perform an assessment of power consumption and tool wear during the milling process, which is one of the most used manufacturing processes lately, this seeks to shape the parts and uses electrical energy as main source of work. Studies based on the variation of the machining path on the flank wear (VB_{max}) and energy consumption in the milling process of AISI P20 steel were performed. An AlCrN-coated solid carbide endmill with four cutting edges having a cutting diameter of 10mm and a useful cutting length of 22mm was used as a cutting tool. Milling tests were performed with fixed feedrate (V_f) parameters of 2000 mm / min, axial depth of cut (a_p) of 3 mm, radial depth of cut (a_e) of 2 mm and cutting speed (v_c). 200 m / min with matching cutting motion and water miscible solution lubrication. Machining was performed using three different trajectory types provided by EdgeCAM software: Spiral, Wave-form and Laceform. For the collection of electricity consumption, an energy quality analyzer was used, where power data were collected every 200 ms during machining. The results showed that there were significant differences in the total machining times, the flank wear differed moderately and linearly between the replicas, however, the path with the best average wear behavior was Waveform.

KEYWORDS: Milling Process. Machining path. Energy efficiency. Flank wear

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. N.; PEREIRA, T. B.; VIEIRA, de S. M. Análise da influência da velocidade de avanço no desgaste da aresta de uma ferramenta de corte. **Univap**, v. 22, n. 40, 2016. doi: 10.18066/revistaunivap.v22i40.1294. **crossref**

CHAPMAN, P. F. Energy costs: A review of methods. **Energy policy**, v.2, n. 2, p. 91–103, 1974. **crossref**

CHEN S. J.; HINDUJA, S.; BARROW, G. Automatic tool selection for rough turning operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 29, n. 4, p.535–553, 1989. **crossref**

COSTA, D. D. da; RIALTO, A. C.; GUSSOLI, M. K.; GUIMARÃES, W. M. **Análise das perdas de energia no processo de torneamento convencional**. In anais, 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, COBEF. 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2019). **Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)**, <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>, acessado em julho de 2019.

FAVORIT **Aços especiais**, http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos_ferramentas_0.html. Acessado em julho de 2019.

GONZÁLEZ, D.; FERREIRA, M. O. **Geração de trajetórias trocoidais e espirais para o fresamento de cavidades 2,5d com múltiplas ferramentas**. In: 8º COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, Brasil. 2015.

GUTOWSKI, T.; DAHMUS, J.; THIRIEZ, A. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. **Proc. 13th CIRP Intl. Conf. on Life Cycle Engineering**. p. 623-627, 2006.

HINDUJA, S.; SANDIFORD, D. **An optimum two-tool solution for milling 21/D features from technologi-cal and geometric viewpoint**. In: Annals of the CIRP, v. 53, n. 1, p.77–80, 2004. **crossref**

IBARAKI, S.; YAMAJI, I.; MATSUBARA, A. On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving. **Journal Precision Engineering**, v. 34, n. 3, p. 467-473, 2010. **crossref**

International Electrotechnical Commission, **IEC 61000 4-7** Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for supply systems and equipment connected thereto. Edição 08, 2009.

International Electrotechnical Commission, **IEC 61000-4-30** Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, Edição 2.0, 2011.

JAWAID, A.; SHARIF, S.; KOKSAL, S. Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 99, p. 266- 274, 2000. **crossref**

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. ed. Blucher, São Paulo, Brasil, 371p. 2009.

MARQUES, D. C.; DECARLI, C. C. M.; BUBANI, F.; BARBOSA, C. A.; MEI, P. R.; DINIZ, A. E. Efeitos da adição de níquel em ligas ferro-cromo. Parte II: tempo de vida da ferramenta em processo de torneamento. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p. 71-74, Mar. 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672007000100011>. **crossref**

MATIVENGA, P. T.; RAJEMI, M. F. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, Elsevier, p. 149–152. 2011. **crossref**

MÉNDEZ, P. Vulnerabilidad y equidad: energética. **Estudio**, v. 8 n. 11, pp. 40–46. 2006.

MOURA, R. R.; RESENDE, A. A.; SILVA, M. B.; MACHADO, A. R.; SALES, W. F. **Desempenho de fresas de metal duro reafiadas no fresamento de topo de um aço P20 para moldes e matrizes**. In: CO-BEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Salvador, Brasil. 2015.

NARITA, H.; DESMIRA, N.; FUJIMOTO, H. **Environmental burden analysis for machining operation using LCA method**. Manufacturing systems and technologies for the new frontier, p. 65–68, 2008. **crossref**

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas ferramentas**. Dissertação de Mestrado. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2018.

PERES, F. B.; UEMURA, L. C.; ZANGHETTIN, L. **Energia mecânica com ênfase em processos de usinagem – torneamento**. REGRAD, UNIVEM/Marília-SP, v. 10, n. 1, p 325 – 338, 2017.

PLETA, A.; ULUTAN, D.; MEARS, L. An investigation of alternative path planning strategies for machining of nickel based super alloys. **Procedia manufacturing**, v. 1, p. 556-566, 2015. **crossref**

QIULIAN, W.; FEI, L.; CONGBO, L. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 122 – 133, 2013. **crossref**

SALEHI, M.; BLUM, M.; FATH, B.; AKYOL, T.; HAAS, R.; OVTCHAROVA, J. Epicycloidal versus trochoidal milling- comparison of cutting force, tool tip vibration, and machining cycle time. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 230 – 233, 2016. **crossref**

SANDVIK. **Manual técnico de usinagem – torneamento, fresamento, furação, mandrilamento e sistemas de fixação**. São Paulo. 601p. 2005.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 246p. 2007.

SILVA, L. R. da; COELHO, R. T.; CATAI, R. E. Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga "waspaloy". **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 2, p. 109-114, 2004. doi: 10.1590/S0370-44672004000200007. **crossref**

SILVA, M. B.; NAVES, V. T. G.; MELO, J. D. B., ANDRADE, C. L. F., GUESSER, W. L. Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron. **Wear**, v. 271, p. 2426-2432, 2011. **crossref**

VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Automated energy monitoring of machine tools. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 59, n. 1, p. 21-24. 2010. **crossref**

ZHANG, S.; LI, J. Tool wear criterion, tool life, and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy. **Applied Physics & Engineering**, v. 11, n.8, p. 587-595, 2010. **crossref**

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. **International Energy Agency**, Tech. Rep. 2011.

Recebido: 03 Set. 2019

Aprovado: 12 Out. 2020

DOI: 10.3895/gi.v16n4.10653

Como citar:

CARLINI, G.C. et al. Avaliação do consumo de energia elétrica e desgaste de ferramenta durante o processo de fresamento sobre diferentes trajetórias. **R. Gest. Industr.**, Ponta Grossa, v. 16, n. 4, p. 76-91, Out./Dez. 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi>

Correspondência:

Cassiano Rodrigues Moura

Rua dos Imigrantes, 445, Bairro Rau, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

