

AValiação DO CONSUMO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE CAVIDADES 2½D PARA DIFERENTES TIPOS DE TRAJETÓRIAS

Juliana dos Santos Solheid¹, ju.solheid@gmail.com
João Carlos Espindola Ferreira¹, j.c.ferreira@ufsc.br
David Manuel Ochoa González¹, ochoadavid@gmail.com

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 88040-900, Brasil

Resumo: O aumento da população e a crescente escassez dos recursos naturais vêm aumentando a intensidade dos impactos ambientais. Estes fatores têm gerado um aumento na consciência social, forçando os órgãos reguladores a encorajar a diminuição do consumo de energia, cuja geração está ligada a diversas questões ambientais. O processo de usinagem é responsável por grande carga ambiental, e uma forma de torná-lo mais sustentável é mediante a redução do consumo de energia, que pode ser obtida reduzindo-se o caminho percorrido pela ferramenta de corte. Este artigo fornece uma avaliação do consumo de energia durante o processo de fresamento de cavidades 2,5 D, com duas ferramentas distintas, para diferentes trajetórias. A geração das trajetórias foi realizada utilizando-se um software CAM (Manufatura Assistida por Computador) e três tipos de trajetórias foram geradas para comparação, sendo elas: paralela ao contorno, ziguezague e uma combinação de trajetória trocoidal e paralela ao contorno. A aquisição de dados foi realizada por meio de um transdutor de grandezas elétricas, obtendo-se valores de consumo total de energia elétrica da máquina-ferramenta e demanda de potência do fuso principal. Foram realizados ensaios em blocos de aço AISI P20, após a geração e simulação dos códigos G para as trajetórias propostas, utilizando-se ar comprimido como fluido de corte. Foram feitas comparações entre as trajetórias em termos de consumo de energia ativa total da máquina-ferramenta e durante os movimentos de corte, tempos de usinagem e demanda de potência.

Palavras-chave: Fresamento de Cavidades, Consumo de Energia, Manufatura Sustentável, Geração de Trajetórias de Usinagem

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população vem aumentando a intensidade dos impactos ambientais. Estes fatores, juntamente com a crescente escassez dos recursos naturais, têm gerado um aumento na consciência social, forçando os órgãos reguladores a encorajar a diminuição do consumo de energia, cuja geração está intimamente ligada a diversas questões ambientais. Para Newman et al. (2012), este encorajamento se tornou um incentivo às pesquisas por métodos para a redução do consumo de energia, especialmente nos setores em que os maiores consumos são observados.

Yan e Li (2013) atribuem a priorização da economia de energia no setor da manufatura ao aumento na sua demanda e às restrições nas emissões de carbono firmadas em acordos. Para Peng e Xu (2014) o setor da manufatura é a espinha dorsal de qualquer país desenvolvido, e enfrenta o desafio de se adaptar às questões ambientais. Muitas destas questões já são preocupações de empresas instaladas em países em desenvolvimento.

De acordo com Yan e Li (2013), os processos de usinagem são responsáveis por grande carga ambiental. Sabe-se que os processos de usinagem possuem parâmetros que podem ser otimizados, como o tempo total de usinagem, a taxa de remoção de material, a vida da ferramenta, o consumo de energia, entre outros. Uma solução que pode tornar os processos de usinagem mais sustentáveis em relação ao consumo de energia é a alteração do caminho percorrido pela ferramenta de corte, que é o foco deste trabalho.

Dentre os processos de usinagem está o fresamento, que é muito utilizado na fabricação de peças com geometrias complexas como, por exemplo, cavidades para moldes, devido à sua versatilidade. A trajetória da ferramenta durante o processo de fresamento é um fator de extrema importância, pois está diretamente relacionada com a qualidade do produto e com a duração do processo. As trajetórias mais utilizadas são a ziguezague e a paralela ao contorno, porém existem outras trajetórias conhecidas, como as trocoidais, helicoidais e espirais, podendo ainda haver combinações de diferentes trajetórias.

Neste contexto, este trabalho propõe comparar o consumo de energia de três trajetórias distintas no fresamento de cavidades 2½D e avaliar sua relação com os tempos de processo e com o comprimento do caminho percorrido pelas ferramentas.

2. GERAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS

A cavidade adotada para a presente pesquisa possui duas protuberâncias (ilhas) hexagonais conforme ilustrado na Fig. (1). Para que o tempo de usinagem no desbaste seja o menor possível é necessário que o volume de material

removido seja maximizado (Ferreira e Ochoa, 2013). Neste estudo foram utilizadas duas ferramentas de corte para o desbaste da cavidade, com os seguintes valores de diâmetro: 40mm e 20 mm.

A maior área que a fresa de 40 mm pode remover é a região A da Fig (1), e esta área foi obtida gerando-se uma trajetória paralela ao contorno da cavidade. A trajetória teve início no ponto médio do eixo y e seguiu o contorno da cavidade até as regiões onde sua penetração foi limitada por questões dimensionais. Pode-se observar que o deslocamento da ferramenta foi impedido pelas ilhas nas regiões que apresentaram a maior quantidade de material restante, enquanto nos cantos o alcance da ferramenta foi limitado pelo raio de concordância menor do que o raio da ferramenta. Ao se deparar com estas limitações de movimento, a ferramenta contornou as ilhas para continuar a remover o material da peça.

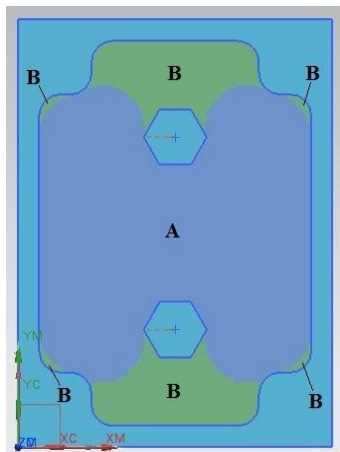


Figura 1. Região A usinada pela ferramenta de 40 mm, e região B usinada pela ferramenta de 20 mm

O material restante da cavidade, representado pela região B da Fig. (1), é removido pela ferramenta com diâmetro de 20 mm, que não tem limitações de deslocamento nesta cavidade. A entrada da ferramenta de 20 mm em cada região usinada foi em mergulho, em partes em que o material já havia sido removido pela ferramenta anterior.

2.1. Trajetória Ziguezague

Ao realizar este tipo de trajetória a ferramenta segue um caminho em linhas paralelas a uma direção arbitrária. O movimento de corte pode ser realizado sempre no mesmo sentido ou em ziguezague.

Chan e Choy (2002) ressaltam que, para a trajetória ziguezague, o método de remoção de cavaco é alternado entre concordante e discordante conforme o sentido da ferramenta, o que pode causar maior desgaste da ferramenta. Por outro lado, González (2013) considera como vantagens deste tipo de trajetória o fato da profundidade radial de corte ser mantida constante em quase todo o processo, e sua programação ser relativamente fácil.

A Fig. (2a) ilustra a trajetória ziguezague gerada para a ferramenta de 40 mm, com entrada em rampa e deslocamento paralelo ao eixo x. Para que o sentido do movimento fosse mantido, a ferramenta teve que efetuar duas novas entradas em rampa na peça após o início da usinagem. O caminho paralelo ao contorno foi gerado para garantir que a área mínima a ser usinada pela ferramenta fosse respeitada.

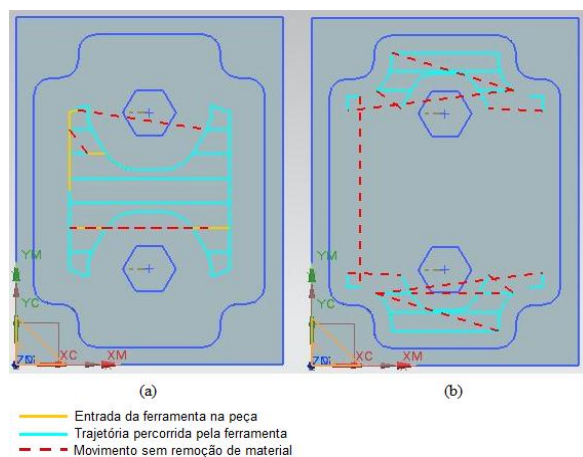


Figura 2. Trajetória ziguezague: (a) percorrida pela fresa de 40 mm e (b) percorrida pela fresa de 20 mm

Para a ferramenta de 20 mm, a entrada na peça teve início no canto inferior direito. Em seguida as demais regiões são usinadas, conforme a Fig. (2b). O mesmo ocorre para as demais trajetórias.

Nas imagens pode-se observar que são realizados vários movimentos sem remoção de material, representados pelas linhas vermelhas tracejadas. Isso acontece porque a ferramenta deve manter o sentido do seu movimento conforme o estabelecido, neste caso paralelo ao eixo x , e a ferramenta deve ser deslocada para todas as regiões onde o corte neste sentido é possível.

2.2. Trajetória Paralela ao Contorno

As trajetórias paralelas ao contorno são obtidas pela realização sucessiva de *offsets* do contorno da cavidade (Lin et al., 2015). Chan e Choy (2002) ressaltam que neste tipo de trajetória a ferramenta fica em contato com o material da peça durante quase todo o processo, diminuindo o tempo de reposicionamento da ferramenta e, conseqüentemente, o tempo de ciclo. Além disto, o movimento da fresa é concordante ou discordante durante todo o tempo, não havendo alternâncias.

Uma desvantagem apresentada por Lin et al. (2015) é a programação mais difícil deste tipo de trajetória em relação às trajetórias paralelas a uma direção. Gonzalez (2013) também cita como desvantagem a mudança de direção com curvas pequenas na usinagem de materiais de alta dureza.

A trajetória paralela ao contorno percorrida pela ferramenta de 40 mm pode ser observada na Fig. (3a). A entrada da ferramenta na peça foi em rampa, já acompanhando o contorno da cavidade, e teve início no ponto médio do eixo y .

A trajetória paralela ao contorno trilhada pela ferramenta de 20 mm é apresentada na Fig. (3b), pela linha azul. Os caminhos percorridos pelas ferramentas nesta trajetória são relativamente curtos e são feitos poucos reposicionamentos, e as ferramentas permanecem em contato com o material durante todo o movimento de corte.

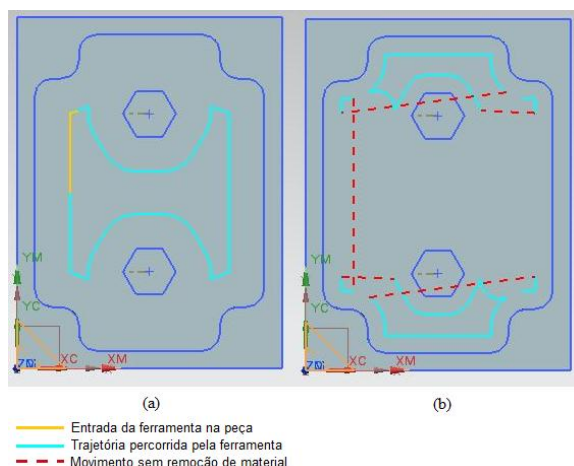


Figura 3. Trajetória paralela ao contorno percorrida: (a) pela fresa de 40 mm e (b) pela fresa de 20 mm

2.3. Trajetória Trocoidal

A trajetória trocoidal é definida como a combinação de um movimento circular uniforme com um movimento linear uniforme (Rauch et al., 2009). De acordo com Rauch, Duc e Hascoet (2009), o principal propósito das trajetórias trocoidais é manter o movimento de corte constante e evitar que a ferramenta seja completamente imersa no material, e é uma boa alternativa em caso de desgaste de materiais de alta dureza. As condições de fresamento com estas trajetórias são favoráveis em termos de cargas na ferramenta. Além disto, González (2013) afirma que esta trajetória permite trocas suaves de direção da ferramenta, o que minimiza problemas decorrentes destas mudanças.

Apesar das vantagens deste tipo de trajetória em relação ao desgaste da ferramenta, o caminho percorrido ao longo do processo tende a ser maior do que outras trajetórias, assim como o tempo de usinagem (Ferreira e Ochoa, 2013). Por esse motivo, Ibaraki et al. (2010) propõem utilizar trajetórias trocoidais apenas para remover regiões críticas. Outra questão importante é a programação destas trajetórias, que é mais complexa do que a programação das trajetórias citadas nas seções anteriores.

A trajetória trocoidal efetuada pela ferramenta de 40 mm teve início no ponto médio do eixo y da cavidade realizando uma entrada em hélice com um raio de 20 mm, conforme a Fig. (4a). Posteriormente, a ferramenta segue realizando movimentos circulares acompanhando o contorno da cavidade. Percebe-se assim que esta estratégia corresponde a uma combinação das trajetórias trocoidal e paralela ao contorno.

Para possibilitar a remoção de toda a área previamente estabelecida para a ferramenta de 40 mm, os raios das trocoides variaram, obtendo-se raios muito pequenos nas regiões onde o alcance da ferramenta torna-se limitado. Nas

regiões de livre movimentação da ferramenta, o diâmetro das trocoides é mantido igual a 8 mm por ser uma dimensão com a qual a ferramenta consegue seguir uma trajetória paralela ao contorno da cavidade combinada com movimentos trocoidais.

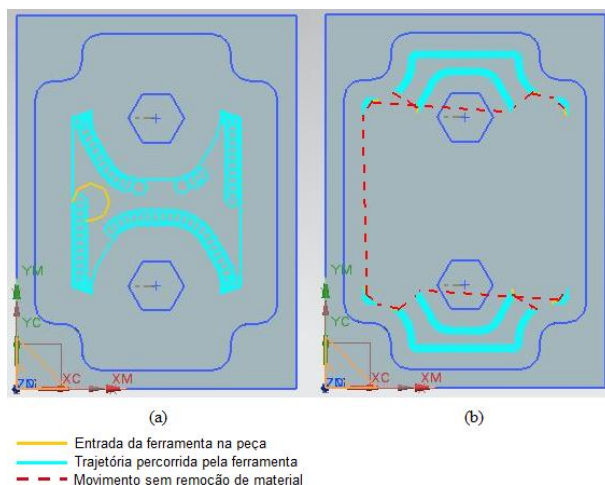


Figura 4. Trajetória trocoidal percorrida pela: (a) fresa de 40 mm e (b) fresa de 20 mm

A trajetória trocoidal percorrida pela ferramenta de 20 mm de diâmetro é mostrada na Fig. (4b). Nesta trajetória a ferramenta percorre segmentos paralelos ao contorno da cavidade sempre realizando movimentos circulares. Neste caso, o diâmetro das trocoides é mantido em 2,8 mm, sendo muito pequeno para permitir que o material dos cantos seja removido com movimentos circulares. Na Fig. (5) é apresentada uma ampliação da trajetória trocoidal na região superior da cavidade para melhor visualização das suas dimensões.

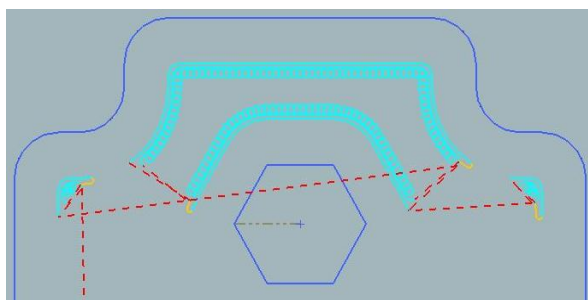


Figura 5. Ampliação da trajetória trocoidal para a ferramenta de 20 mm na usinagem de uma parte da cavidade

2.4. Simulação das Trajetórias

O passo seguinte à geração das trajetórias consiste em gerar os programas em código G (ISO 6983-1, 1982) e, posteriormente, os códigos gerados são simulados. O intuito destas simulações é garantir que não haja erros de programação que possam causar colisões entre ferramenta, peça ou elementos da máquina. Além disto, os tempos de usinagem e o comprimento de cada trajetória foram obtidos a partir das simulações realizadas. Os tempos obtidos são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Valores de comprimento e tempo obtidos a partir das simulações

Trajetória/Ferramenta	Comprimento (m)		Tempo (seg)	
	40 mm	20 mm	40 mm	20 mm
Paralela ao contorno	1,1	1,15	84	66
Ziguezague	1,8	1,8	132	138
Trocoidal e paralela ao contorno	3,2	3,8	240	342

A trajetória paralela ao contorno foi a que apresentou o menor tempo total de usinagem (incluindo as duas ferramentas), 150 segundos, seguida pela ziguezague, 270 segundos, e pela trocoidal e paralela ao contorno, 582

segundos. Estes valores comprovam que as trajetórias trocoidais geram caminhos significativamente maiores quando comparadas às demais.

No caso da trajetória paralela ao contorno, a parcela de tempo da ferramenta de 40 mm é superior à parcela de 20mm e isto se deve à área total usinada por cada ferramenta. Já na trajetória zigzague, o tempo de usinagem da ferramenta de 20 mm foi maior, mesmo sendo a área usinada por ela menor, uma vez que houve um maior número de reposicionamentos. Finalmente, para a trajetória trocoidal e paralela ao contorno, a parcela de tempo correspondente à ferramenta de 20 mm também foi maior em relação à ferramenta de 40 mm, porém neste caso a justificativa não é apenas o reposicionamento da ferramenta e, sim, o tamanho do diâmetro da trocoide.

3. REALIZAÇÃO DOS TESTES

3.1. Material Ensaiado

Para a realização dos ensaios foram utilizados blocos de aço AISI P20 cujas dimensões são 300x200x50mm, e com dureza igual a 31 HRC. Um exemplar destes blocos, preparado para a usinagem, pode ser observado na Fig. (6).



Figura 6. Bloco de aço AISI P20 preparado para a usinagem

3.2. Ferramentas de Corte

Neste estudo foram utilizadas duas ferramentas para a realização do fresamento da cavidade proposta as quais são mostradas na Fig. (7). Os diâmetros selecionados foram de 40 mm e 20 mm.



Figura 7. (a) Fresa com 40 mm de diâmetro, e (b) Fresa com 20 mm de diâmetro

Os suportes com 40 mm e 20 mm de diâmetro permitem a fixação de 5 e 2 insertos por meio de parafusos, respectivamente. Foram utilizados os mesmos insertos em ambas as ferramentas, sendo eles de metal duro revestido da família MEC da fabricante Kyocera.

3.3. Equipamentos para a Usinagem

Os ensaios foram realizados em uma fresadora Charles MVC-955 com comando numérico Siemens Sinumerik 840Di.

O fluido de corte utilizado nos ensaios foi o ar comprimido, aplicado pelo dispositivo apresentado na Fig (6).

Apesar da sua utilização ser associada a um alto consumo de energia elétrica, seus principais objetivos neste estudo são remover o cavaco da zona de corte e tentar tornar o processo realizado mais sustentável, uma vez que alguns fluidos de corte são associados a grandes cargas ambientais como, por exemplo, emulsões.

3.4. Medição do Consumo de Energia

A medição do consumo de energia nos ensaios foi feita utilizando-se um transdutor digital de grandezas elétricas, modelo Mult-K 120, e um conversor KR-485/USB, ambos da marca KRON.

Uma representação esquemática com todos os componentes envolvidos no processo de medição de energia durante os ensaios realizados é apresentada na Fig (8). Nela pode-se observar como foram feitas as conexões de cada componente. O CNC foi conectado ao transdutor que, por sua vez, foi conectado ao conversor por meio das portas RS-485 e, finalmente, o conversor foi conectado ao computador mediante porta USB.

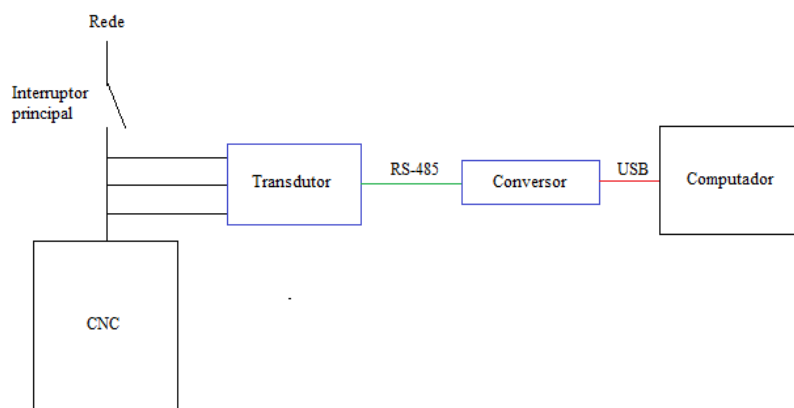


Figura 8. Esquema do sistema de medição de energia utilizado

O transdutor foi conectado logo após a alimentação de equipamentos e acessórios secundários da fresadora. Desta forma, foram obtidos dados de consumo de energia que não incluem o consumo destes componentes, porém que englobam os demais dispositivos da fresadora, como filtro, sistema de controle, drivers e motores.

3.5. Procedimento Experimental

O plano estabelecido para a realização do experimento foi idealizado com o intuito de avaliar o consumo de energia de cada trajetória. Para garantir a confiabilidade dos dados obtidos, cada experimento foi replicado 10 vezes.

A mesma sequência de ferramentas foi utilizada em todas as trajetórias, sendo o desbaste realizado, primeiramente, com a fresa de 40 mm e, posteriormente, com a fresa de 20 mm. O mesmo procedimento foi realizado em vazio para a obtenção dos dados de consumo de energia considerando-se somente os movimentos de corte.

Os parâmetros de corte utilizados com as fresas de 40 mm e 20 mm de diâmetro foram mantidos constantes para todas as trajetórias e são apresentados na Tab. (2).

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados para as duas ferramentas

Parâmetros		Ferramenta de 40 mm	Ferramenta de 20 mm
Velocidade de corte (m/min)		120	120
Avanço por dente (mm/dente)		0,15	0,15
Velocidade angular do fuso (min^{-1})		955	1910
Velocidade de avanço (mm/min)	x, y	716	573
	Hel.	286	-
	z	72	57
Ângulo máximo de rampa		0,8°	-
Profundidade de corte (mm)		0,5	0,5

4. RESULTADOS DOS TESTES

Conforme já definido, cada ferramenta é responsável pela remoção de material de uma área específica da cavidade, sendo esta área a mesma para cada trajetória estudada. O volume usinado pelas ferramentas é pré-estabelecido e

mantido constante para as três trajetórias. Na Fig. (9) são apresentadas as geometrias finais obtidas após a finalização dos ensaios, utilizando-se: (a) trajetórias paralela ao contorno; (b) ziguezague; e (c) trocoidal e paralela ao contorno.

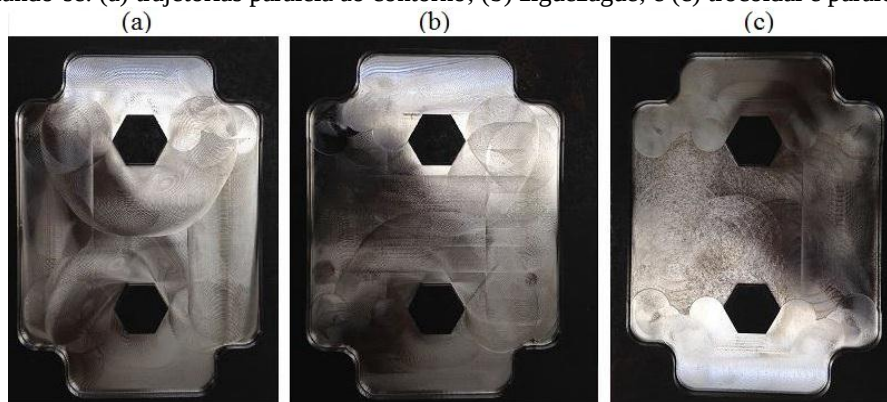


Figura 9. Cavidades usinadas: (a) paralela ao contorno, (b) ziguezague e (c) trocoidal e paralela ao contorno

4.1. Consumo de Energia das Trajetórias

Seguindo o procedimento experimental descrito na seção 3.5, foram obtidos os dados apresentados na Tab. (3). Nesta tabela são mostrados os valores médios do consumo de energia ativa total e após o ensaio em vazio (kWh). Além disso, são apresentadas as diferenças entre estes valores, que representam o consumo de energia ativa (que é a energia elétrica efetivamente consumida pela fresadora) de cada trajetória durante os movimentos nos quais há o corte.

Tabela 3. Energia consumida durante a execução de cada trajetória

Trajetória	Ferramenta de 40 mm			Ferramenta de 20 mm		
	Consumo de energia ativa (kWh)			Consumo de energia ativa (kWh)		
	Total	Em vazio	Diferença	Total	Em vazio	Diferença
Paralela ao contorno	0,104	0,084	0,020	0,107	0,088	0,019
Ziguezague	0,178	0,148	0,030	0,169	0,102	0,067
Trocoidal e paralela ao contorno	0,254	0,178	0,076	0,438	0,291	0,147

Para a ferramenta com 40 mm de diâmetro, a trajetória paralela ao contorno apresentou a menor energia consumida durante o corte, 0,020 kWh, seguida pela trajetória ziguezague, 0,030 kWh, enquanto a trajetória trocoidal e paralela ao contorno apresentou o maior consumo no momento do corte, 0,076 kWh.

Uma justificativa para estes valores é o tempo de contato entre a peça e a ferramenta. Na trajetória paralela ao contorno este contato permanece durante praticamente todo o processo, fazendo com que maiores temperaturas sejam alcançadas durante o corte devido ao atrito gerado, diminuindo a resistência do material da peça e facilitando a sua remoção. Com a trajetória ziguezague o contato ocorre durante a maior parte do processo, porém o maior número de reposicionamentos da ferramenta causa interrupção do atrito e, consequentemente, as temperaturas alcançadas durante o corte são menores. Já para a trajetória trocoidal e paralela ao contorno a ferramenta não há contato constante com a peça, diminuindo ainda mais as temperaturas alcançadas no processo.

Para a ferramenta de 20 mm de diâmetro, o menor consumo médio total de energia foi apresentado pela trajetória paralela ao contorno, 0,107 kWh. Já para a ziguezague foi 0,169 kWh, aproximadamente 58% acima da primeira. A trajetória na qual o maior consumo de energia foi observado foi para a combinada trocoidal e paralela ao contorno, com um valor de 0,438 kWh, 309% acima da trajetória paralela ao contorno e 159% superior à ziguezague. A trajetória paralela ao contorno apresentou a menor energia consumida durante o corte, 0,019 kWh, seguida pela ziguezague, 0,067 kWh. Já o maior consumo no momento do corte foi visto para a trajetória combinada, 0,147 kWh.

O maior consumo total de energia elétrica é esperado para operações com maiores tempos de processo, porém é necessário avaliar a relação entre o tempo de usinagem e o consumo de energia para estabelecer uma comparação completa das trajetórias.

Na Fig. (10) é apresentada a relação entre este consumo de energia e o tempo decorrido no processo de fresamento da cavidade proposta. O quociente entre estes valores ajuda a identificar qual é a melhor trajetória em termos de energia total consumida considerando o tempo do processo.

No caso da fresa de 40 mm, a trajetória trocoidal e paralela ao contorno possui o maior quociente, seguida pela paralela ao contorno e, finalmente, pela ziguezague. Já para a fresa de 20 mm, a trajetória ziguezague possui o maior quociente, seguida pela trocoidal e paralela ao contorno e, por fim, pela paralela ao contorno.

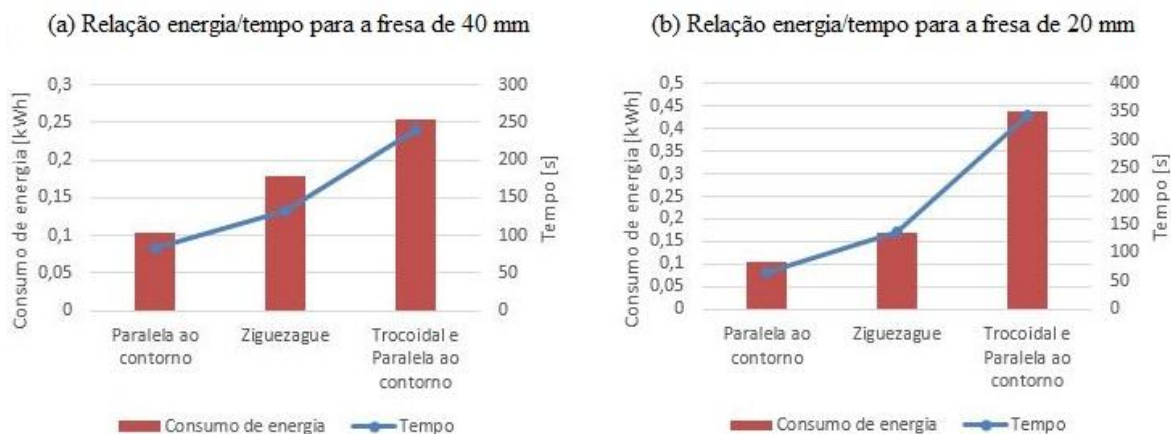


Figura 10. Relação entre consumo total de energia e tempo gastos no fresamento da cavidade

4.2. Comportamento das potências consumidas

Além do consumo de energia ativa nos processos, foi realizada uma análise da potência requerida do motor, em W, para a realização dos ensaios de cada trajetória. Na Fig. (11) são apresentados os comportamentos do consumo de potência do motor ao longo de todas as trajetórias percorridas pela ferramenta de 40 mm.

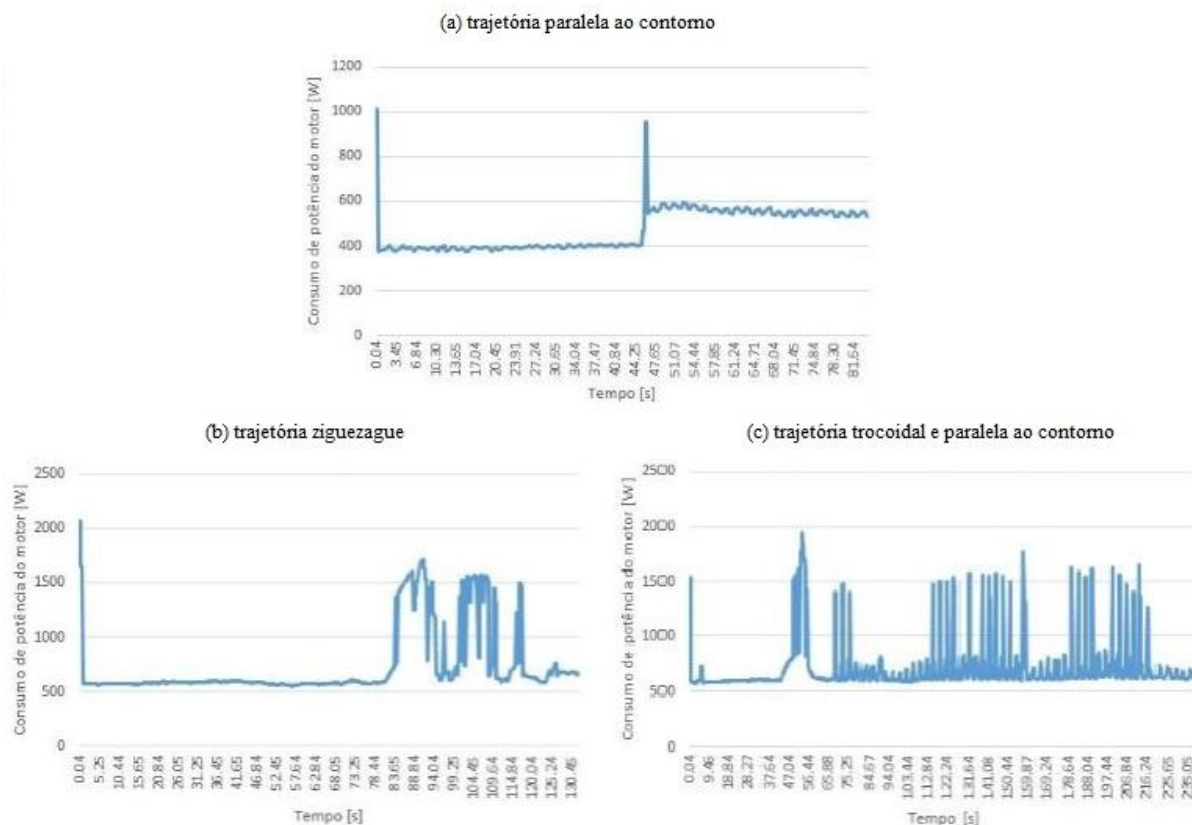


Figura 11. Consumo de potência do motor ao longo do fresamento com a ferramenta de 40 mm de diâmetro

Durante a trajetória paralela ao contorno existem dois picos de potência requerida do motor, que se aproximam de 1000 W e, posteriormente, a potência é estabilizada, sendo em média 400 W para a entrada em rampa, e 550 W para a execução da trajetória. Essa diferença de valores acontece devido aos distintos parâmetros de corte utilizados durante a entrada da ferramenta na peça e no decorrer do corte.

Apesar da entrada da ferramenta na peça ser efetuada em rampa tanto para a trajetória paralela ao contorno quanto para a trajetória ziguezague, houve divergências entre os valores de potência consumida. No caso da trajetória

zigzague, o pico alcançado no primeiro contato da ferramenta com a peça chegou a aproximadamente 2000 W, e a potência estabilizou em cerca de 600 W durante grande parte do processo. Após cerca de 83 segundos houve grandes oscilações na potência requerida que coincidem com as interrupções no corte causadas pelos constantes reposicionamentos da ferramenta. Por causa destes picos, a potência média requerida durante o ensaio da trajetória zigzague foi 735,82 W, valor superior ao encontrado para a trajetória paralela ao contorno, que foi de 472,29 W.

A entrada em espiral da trajetória trocoidal e paralela ao contorno apresentou um pico de aproximadamente 1500 W e, mais uma vez, a potência estabilizou em torno de 600 W até o fim da entrada da ferramenta na peça. Após este período pode-se observar que a demanda de potência oscila até o final do corte. Estes picos são observados a cada penetração na peça, enquanto os vales representam as potências requeridas enquanto a ferramenta não está em contato com a peça. Apesar da grande quantidade de picos com valores elevados, a potência média necessária para a usinagem do material mediante a trajetória trocoidal e paralela ao contorno é inferior à consumida durante os ensaios da trajetória zigzague, 727,71 W.

A potência consumida pelo motor para a realização dos ensaios de cada trajetória percorrida pela ferramenta de 20mm de diâmetro é apresentada na Fig. (12).

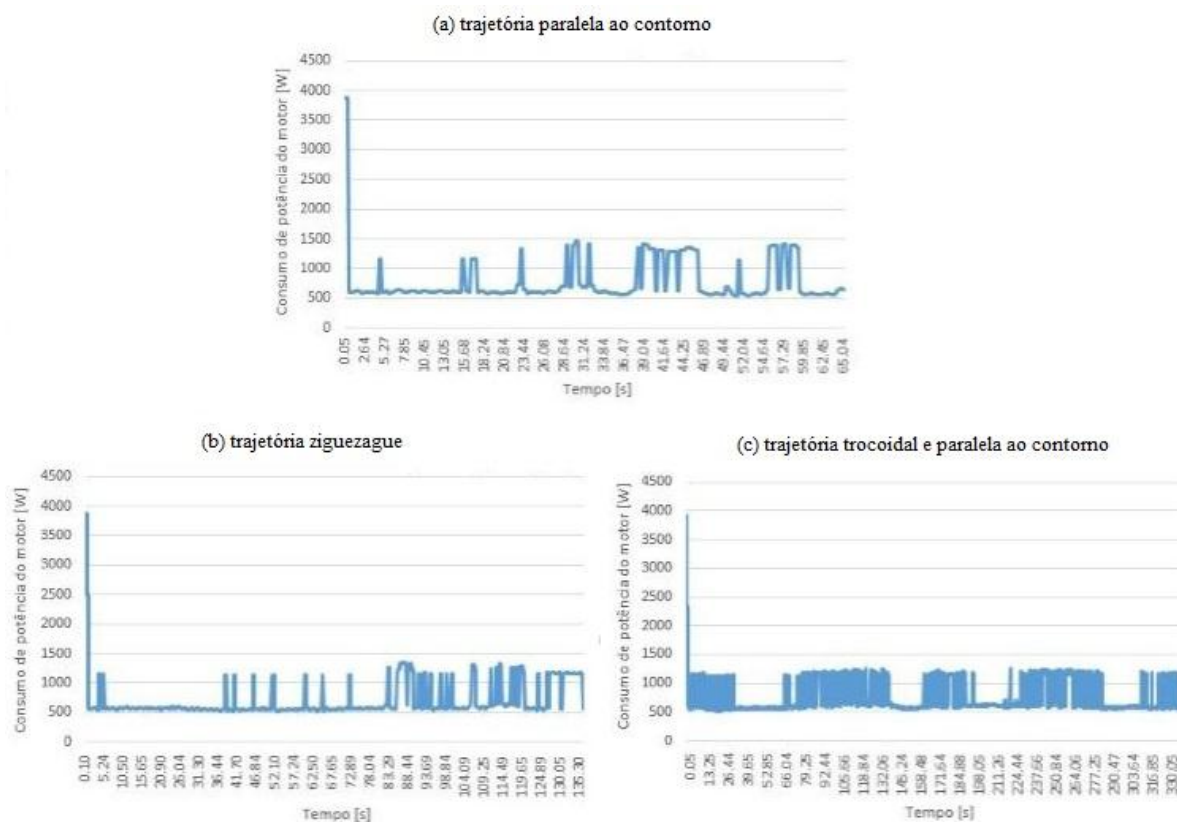


Figura 12. Consumo de potência do motor ao longo do desbaste com a ferramenta de 20 mm de diâmetro

A potência requerida do motor no primeiro contato da ferramenta com a peça foi o maior pico observado para todas as trajetórias, e os valores apresentados foram semelhantes, cerca de 4000 W.

Durante a trajetória paralela ao contorno a potência média requerida do motor é de 777,03 W. Neste caso, são observados vários picos de consumo de potência, e isto se deve às entradas da ferramenta na peça para a usinagem das áreas determinadas, e aos reposicionamentos da ferramenta. Devido a estes picos, a ferramenta de 20 mm requer uma potência média maior do motor para a execução da trajetória paralela ao contorno quando comparada à ferramenta de 40 mm de diâmetro.

Durante a execução da trajetória zigzague pela ferramenta de 20 mm foram observadas maiores oscilações na potência quando comparada à execução da trajetória paralela ao contorno. Isto acontece porque, além dos reposicionamentos e entradas necessários para a usinagem das áreas independentes, existem reposicionamentos e entradas da ferramenta durante a própria trajetória. O consumo médio apresentado após a execução da trajetória zigzague foi de 708,25 W, valor inferior tanto ao apresentado após a execução da trajetória paralela ao contorno com a mesma ferramenta, quanto ao apresentado após a execução da trajetória zigzague pela ferramenta de 40 mm.

A trajetória trocoidal combinada com paralela ao contorno foi a que apresentou a maior oscilação nos valores da potência consumida pelo motor, devido à constante alternância entre os movimentos que efetuam ou não remoção de

material. Por causa da grande quantidade de picos com valores elevados, a potência média exigida para a usinagem do material no decorrer da trajetória combinada é superior à requerida tanto durante os ensaios da trajetória ziguezague quanto os da paralela ao contorno, alcançando o valor de 779,53 W. Quando comparada à potência média consumida na realização da trajetória combinada pela ferramenta de 40 mm de diâmetro, novamente, o maior valor é observado para a ferramenta menor. Isto se deve à diferença entre os diâmetros das trocoides utilizadas para as duas ferramentas, resultando em um maior número de entradas na peça para a ferramenta de 20 mm.

5. CONCLUSÕES

As medições de energia elétrica mostraram que os consumos mais elevados não devem ser, necessariamente, associados à maior região a ser usinada ou ao maior tempo de operação. Partindo-se do pressuposto de que os parâmetros de corte adotados para cada ferramenta não variam entre as trajetórias, pode-se concluir que o consumo de potência é influenciado por alguns fatores presentes do decorrer do processo, como o reposicionamento da ferramenta, comprimento do caminho percorrido e as temperaturas alcançadas.

Para a usinagem da cavidade proposta neste trabalho, a partir dos parâmetros e variáveis adotados, os resultados indicam que a melhor trajetória para a usinagem da região A é a paralela ao contorno, enquanto para a região 'B' é a ziguezague.

Como sugestões de trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo com profundidades de corte maiores, de forma a analisar o desgaste das ferramentas. Pretende-se também estudar o comportamento de outros materiais de ferramenta para o fresamento de aços.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Chan, K. e Choy, H., 2002, "Machining tactics for interior corners of pockets", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 20, No. 10, pp. 741-748.
- Ferreira, J.C.E. e Ochoa, D.M., 2013 "A method for generating trochoidal tool paths for 2½D pocket milling process planning with multiple tools", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 9, pp. 1287-1298.
- González, D.M.O., 2013, "Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas", *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- Ibaraki, S., Yamaji, I. e Matsubara, A., 2010 "On the removal of critical cutting regions by trochoidal grooving", *Precision Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 467-473.
- ISO 6983-1, 1982, "Numeric control of machines-Program format and definition of address words-Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems".
- Lin, Z., Fu, J., Shen, H., e Yao, X., 2015 "Smooth contour-parallel tool path generation for high-speed machining through a dual offset procedure", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 81, No. 5, pp. 1233-1245.
- Newman, S.T., Nassehi, A., Imani-Asrai, R. e Dhokia, V., 2012 "Energy efficient process planning for CNC machining", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 127-136.
- Peng, T. e Xu, X., 2014 "Energy-efficient machining systems: a critical review", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, No. 9, pp. 1389-1406.
- Rauch, M., Duc, E. e Hascoet, J.-Y., 2009 "Improving trochoidal tool paths generation and implementation using process constraints modelling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 5, pp. 375-383.
- Yan, J. e Li, L., 2013, "Multi-objective optimization of milling parameters: the trade-offs between energy, production rate and cutting quality", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 52, pp. 462-471.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

ASSESSMENT OF ENERGY CONSUMPTION BY DIFFERENT TYPES OF TOOL PATHS USED IN MILLING 2½D POCKETS

Juliana dos Santos Solheid¹, ju.solheid@gmail.com

João Carlos Espíndola Ferreira¹, j.c.ferreira@ufsc.br

David Manuel Ochoa González¹, ochoadavid@gmail.com

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 88040-900, Brazil

Abstract: The increase in population and in the scarcity of natural resources, are increasing the intensity of environmental impacts. These factors have led to an increase in social consciousness, forcing regulators to encourage the reduction of energy consumption, whose generation is related to various environmental issues. The machining process is responsible for much environmental load, and a way to make it more sustainable is by reducing power consumption, which can be obtained by reducing the path taken by the cutting tool. This article provides an assessment of energy consumption during the milling process of 2.5 D cavities, with two different tools for different trajectories. The generation of trajectories was performed using a CAM software (Computer Aided Manufacturing) and three types of trajectories were generated for comparison, namely: the contour-parallel, zigzag and a combination of trochoidal and contour-parallel path. Data acquisition was carried out through a transducer of electrical quantities, obtaining values of the total consumption of energy from the machine tool and power demand of the main spindle. Assays were performed in blocks of steel AISI P20, after the generation and simulation of G codes for the paths proposed, using compressed air as cutting fluid. Comparisons were made between the trajectories in terms of total active power consumption of the machine tool and during cutting movements, machining times and power demand.

Keywords: Pocket Milling, Energy Consumption, Sustainable Manufacturing, Machining Tool Paths.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.