

INFLUÊNCIA DA TOLERÂNCIA E DA TRAJETÓRIA DE FERRAMENTA NO TEMPO DE FRESAMENTO E NA QUALIDADE SUPERFICIAL

Felipe Marin, felipe.marin@posgrad.ufsc.br¹

Lucas Gomes Camargo, lucas.g.c@grad.ufsc.br¹

Vitor Jacintho Leal de Carvalho, vitor.carvalho@grad.ufsc.br¹

Miguel Dias Junior, miguel.dias@ifes.edu.br²

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dr. João Colin, 2700, Santo Antônio, Joinville – SC.

²Instituto Federal do Espírito Santo – IFES - Campus São Mateus, Rodovia BR-101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus – ES.

Resumo: O emprego de geometrias complexas na usinagem de moldes e matrizes tem crescido consideravelmente devido a constante demanda do mercado. Para atender a fabricação, utilizam-se softwares CAM para programar trajetórias de usinagem. A tolerância na fabricação afeta diretamente no tempo de processo, o qual diverge do calculado pelo software CAM, tamanho do programa NC e qualidade superficial. Esse problema é ainda agravado pelo emprego de estreitas bandas de tolerâncias e altas velocidades de avanço. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo correlacionar a influência da banda de tolerância no tempo de usinagem e na qualidade superficial, avaliando três estratégias de fabricação. Para tal, usinou-se uma geometria com superfície plana e côncavo-convexa, representando uma superfície complexa, variando a banda de tolerância em três níveis em uma máquina Romi D600 com eixo árvore de 35000 rpm. Com o estudo obteve-se uma relação de custo de fabricação avaliando as diferentes trajetórias de fresamento e tempo de polimento.

Palavras-chave: fresamento, polimento, qualidade superficial, custos de fabricação.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente na fabricação de produtos e componentes o apelo estético para agradar vendedores e clientes acarretam no emprego de superfícies mais elaboradas e complexas. O fresamento é o principal processo de fabricação para manufatura de ferramentas com superfícies complexas e produtos acabados aplicados nas indústrias automotiva, aeroespacial, naval e de moldes e matrizes (Chen e Shi, 2008).

A fabricação de produtos plásticos com formato complexo demanda emprego de moldes. Dentre as indústrias de manufatura de bens a automotiva e de eletrônicos são as principais consumidoras de moldes. Segundo Kecelj et al (2004) a cavidade é o componente mais representativo na manufatura de moldes, sendo o responsável por cerca de 40% do tempo gasto para sua fabricação.

O processo de fresamento com comando numérico é utilizado na fabricação de cavidades para moldes e matrizes. No entanto, mesmo com parâmetros otimizados, a qualidade superficial necessária não é obtida após a operação de acabamento, o que exige posterior processo de polimento para atingir uma qualidade superficial desejada. O processo de polimento de moldes e matrizes, devido à complexidade das geometrias das cavidades usualmente é realizado manualmente (Marquez, 2005).

Diferentes estratégias e parâmetros podem ser empregados no fresamento de moldes e matrizes. Otimizar o tempo de usinagem pode prejudicar a qualidade superficial exigindo maiores gastos com processos de polimento. Desta forma, é difícil mensurar quais as estratégias e parâmetros resultam em menores custos de fabricação.

Souza et al (2014) investigaram a influência das estratégias de usinagem para fabricação de cavidades avaliando qualidade superficial e custos de fabricação e polimento. No entanto, devido à abrangência do tema, não foi estudado a influência da banda de tolerância durante a geração das trajetórias da ferramenta, sendo necessário maiores investigações nesse aspecto.

Com isso, este estudo tem o objetivo de avaliar a influência das estratégias de usinagem de acabamento e da tolerância na qualidade superficial, tempos e custos de fresamento e polimento. Para tanto, foi empregada uma geometria com região plana e côncavo-convexa no qual ocorre a alteração do contato ferramenta-peça como ocorre no fresamento de formas complexas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

No processo de usinagem de formas complexas, devido à complexidade das operações de acabamento o cálculo de trajetória das ferramentas exige o emprego de softwares de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM - *Computer Aided Manufacturing*) no cálculo das trajetórias da ferramenta. Estes sistemas descrevem as superfícies complexas por segmentos de reta dentro de um limite inferior e superior que formam uma banda de tolerância estabelecida pelo programador CAM. Deste modo, é realizado o cálculo dos pontos da trajetória da ferramenta para a geração da superfície usinada (Camargo et al, 2014).

A velocidade de avanço é obtida a partir dos parâmetros de corte definidos para o processo: Velocidade de corte e avanço por aresta. Neste contexto, a usinagem em altas velocidades (HSM – *High Speed Machining*) vem sendo cada vez mais empregada para fabricação de peças complexas como moldes e matrizes. Segundo Finzer (1999), a definição mais precisa de HSM seria eixos-árvore com alta rotação associados à altas velocidades de avanço.

Os altos valores de rotação utilizados, maiores que 10000 rpm (Toh, 2005), permite velocidades de corte mais de cinco vezes superiores aos convencionais (Duc et al, 1999 apud Msaddek et al, 2012). Este fato propicia a fabricação em materiais de alta dureza com longa vida da ferramenta e menores forças de corte (Msaddek et al, 2012). Outras vantagens são: alta taxa de remoção de material, bom acabamento e menor erro de forma (Toh, 2004).

Segundo Toh (2005), um processo HSM eficiente requer a avaliação das trajetórias de usinagem pelas altas velocidades de avanço utilizadas (normalmente entre 2000 e 10000 mm/min). Porém, diversos autores já constataram que estes valores de avanço programados para HSM não são atingidos completamente, onde o seu perfil apresenta uma grande variação ao longo da trajetória (Msaddek et al, 2014; Souza et al, 2007).

O tempo de fresamento é obviamente uma função da distância percorrida pela ferramenta e a velocidade de avanço desta movimentação. Considerando a mesma superfície a sofrer uma operação de acabamento, o comprimento da trajetória varia com a estratégia de usinagem utilizada e os parâmetros inseridos como passe lateral da ferramenta (a_e). Segundo Ramos et al (2003), o estudo das estratégias de usinagem é importante para alcançar menores rugosidades superficiais e redução de custos de usinagem. Souza et al (2014) incluíram além desses o custo e tempo de polimento como dependentes da estratégia de usinagem.

Shajari et al (2014) estudaram a usinagem de uma superfície convexa e obteve melhor qualidade superficial e menores forças de usinagem com a estratégia radial, no entanto apresentou maior tempo de fabricação. Quando foi considerado o tempo e as forças de usinagem, a estratégia que apresentou melhores resultados foi passes paralelos. Toh (2004), empregando usinagem em altas velocidades (HSM), verificou que a estratégia com maior eficiência e menor desgaste da ferramenta foi a de passes paralelos. A estratégia de contorno de periferia resultou em maior desgaste da ferramenta.

O autor afirma que a vibração, proveniente do aumento das forças de corte e de volume remanescente durante a mudança de direção, é a principal causa de desgaste. Este fenômeno também prejudica a qualidade da superfície usinada podendo marcar a peça. Além disso, a alteração da direção de movimentação das estratégias obriga o centro de usinagem CNC a limitar a velocidade de avanço para manter a precisão geométrica (Pessoles et al, 2009), o que aumenta o tempo e custo da operação.

Durante o fresamento de formas complexas em três eixos, o contato ferramenta-peça se altera em função da geometria da peça. Diante disso, a fresa mais utilizada na operação de acabamento é a de ponta esférica por melhor se adequar as diferentes curvaturas da superfície (Chiang et al, 1995). Neste caso, tanto a espessura do cavaco quanto a velocidade de corte são reduzidas em função do diâmetro efetivo de corte que pode se aproximar de zero. Desta forma, a fresa pode não ser capaz de cisalhar, pela baixa velocidade de corte, e passa a deformar plasticamente o material. A deformação é causada porque a mínima espessura de corte necessária para o cisalhamento do material não é alcançada. (Bissacco e Hansen, 2006; Ducobu et al, 2009; Souza et al, 2014).

A banda de tolerância estabelece o máximo erro que a peça deve apresentar após a operação de usinagem. Desta forma, quanto menores forem o raio de curvatura da superfície e a banda de tolerância, menores deverão ser os segmentos de reta que descrevem a geometria. Souza e Coelho (2007) constataram que o tempo de usinagem com bandas de tolerância mais estreitas tem um tempo médio de usinagem maior e relaciona isso ao reduzido comprimento dos segmentos de reta.

Os pequenos segmentos lineares que descrevem a trajetória da ferramenta obrigam o centro de usinagem CNC a reduzir a velocidade de avanço por limitações cinemáticas (Pessoles et al, 2009) e de processamento (Coelho et al, 2010). A distribuição irregular dos pontos da trajetória é um dos fatores que geram a oscilação da velocidade de avanço (Souza et al, 2007).

Estes fenômenos prejudicam a qualidade superficial e precisão dimensional pela variação do avanço por aresta e da força de usinagem sofrida pela ferramenta, respectivamente (Souza e Coelho, 2007). Desta forma, o valor da banda de tolerância tem alta influência no tempo de usinagem e na qualidade superficial da peça usinada, sendo determinante no posterior processo de polimento.

Segundo Fitzpatrick (2013), ao realizar movimentação em mais de um eixo, pela realização de interpolação linear ocorre perda de suavidade e precisão da trajetória. Este fenômeno é observado em diversos componentes mecânicos e mecatrônicos, onde ocorre combinação de erros de componentes.

Atualmente, o processo de polimento de moldes é realizado manualmente (Marquez et. al 2005; Souza et al 2014). O processo de polimento está diretamente ligado ao processo de fabricação de moldes, acarretando em custo e tempo para alcançar acabamento necessário na superfície do molde. Marquez et al (2005) estudaram polimento robotizado usando uma abordagem CAD/CAM para atingir qualidade superficial similar ao processo manual.

No processo de polimento manual, ferramentas com diferentes abrasividades e formatos variados são empregados para dar acabamento espelhado em cavidades de moldes (rugosidade aritmética (R_a) na ordem de $1\mu\text{m}$). Os fatores que mais influenciam no processo de polimento são a força de contato e a velocidade tangencial da ferramenta com a peça (Nagata et al, 2007).

Superfícies com maiores níveis de rugosidades exigem um maior tempo de polimento, sendo necessário muitas vezes um maior número de operações (maior range de abrasivos) ou tempo de operação de cada etapa para redução gradativa das imperfeições da superfície. Souza et al (2014) avaliaram a usinagem de uma região convexa com as cinco principais estratégias disponíveis pelos softwares comerciais, contorno de periferia, curva espiral, passes paralelos e curva radial ascendente e descendente. Para a geometria do estudo, o contorno de periferia mostrou menor custo de fabricação para uma superfície espelhada.

O presente estudo avalia como a qualidade superficial resultante de diferentes estratégias e bandas de tolerâncias durante o fresamento influenciam no polimento, analisando os custos das duas etapas e relacionando com o custo total de fabricação do ferramental. Para analisar o tempo gasto em usinagem e acabamento de geometrias complexas foi proposto um experimento 3^2 variando a banda de tolerância e estratégia de usinagem em três níveis cada.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A geometria do estudo foi modelada em software CAD e é composta por regiões plana e côncavo-convexa para representar o contato ferramenta peça na usinagem de uma superfície complexa. A geometria foi fabricada a partir de um único bloco sólido de aço AISI P20. Para minimizar problemas com vibrações o bloco foi fixo na mesa da CNC por grampos. O desbaste foi realizado com sobremetal de 0,5 milímetros para o acabamento. A geometria fabricada no estudo é mostrada na Fig. (1).

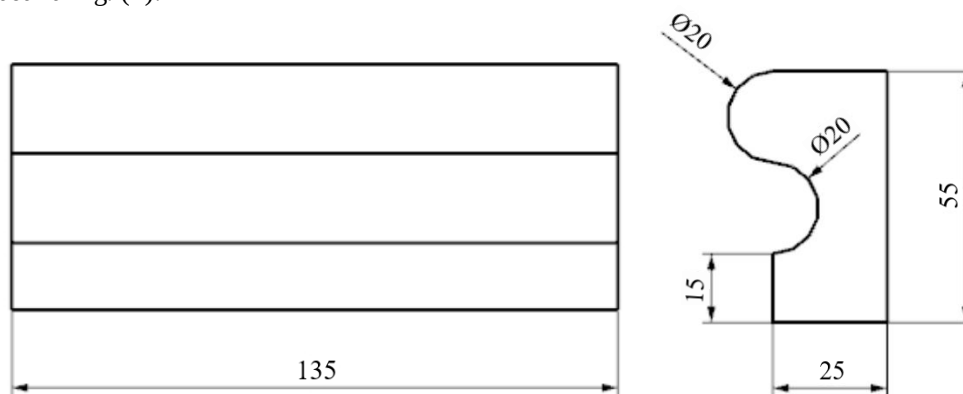


Figura 1. Corpo de prova

Foram escolhidos para o estudo três estratégias de usinagem: passes paralelos em 0° , passes paralelos em 45° e contorno de periferia (3D offset), estratégias usualmente empregadas na indústria por apresentarem maior tempo de contato ferramenta peça. As trajetórias são apresentadas na Fig. (2). Para o estudo de banda de tolerância foram escolhidos três níveis: 0,1mm, 0,01mm e 0,001mm. As trajetórias foram geradas pelo software NX 9.0 e pós-processada para comando FANUC Oi-MC.

Para o estudo com três níveis de bandas de tolerância e três estratégias, foram utilizadas 9 regiões iguais de 15 mm de largura. Para o acabamento foi utilizado um centro de usinagem CNC Romi D600 com fuso Tecnodrill® EletroSpindle EMT90-173522-W de 35.000 rpm. Utilizou-se uma fresa de metal duro de ponta esférica de 6 mm de diâmetro com comprimento de balanço de 38,5 mm. Os parâmetros da usinagem de acabamento, ferramenta e máquina, são mostrados na Tab. (1).

Os tempos de usinagem foram medidos diretamente na máquina CNC, considerando somente tempo de contato da ferramenta com a peça, e posteriormente comparados com o previsto pelo software CAM. Após realização de todos os processos de usinagem em um único bloco, cortaram-se as regiões para facilitar as medições de rugosidade e discriminar o tempo de polimento.

A rugosidade foi mensurada com o rugosímetro Mitutoyo SJ-210 em 3 regiões do produto: plana, côncava e convexa, com o mínimo de 3 réplicas para cada região. As regiões de medição estão identificadas em vermelho na Fig. (3). O processo de polimento foi realizado por um único operador experiente, o qual utilizou lixas com gramatura de 220, 400, 800 e pasta abrasiva de $6\mu\text{m}$. Os tempos de usinagem e polimento foram registrados para quantificação dos

custos de fabricação de cada uma das regiões. Para usinagem foi utilizado custo hora máquina de 100 reais e polimento de 50 reais.

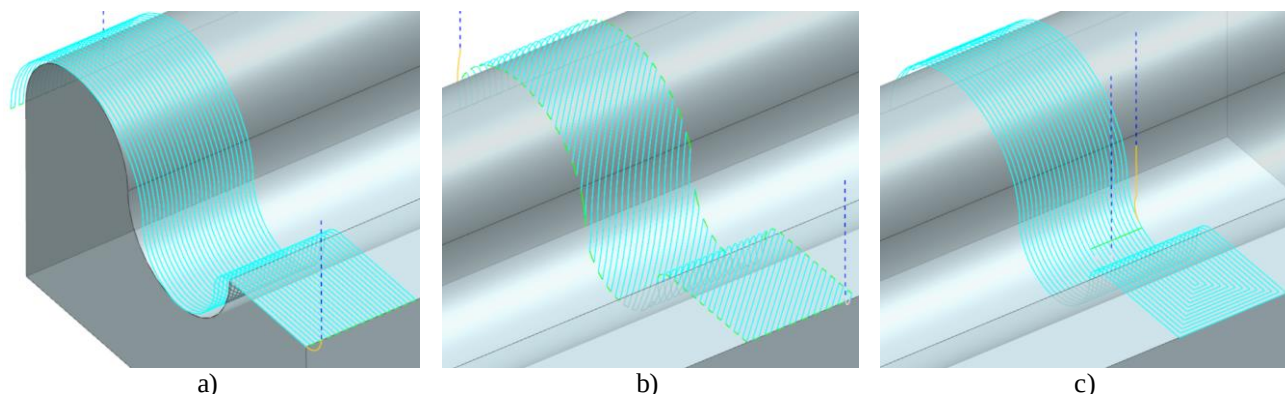


Figura 2. Trajetórias representativas das estratégias: a) passes paralelos em 0°, b) passes paralelos em 45° e c) contorno de periferia.

Tabela 1. Parâmetros para usinagem de acabamento

Rotação Spindle	30.000 rpm
Avanço Programado	6000 mmpm
A_e	0,2 mm
Sobremetal removido	0,5 mm
Diâmetro	6 mm
Material	WC=90% Co=10%
Recobrimento	TiSiN
Ângulo de hélice	35°
Comprimento de aresta	20 mm

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A usinagem do corpo de prova apresentou tempo real de fresamento diferente dos calculados pelo software CAM. Nota-se com os resultados apresentados na Tab. (2) que o erro aumenta conforme diminuimos a banda de tolerância, decorrentes das limitações mecânicas e de processamento conforme apresentado anteriormente. A maior divergência foi encontrada para a estratégia de passes paralelos em 0° e a menor para passes paralelos em 45°.

Tabela 2. Tempos de usinagem real e calculado pelo CAM.

Número do Teste	Tolerância (mm)	Trajetoória	Tempo Real (s)	Tempo CAM (s)	Erro (%)	Nº Pontos	% Tempo Real	% Nº Pontos
1	0,1	Passes paralelos 0°	68	64	6,25	4250	100,00	100,00
2	0,01	Passes paralelos 0°	117	64	82,81	13116	172,06	308,61
3	0,001	Passes paralelos 0°	352	64	450,00	41820	517,64	984,00
4	0,1	Passes paralelos 45°	59	56	5,36	3464	100,00	100,00
5	0,01	Passes paralelos 45°	94	56	67,86	10093	159,32	291,37
6	0,001	Passes paralelos 45°	274	56	389,29	30017	464,41	866,54
7	0,1	Offset	63	59	6,78	3853	100	100,00
8	0,01	Offset	103	59	74,58	11493	163,49	298,29
9	0,001	Offset	311	59	427,12	36388	493,65	944,41

Analisando os tempos de fresamento, verificou-se que não apresentaram significativa alteração com a variação da estratégia empregada. No entanto, os mesmos aumentam significativamente com a redução da banda de tolerância.

Como o tempo previsto pelo CAM considera velocidade de avanço constante, pode-se afirmar que o tempo previsto representa o comprimento da trajetória calculada. Desta forma, nota-se que para uma mesma área a ser usinada as diferentes estratégias apresentam diferentes comprimentos de trajetória. Além disso, o formato de cada estratégia gera diferentes formatos de transição entre passes com alteração no sentido de movimentação, os quais atuam na redução da velocidade de avanço devido às limitações da máquina já citadas.

Considerando os testes com valor de tolerância 0,1 mm de cada estratégia como um valor de referência para o tempo real de usinagem e o número de pontos, calcularam-se os valores percentuais apresentados na Tab. 2. Nota-se que o crescimento percentual do número de pontos com a redução da tolerância é sempre superior ao crescimento do tempo real chegando a 3 vezes em alguns casos. A distribuição dos pontos em cada trajetória, gerada por diferentes estratégias, geram os erros percentuais observados.

A Figura (3) apresenta o resultado da usinagem de acabamento. Nota-se visualmente que as trajetórias com banda de tolerância de 0,1 e 0,01 mm apresentaram marcas mais profundas em alguns passes. Estas podem ser decorrentes de erros na geração da trajetória pelo CAM ou no sistema de controle da máquina CNC. Verifica-se que mesmo para valores de tolerância reduzidos, a estratégia em offset apresenta excessivas marcas de mudança de direção, padrão característico da mesma. O polidor também relatou que teve maior dificuldade para remover estas marcas principalmente na trajetória 9.

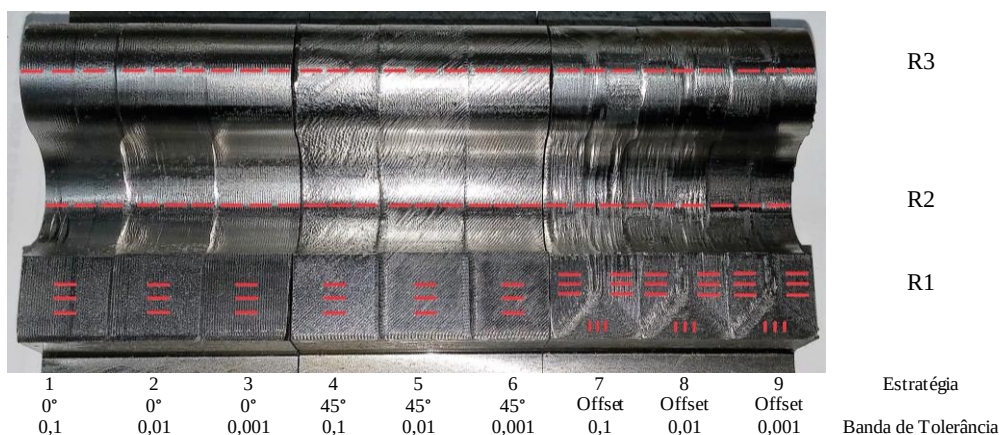


Figura 3. Corpo de prova após operação de acabamento com identificação de medidas de rugosidade e regiões.

A estratégia contorno de periferia foi empregada nas trajetórias 7, 8 e 9. Ela caracteriza-se por mudanças de direções consecutivas de forma a usinar da extremidade ao centro da peça ou do centro para as extremidades. Esse comportamento altera o processo de corte no fresamento e consequentemente o carregamento sob a ferramenta, o que acaba modificando a magnitude e direção de flexão da ferramenta causando marcas na peça.

Segundo Shajari et al (2014), altas forças de impacto são geradas na transição entre passes da estratégia contorno de periferia. Este efeito, segundo o autor, é decorrente do aumento súbito de volume do cavaco, o que resulta em vibração excessiva decorrente do aumento da força máxima de corte. Além disso, a redução da banda de tolerância gera a oscilação e redução do avanço, o que agrava os problemas de cisalhamento pela diminuição da espessura de corte.

Neste caso, o atrito gerado no contato ferramenta-peça eleva a temperatura do conjunto e prejudica o acabamento superficial. Esta condição é agravada com a deformação ocorrida pela baixa velocidade de corte, o que aumenta a força de usinagem, a flexão da ferramenta e vibração da mesma, deixando marcas superficiais. Estes fenômenos ocasionaram a maior dificuldade do polidor na remoção das marcas em Y.

A Tabela (3) apresenta o resultado das médias das rugosidades em cada uma das regiões do corpo de prova. Nota-se que os dados de rugosidade obtidos não representam as variações da tolerância para as estratégias de passes paralelos. Tal comportamento pode ser relacionado com a variação de corte, concordante-discordante. Para estratégia de contorno de periferia com corte concordante, observou-se que existe uma tendência de redução de rugosidade com a diminuição da banda de tolerância. A Figura (4) apresenta os resultados médios das rugosidades e seus respectivos desvio padrão.

A geometria da peça, o formato das estratégias e as limitações na construção do rugosímetro fez com que as medições não se equivalassem em número e quanto a sua direção em relação aos passes. Desta forma não foi possível comparar os dados de rugosidade entre as estratégias. Além disso, as medições foram realizadas obrigatoriamente em locais onde o corte é prejudicado pela velocidade de corte nula do centro da ferramenta.

Verificou-se que a estratégia contorno de periferia apresentou grande variação na rugosidade principalmente para os maiores valores de banda de tolerância, por esse motivo um maior número de medições foi realizado. Atribui-se esses

resultados aos altos valores de rugosidade consequentes das marcas de trajetória deixadas pela ferramenta na parte côncava da trajetória 7 e na região convexa da trajetória 8, como observado na Fig. (3).

Tabela 3. Média das rugosidades mensuradas nas 3 regiões de cada estratégia.

Estratégia / tolerância	R1 (μm)	R2 (μm)	R3 (μm)	Média da estratégia (μm)
1	2,1	1,7	2,3	2,0
2	1,6	1,7	1,5	1,6
3	2,3	1,9	1,5	1,9
4	1,3	1,6	1,0	1,3
5	1,9	2,0	1,8	1,9
6	1,4	1,1	1,1	1,2
7	1,3	5,6	1,3	2,7
8	0,9	1,6	5,0	2,5
9	0,7	0,8	1,2	0,9

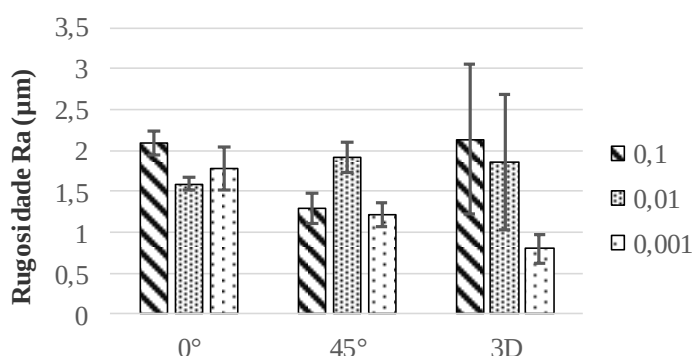


Figura 4. Média e desvio padrão das medidas de rugosidade R_a das nove amostras.

Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al (2014), no qual os parâmetros de rugosidade convencionais não demonstraram a qualidade superficial do acabamento de superfícies complexas para moldes. Devido a essas considerações, buscou-se uma melhor maneira para qualificar a qualidade de superfícies complexas usinadas por fresamento.

Encontrou-se nas operações de polimento de moldes e matrizes uma alternativa para realizar esta avaliação, visto que o tempo deste processo reflete a qualidade da superfície usinada obtida. A Figura (5) apresenta o resultado do polimento manual das nove regiões usinadas e cortadas para o polimento. Nota-se que apenas a trajetória 7 apresentou desvio perceptível visualmente (com auxílio do reflexo). Propõem-se em próximo estudo avaliar o erro de forma das 9 trajetórias.

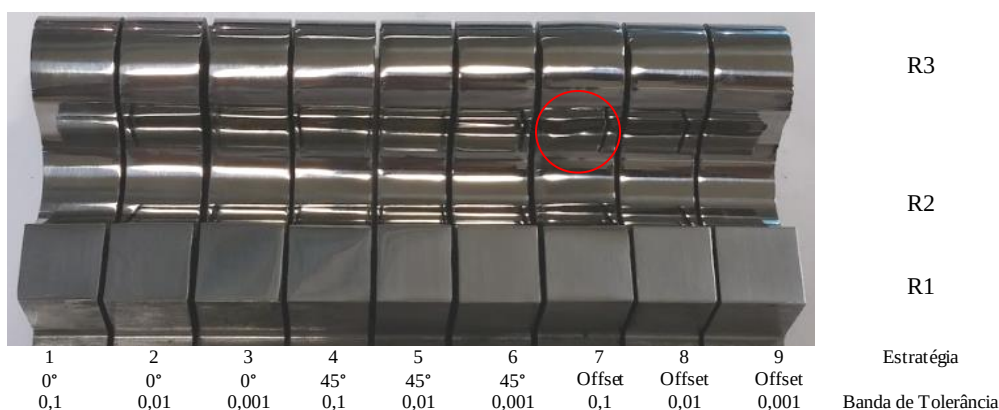


Figura 5. Corpo de prova após operação de polimento.

Os tempos de usinagem e de cada etapa do processo de polimento são apresentados na Tab. (4), juntamente com custo de cada um dos processos. A Figura (6) exibe os tempos e custos das duas operações. Consta-se que o tempo de polimento é muito superior ao tempo de fresamento e mesmo sendo significativamente mais barato tem grande influência no custo de fabricação total. Assim como no estudo de Souza et al (2014), os valores de rugosidade obtidos por parâmetros convencionais não representam relação direta com o tempo de polimento.

Tabela 4. Tempo e custo das operações de polimento e usinagem.

Estratégia	Polimento					Usinagem		
	Lixa 220 (min.)	Lixa 400 (min.)	Lixa 800 (min.)	Espelhamento (min.)	Total (min.)	Custo (R\$)	Tempo (min.)	Custo (R\$)
0°/ 0,1	6	4	2	10	22	R\$ 18,33	1,133	R\$ 1,89
0°/ 0,01	6	4	3	10	23	R\$ 19,17	1,950	R\$ 3,25
0°/ 0,001	3	3	2	10	18	R\$ 15,00	5,867	R\$ 9,78
45°/ 0,1	8	4	3	10	25	R\$ 20,83	0,983	R\$ 1,64
45°/ 0,01	4	3	2	10	19	R\$ 15,83	1,567	R\$ 2,61
45°/ 0,001	4	3	3	10	20	R\$ 16,67	4,567	R\$ 7,61
Offset/ 0,1	5	4	3	10	22	R\$ 18,33	1,050	R\$ 1,75
Offset/ 0,01	6	4	3	10	23	R\$ 19,17	1,717	R\$ 2,86
Offset/ 0,001	8	5	4	10	27	R\$ 22,50	5,183	R\$ 8,64

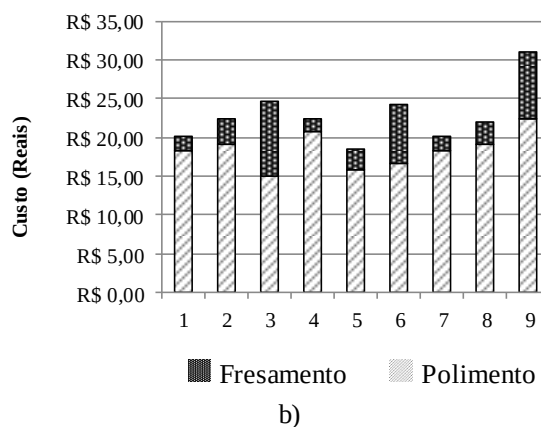
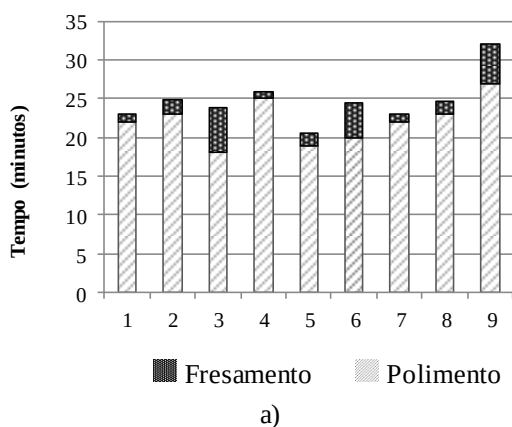


Figura 6. a) Tempo e b) Custo de fabricação e polimento para cada corpo de prova.

O tempo médio para fabricação com as três bandas de tolerâncias foi de 23,98 min para estratégia de passes paralelos em 0°, 23,71 min para passes paralelos em 45° e 26,65 min para contorno de periferia. Assim, para o requisito tempo de fabricação a estratégia de contorno de periferia não é indicada para essa geometria.

Era esperado que com a diminuição da banda de tolerância houvesse um ganho significativo no tempo de polimento pela maior precisão geométrica empregada, o que não foi constatado nem com avaliação pelo parâmetro convencional de rugosidade R_a nem pelo polimento manual. Sugere-se portanto, que a banda de tolerância não influencia significativamente no tempo total de fabricação.

Para os casos onde é necessário somente fresamento houve variação significativa de até 517%. Contudo, se o erro de forma for uma variável importante, deve-se avaliar a tolerância. Em casos os quais o erro geométrico possui importância relativa e não seja necessário polimento posterior, sugere-se utilizar uma banda de tolerância mais apertada pois não houve alteração significativas na rugosidade.

Das estratégias e tolerâncias estudadas a que apresentou menor custo para a geometria de estudo foi a trajetória 5 onde empregou-se 45° e banda de tolerância de 0,01 mm. Para as estratégias de passes paralelos 0° e contorno de periferia a banda de tolerância teve maior influência no custo total de fabricação sendo crescente conforme diminuimos a banda de tolerância.

Dentre as trajetórias de passes paralelos de 0°, destaca-se a trajetória 2 como o pior no tempo total e de polimento, com consequente pior qualidade superficial. Atribui-se este resultado ao seu valor intermediário da banda de tolerância que reúne perda da precisão geométrica combinada com os efeitos prejudiciais da oscilação do avanço.

Para as trajetórias da estratégia de passes paralelos em 45°, verifica-se que a trajetória 6 não segue a tendência decrescente do tempo de polimento esperada. Neste caso têm-se maior oscilação do avanço pelo reduzido valor de tolerância associada à menor precisão dimensional pela movimentação em 3 simultâneos. Esta circunstância prejudicou fortemente a qualidade da superfície usinada e dificultou o processo de polimento.

Neste estudo as trajetórias com contorno de periferia apresentaram piores resultados, principalmente por terem deixado fortes marcas com a mudança de sentido. Esperava-se que por ser a única estratégia utilizando plenamente corte concordante, apresentaria melhores resultados no polimento e tempo de fabricação.

5. CONCLUSÕES

A usinagem de acabamento e polimento oneram grande parte do custo de desenvolvimento de moldes e matrizes. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da estratégia de usinagem e bandas de tolerância na qualidade superficial e custos de fabricação. Constatou-se que com a redução da banda de tolerância 0,1 mm para 0,001 mm ocorre um aumento de até 517% no tempo de usinagem. Esta variação de tolerância apresentou diferentes resultados de acabamento superficial que afetam o tempo de polimento.

A estratégia de passes paralelos com tolerância de 0,01 mm e a trajetória contorno de periferia com tolerância de 0,1 mm apresentaram melhores custos de fabricação, no entanto a segunda visivelmente apresentou desvio de forma. Dessa forma, sugere-se para estudos futuros levar em consideração o erro de forma após execução de fresamento e polimento.

Os principais pontos do estudo foram:

- A rugosidade R_a não é um bom parâmetro para avaliar a qualidade superficial de superfícies complexas.
- O tempo de polimento é bem superior ao tempo de fresamento. Desta forma, mesmo com custos inferiores de processo tem maior influência no custo final.
- Dentre as estratégias avaliadas, contorno de periferia apresentou pior qualidade superficial com a redução da banda de tolerância. A alteração da direção de avanço no interior da peça resultou em marcas com formato Y que apresentaram maior dificuldade de polimento.
- Não foi possível afirmar que com a diminuição da banda de tolerância existe ganho no tempo de polimento, nem pela medição convencional de rugosidade R_a e nem pelo polimento manual. No entanto, observou-se uma tendência de aumento de custo com a redução da banda de tolerância.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos órgãos de fomento FAPESC, FEESC, CAPES, CNPQ e corpo técnico dos laboratórios de pesquisa GPCAM e METeQ da UFSC.

7. REFERÊNCIAS

- Bissacco, G. Hansen, H. N. and De Chiffre, L., 2006, "Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 593-596,
- Camargo, L. G., Podda, L. and de Souza, A. F., 2014, "Estudo dos métodos de trabalho em sistemas CAM para a geração de programas CNC com foco no pós-processamento", *Revista Ferramental*, Vol. 55, No. 1, pp. 19-25.
- Chen, T. and Shi, Z., 2008, "A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces", *Journal of materials processing technology*, Vol. 208, No. 1, pp. 259-263.
- Coelho, R.T., Souza, A.F., Rodrigues, A.R., Rigatti, A.M.Y. and Ribeiro, A.A.L., 2010, "Mechanistic approach to predict real machining time for milling free form geometries applying high feed speed", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, No. 9-12, pp. 1103-1111.
- Ducobu, F., Filippi, E. and Rivière-Lorphèvre, E. "Chip formation and minimum chip thickness in micro-milling". In: *Proceedings of the 12th CIRP conference on modeling of machining operations*. 2009. p. 339-346.
- Finzer, T., 1999. "High speed machining (HSC) of sculptured surfaces in die and mold manufacturing", *In Machining Impossible Shapes, International Conference on Sculptured Surface Machining (SSM98) Boston, Springer US, United States*, Vol. 1. No. 9-11, pp. 333-341.
- Fitzpatrick, M., 2013, "Introdução à usinagem com CNC: comando numérico computadorizado", Editora AMGH, Porto Alegre, Brasil, 365 p.
- Kecelj, B., Kopač, J., Kampuš, Z. and Kuzman, K., 2004, "Speciality of HSC in manufacturing of forging dies", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157, No. 1, pp. 536-542.
- Márquez, J. J., Pérez, J. M., Rios, J. and Vizán, A., 2005 "Process modeling for robotic polishing", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 159, No. 1, pp. 69-82.
- Msaddek, E. B., Bouaziz, Z., Dessein, G. and Baili, M., 2012, "Optimization of pocket machining strategy in HSM", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 62, No. 1-4, pp. 69-81.
- Msaddek, E. B., Bouaziz, Z., Baili, M., & Dessein, G. (2014). Influence of interpolation type in high-speed machining (HSM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 72, No. 1-4, pp. 289-302.
- Nagata, F., Hase, T., Haga, Z., Omoto, M. and Watanabe, K., 2007, "CAD/CAM-based position/force controller for a mold polishing robot", *Mechatronics*, Vol. 17, No. 4, pp. 207-216

Pessoles, X., Landon, Y., and Rubio, W., 2009, "Kinematic modelling of a 3-axis NC machine tool in linear and circular interpolation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, No. 5–8, pp. 639–655.

Ramos, A. M., Relvas, C. and Simoes, J. A., 2003, "The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, No. 1, pp. 209-216.

Shajari, S., Sadeghi, M. H. and Hassanpour, H., 2014, "The influence of tool path strategies on cutting force and surface texture during ball end milling of low curvature convex surfaces", *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, pp. 1-14.

de Souza, A. F., Machado, A., Beckert, S. F. and Diniz, A. E., 2014, "Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application", *Procedia CIRP*, Vol. 14, pp. 188-193.

de Souza, A. F. and Coelho, R. T., 2007, "Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 32, No. 11-12, pp. 1104-1114.

Toh, C. K., 2004, "A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152, No. 3, pp. 346-356.

Toh, C. K., 2005, "Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials", *Materials & design*, Vol. 26, No. 6, pp. 517-533.

Toh, C. K., 2006, "Cutter path strategies in high speed rough milling of hardened steel", *Materials & design*, Vol. 27, No. 2, pp. 107-114.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

THE INFLUENCE OF TOLERANCE BAND AND TOOL PATH STRATEGY ON MILLING TIME AND SURFACE QUALITY

Felipe Marin, felipe.marin@posgrad.ufsc.br¹

Lucas Gomes Camargo, lucas.g.c@grad.ufsc.br¹

Vitor Jacintho Leal de Carvalho, vitor.carvalho@grad.ufsc.br¹

Miguel Dias Junior, miguel.dias@ifes.edu.br²

Adriano Fagali de Souza, adriano.fagali@ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Centro Tecnológico de Joinville, Rua Dr. João Colin, 2700, Santo Antônio, Joinville – SC.

²Instituto Federal do Espírito Santo – IFES - Campus São Mateus, Rodovia BR-101 Norte, Km 58, Litorâneo, São Mateus – ES.

Abstract: The usage of complex geometry in milling applications for die and mold are increasing due to the constant demand of the market. The application of a CAM software is needed to calculate the tool path on the manufacturing process. The tolerance affects directly on the total milling time, which can diverge from the time calculated by the CAM software, on the NC size and surface quality. These issues are increased by the usage of small tolerance bands and high machining feed rates. The present study has been developed in order to correlate the influence of the tolerance band in milling time and roughness, evaluating three tool path strategy. For the study, it has been milled a concave and convex surface representing a complex geometry, varying three levels of tolerance, in a ROMI D600 milling machine with a spindle set as 35000 rpm. Therefore, the present work obtained a relation between tolerance and surface quality, with the manufacturing process cost.

Keywords: milling, polishing, surface quality, manufacturing cost.