

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA USINAGEM DE DESBASTE DE COMPOSTOS POLIMÉRICOS ATRAVÉS DA AVALIAÇÃO DE DOE FATORIAL FRACIONADO

Gustavo Maia Arnaud

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, R. Pavão, 1377 - Costa e Silva, Joinville - SC, 89220-618
gustavo.maiaag@gmail.com

Daniel Gomes Videira

Universidade Federal de Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
daniel.gvideira@gmail.com

Ivandro Bonetti

Anael Preman Krelling

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, R. Pavão, 1377 - Costa e Silva, Joinville - SC, 89220-618
ivandro@ifsc.edu.br
anael.krelling@ifsc.edu.br

Resumo: O emprego de ferramentas providas da metodologia seis sigma, tal como DOE (Design of Experiment), contribui para a análise da significância dos fatores envolvidos na usinagem de desbaste de resinas poliméricas, tais como, estratégia de usinagem, raio de canto da ferramenta, material do substrato e parâmetros de corte (v_c , f_z , a_p e a_e) frente a variável resposta taxa de remoção de material (Q). O objetivo do estudo propôs a realização de ensaios de usinagem utilizando-se de dois tipos de matéria prima a partir de material compósito com matriz polimérica (Necuron® 651 e Ren Shape® 460), visando a melhoria dos parâmetros empiricamente utilizados na indústria, considerando a aplicação dos conceitos de Usinagem de Alta Performance (HPC) como estratégia de usinagem, levando em conta o impacto nos defeitos superficiais de lascamento, promovidos pela alteração dos parâmetros de corte. O estudo de caso em si, utilizou-se de análises gráficas estatísticas tais como gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, gráfico de probabilidade normal e gráficos de efeitos principais obtidos através de um DOE fatorial fracionado com 7 fatores e 2 níveis visando o modelo de regressão linear para avaliar a variável resposta taxa de remoção (Q). A partir da utilização de um otimizador de respostas com o software Minitab®, foi possível definir a combinação de parâmetros otimizada, dentro do espaço de inferência do estudo, que conduziu à elaboração de caracterização empírica que maximizou o resultado da taxa de remoção. A análise e discussão dos resultados evidenciou diferença entre os valores da taxa de remoção obtidos experimentalmente em comparação aos valores teóricos, indicando a intercorrência de fatores externos que causam influência na eficiência da taxa de remoção de material. Todavia, o resultado do estudo mostrou que a estratégia de desbaste HPC quando aplicada a substratos de resinas poliméricas potencializa a geração de lascamentos durante a usinagem. Os materiais Necuron® 651 e Ren Shape® 460 não apresentaram diferenças significativas durante os experimentos. Quando a ferramenta de corte possui raio de canto, de acordo com os experimentos, pode atenuar os defeitos de usinagem de lascamento. Ainda, os parâmetros f_z , a_p e v_c mostraram-se os fatores mais significativos no aumento da taxa de remoção de material, sendo o a_p o parâmetro mais relevante.

Palavras-chave: Seis Sigma; DOE; Desbaste; Resina Polimérica;

1. INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade dos mercados, cada vez tem obrigado mais as empresas a inovarem no desenvolvimento de peças. Na área de serviços de prototipagem não é diferente. Nesse contexto, encaixa-se o estudo em questão ao qual teve como principal objetivo, realizar uma análise da taxa de remoção de material (Q) na etapa de desbaste de peças utilizando materiais em resina polimérica.

Pode-se entender como usinagem, toda atividade que com auxílio de uma ferramenta de corte e uma máquina ferramenta, realiza o processo de remoção de material de um bloco bruto. Dentro deste processo, é possível classificar as etapas em dois macro processos, desbaste e o acabamento (VALIM, 2018). Machado et al. (2015) afirma que dentro do processo de desbaste o principal objetivo é obter uma alta taxa de remoção de material, deixando uma camada de material sobressalente chamado de sobremetal, que na sequência será retirado no processo de acabamento.

O conceito HPC, é um método inovador e relativamente recente, sendo estudado desde meados dos anos 2000. Para Tonshoff HK (2011), tem como principal objetivo promover uma usinagem com altas taxas de remoção de material, se mostrando, acima de tudo, indicado para operações de desbastes. A redução do tempo de usinagem é pretendida através da aplicação de maiores taxas de avanço com a devida consideração do desgaste da ferramenta e da qualidade da superfície da peça usinada (UHLMANN, 2010). Porém, o emprego de condições que resultem em altas velocidades de corte, são, muitas vezes, limitadas pela capacidade tecnológica das máquinas (CIRP, 2014).

Segundo Moen (1999), o Delineamento de experimentos (DOE) é uma técnica bem estruturada que visa estudar qualquer situação na qual envolvem variáveis independentes, que influenciam em uma determinada variável resposta. Sendo uma ferramenta desenvolvida para resolver problemas complexos onde mais de uma variável independente podem afetar a variável resposta e duas ou mais variáveis podem interagir entre elas. Os dados coletados de um experimento planejado podem ser analisados estatisticamente para determinar o efeito das variáveis independentes ou combinações de mais de uma variável independente (PYZDEK; KELLER, 2010). Quando a análise do delineamento de experimento é executado por software de análise estatística, como por exemplo, Minitab®, alguns gráficos são utilizados como recurso avaliativo, são eles, gráfico de pareto dos efeitos padronizados, gráfico de probabilidade normal e o gráfico dos efeitos principais.

O gráfico de pareto dos efeitos padronizados é usado para interpretar os resultados obtidos no delineamento de experimentos. Neste gráfico o interesse é observar os fatores individualmente, os quais serão representados por letras, sendo as letras sozinhas os fatores individuais e as combinações de letras, as interações de ordens mais altas. Os fatores que ultrapassam a linha pontilhada, são considerados estatisticamente significativos (NEVES, 2013).

O gráfico de probabilidade normal é uma ferramenta estatística que busca verificar a validade da suposição de que a amostra de interesse tenha sido extraída de uma distribuição normal (ALBIERO et al., 2012). O Minitab® usa uma abordagem para o gráfico de probabilidade normal que transforma o eixo Y vertical de uma maneira especial para que, se os dados forem distribuídos normalmente, um gráfico dos dados do menor para o maior seguirá uma linha reta, explica Levine (2006).

O estudo em questão, visa a utilização da ferramenta de delineamento de experimentos fatorial fracionado, a fim de obter, através de uma abordagem estatística e experimental, entender a significância das diferentes estratégias de desbaste comparando dois diferentes materiais compósito com matriz polimérica (Necuron® 651 e Ren Shape® 460) a fim de obter a maior taxa de remoção de material (Q) sem impactar na qualidade final da peça.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. Materiais Utilizados

As usinagens foram executadas em um centro de usinagem da marca Hartford, modelo VMC 1370 com um comprimento de trabalho de 1280 mm na direção X, 630 mm na direção Y e 635 mm na direção Z, tamanho de mesa de 1370 mm em X e 700 mm em Y. A máquina dispõe de uma capacidade de potência de 28,5 kW e possui um limite de rotação de 12.000 rpm. Utiliza cone padrão BT40 e é equipada com um comando CNC Mitsubishi HARTROL-M7200.

Visto que a experimentação se dá sobre a operação de desbaste e considerando o tipo de ferramenta que empiricamente já é utilizada para realização de desbaste no laboratório, escolheu-se uma ferramenta de diâmetro de 16 mm com duas arestas cortantes de metal duro com perfil de topo reto e sem cobertura, classe 600, fixada com 60 mm para fora do cone. Segundo Toh (2004) para processo de usinagem de desbaste, geralmente é empregada ferramenta de corte de perfil reto devido a uma maior eficiência de remoção de material. Com o intuito de alcançar melhores níveis de acabamento da peça gerada, foi considerado adicionar ao estudo uma ferramenta com raio de canto de 2 mm e com as mesmas configurações que a ferramenta de topo reto, uma vez que o material compósito polimérico é mais propenso a sofrer lascamentos durante a usinagem (LANZ et al., 2002).

Como um dos fatores que integram o estudo é o material do substrato, os corpos de prova serão compostos pelos materiais Necuron® 651 e Ren Shape® 460, de acordo com a sequência de experimentação planejada.

A criação e transcrição dos códigos NC onde encontram-se as trajetórias percorridas pela ferramenta e os códigos de funcionamento da máquina, realizou-se com auxílio da plataforma de manufatura auxiliada por computador (CAM) do software de engenharia Creo parametric 7.0 e foram pós-processadas para posterior leitura no comando CNC Mitsubishi.

Na Figura 1, nota-se o formato da geometria da peça, contendo os detalhes de ressaltos, rebaixos e regiões arredondadas. Verifica-se ainda o volume de 1626080 mm³ referente ao bloco bruto, o volume de 328203 mm³ referente a peça final e as dimensões máximas do bloco.

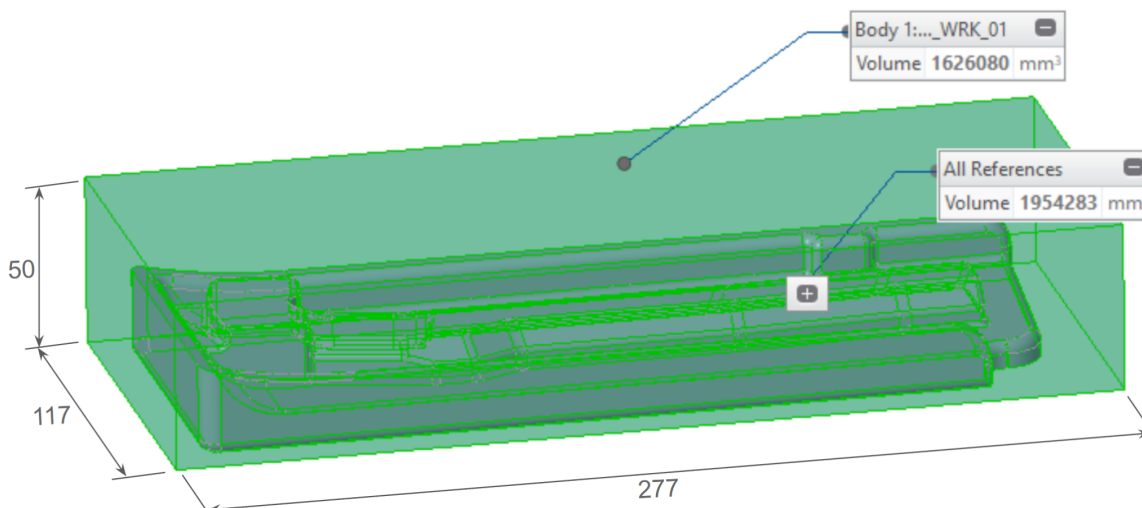


Figura 1. Geometria da peça escolhida (próprio autor)

As dimensões máximas da peça são 277 mm no sentido de X, 117 mm no sentido de Y e 50 mm no sentido de Z. Na qual há a necessidade, baseado no desenho matemático da peça, da retirada volumétrica de material de 1297878 mm³ no processo de desbaste. Este valor é obtido através da subtração do volume referente ao bloco bruto pelo volume referente a peça final.

2.2 Estratégia de usinagem

De acordo com Fernandes et al. (2007) existem muito poucos estudos desenvolvidos de usinagem com materiais poliméricos e com o advento dos compósitos poliméricos e plásticos de engenharia, as empresas passaram a adaptar-se a estes materiais de forma empírica. Neste contexto, a estratégia de usinagem empregada no laboratório onde os testes ocorreram é o que pode-se considerar estratégia convencional de desbaste, onde é utilizado um maior aporte de penetração de trabalho (a_e), sendo geralmente de 50% a 80% do diâmetro da ferramenta, e um menor aporte de profundidade de corte (a_p). E esta é a estratégia de desbaste mais comum encontrada nos *softwares* comerciais de CAM (*computer aided manufacturing*). Entretanto, devido a estudos conduzidos neste âmbito, alguns *softwares* já estão disponibilizando uma tecnologia de estratégia de usinagem que se aproxima do conceito de Usinagem de alta velocidade (HSM) e que logo, pode ser adaptada para a utilização de Usinagem de Alta Performance (HPC).

A utilização de usinagem de alta performance consiste em promover a alta remoção de material e minimizar ao máximo o tempo de desbaste das peças (BUREK et al. 2018). Quando aplicado o conceito de Usinagem de Alta Performance (HPC) especialmente em materiais com baixa dureza é possível atingir maiores taxas de remoção de cavaco empregando maiores aportes radiais e axiais (DENKENA et al. 2018).

O que irá determinar se faz sentido utilizar os conceitos de HSM ou HPC, é uma combinação de fatores como custo envolvido, taxa de produção, eficiência energética e de recursos, e lucratividade (NEUGEBAUER et al. 2011). Os valores ótimos de parâmetros de corte como profundidade de corte (a_p) e (a_e), velocidade de corte e outros, irão definir a maior taxa de produtividade (CIRP, 2014).

2.3 Variáveis de processo

Foi evidenciado que os operadores do laboratório utilizavam para a usinagem do compósito polimérico, velocidade de corte de 250 m/min, avanço por aresta de 0,5 mm/aresta, profundidade de corte de 3 mm e penetração de trabalho de 8 mm. A ferramenta utilizada é uma fresa de perfil reto, com diâmetro de 16 mm e duas arestas cortantes. Este histórico de informações se faz importante, a fim de entender de que maneira as variáveis do processo podem ser manipuladas, compreendendo assim, os efeitos de cada uma.

Estes incrementos possuem uma influência direta na taxa de remoção de material (Q) a qual está apresentada na Eq. 1 (DINIZ et al. 2006).

$$Q = V_f \cdot a_p \cdot a_e \quad (1)$$

Machado et al. (2015) destaca que como parâmetros de saída e métodos de avaliação de desempenho, é possível listar alguns indicadores, sendo um deles a taxa de remoção de material a qual será estudado com auxílio da ferramenta de delineamento de experimentos dentro da metodologia seis sigma.

2.4 Delineamento de experimentos fracionado

Quando o experimento planejado se trata de um fatorial fracionado, isso significa que será possível estudar mais fatores no mesmo experimento com menos rodadas, pois os investigadores escolhem realizar uma fração dos ensaios do experimento fatorial completo, porém, resultará no confundimento dos efeitos estudados com as interações.

Como o experimento se trata de DOE fracionado com 7 fatores e 2 níveis, é apresentado na Tab. 1 os mesmos.

Tabela 1. Fatores e níveis selecionados para o experimento (próprio autor)

Fator	Fator estudado	Nível -	Nível +
A	Estratégia de Desbaste	Tradicional	HSM
B	Raio de canto da Ferramenta	0 mm	2 mm
C	v_c - Velocidade de corte	250 m/min	400 m/min
D	f_z - Avanço por aresta	0,3 mm	0,6 mm
E	a_e - Penetração de trabalho	8 mm	10 mm
F	a_p - Profundidade de corte	3,5 mm	8 mm
G	Material	651	460

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos experimentos, analisou-se o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados e o gráfico de probabilidade normal na Fig. 2. A ultrapassagem das barras que representam os efeitos dos fatores F, D, C e E, profundidade de corte, avanço por aresta, velocidade de corte e penetração de trabalho respectivamente, da linha tracejada, representa a magnitude da significância de cada um dos efeitos, sendo o F (a_p) o mais significativo. No gráfico de normal dos efeitos, os fatores próximos a linha não são significantes, uma vez que estão dentro de uma distribuição normal, porém os demais que destoam desta linha mostram sua significância.

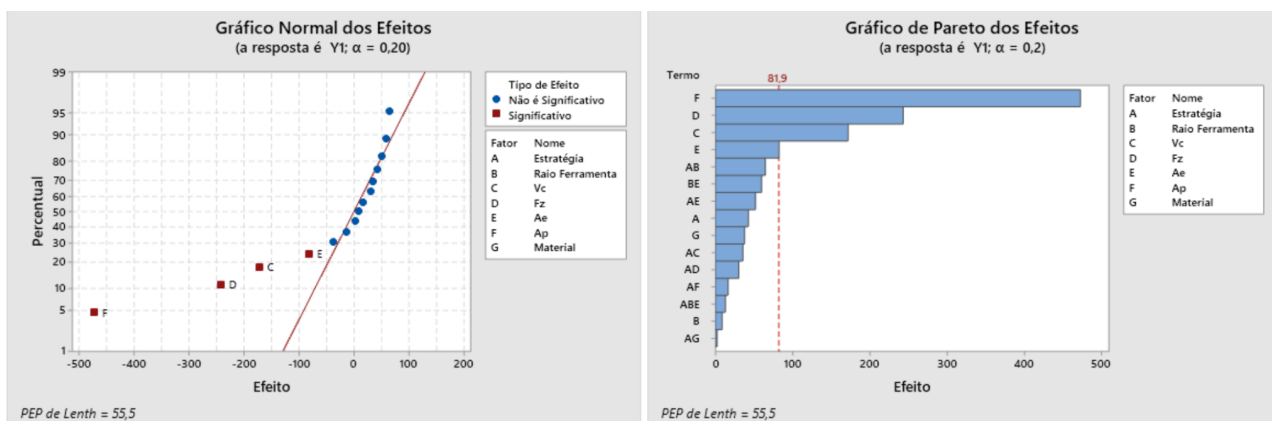


Figura 2. Gráfico normal dos efeitos (esquerda) e gráfico de pareto dos efeitos (direita) (próprio autor)

Como recurso de avaliação gráfica, é possível avaliar o impacto dos efeitos de cada fator através do gráfico dos efeitos principais, o qual, por meio da inclinação da reta, é revelado a magnitude de cada efeito. Este gráfico pode ser observado na Fig. 3, onde traz o fator a_p predominantemente maior do que os outros fatores.

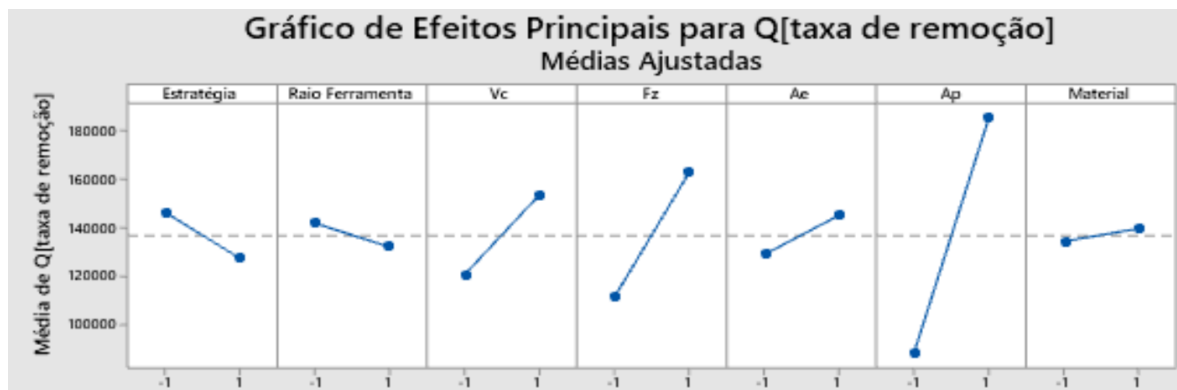


Figura 3. Gráfico de Efeitos Principais sobre a taxa de remoção de material Q (próprio Autor)

A profundidade de corte destacou-se no gráfico de efeitos principais como sendo o fator mais relevante para o aumento da taxa de remoção de material, pois a diferença entre o nível -1 e 1 é a maior dentre os outros fatores. Juntamente com o a_p , os fatores a_e , f_z e v_c também demonstraram que influenciam para o aumento de Q , sendo então parâmetros diretamente proporcionais, conforme equação teórica. No entanto, mesmo os parâmetros a_p e a_e sendo ambos proporcionais ao aumento de Q . Os mesmos demonstraram efeitos de magnitudes diferentes, isso devido a diferença entre os intervalos de um nível a outro, seria esperado que o fator que tem um intervalo maior entre níveis obtivesse um efeito maior. Ainda comparando com a teoria, a ferramenta de corte obtém uma taxa de remoção máxima quando a ferramenta é de topo reto e não possui raio de canto (TOH, 2004). A estratégia de usinagem, ao contrário do que se esperava, diminuiu a taxa de remoção quando aplicado o conceito HPC. Pelo fato desta estratégia utilizar de maior número de desvios e mudanças de trajetória da ferramenta durante a usinagem, Helleno e Schutzer (2003) atribuem essa perda de eficiência da usinagem a diferença entre o avanço programado e o avanço real da máquina, ou seja, as limitações dinâmicas da máquina ferramenta. Monaro (2011) conclui que o comportamento dinâmico da máquina ferramenta tem influência direta no tempo de execução da usinagem, sendo aceleração, desaceleração, inclinação no segmento da trajetória, fatores que afetam diretamente a eficiência da predição teórica dos tempos de usinagem. Por fim, o material do substrato mostrou-se ser o fator com menor influência na taxa de remoção de material.

Conforme evidenciado em estudos anteriores, segundo Volpato e Derenievicki (2005), Oliveira et al (2010) e Derenievicki (2007), o defeito de usinagem de lascamento é característico da usinagem de materiais tais como resinas poliméricas. A fim de realizar uma classificação atributiva dos corpos de prova, foram separadas amostras aprovadas, reprovadas e retrabalhadas, onde as peças aprovadas seriam amostras onde o lascamento não ocorreu, as peças reprovadas seriam as amostras em que os lascamentos aconteceram em uma escala maior do que o sobre material deixado na programação (1 milímetro), e as peças classificadas como retrabalhada, seriam as amostras as quais os lascamentos ocorreram, porém, foram menor do que o sobre material. Como exemplos de peças aprovada, retrabalhada e reprovada observa-se a Fig. 4, ao qual é possível notar que em algumas situações, a peça ficou extremamente danificada, impossibilitando seu uso.

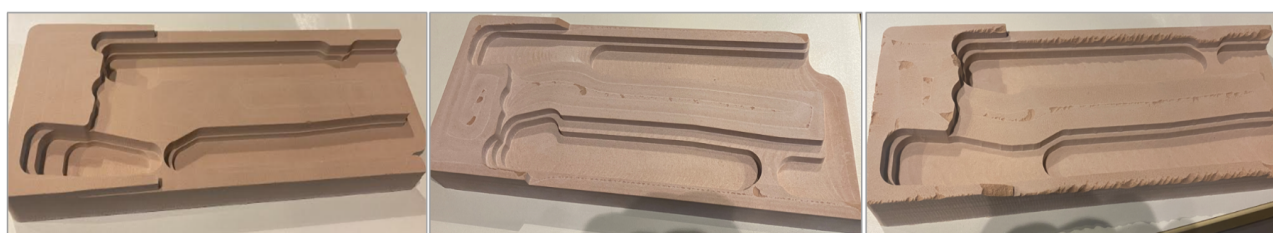


Figura 4. Nível qualitativo da peça gerada, aprovada (esquerda), retrabalhada (meio), reprovada (direita) (próprio autor)

De todas as 16 amostras geradas, 8 delas foram aprovadas, 4 foram descartadas e 4 foram retrabalhadas. Apesar disso, pode-se ver que das primeiras 4 peças do experimento, ao qual a taxa de remoção obteve melhores resultados, somente uma foi aprovada. O resultado qualitativo em comparação com o quantitativo pode ser visto na Tab. 2.

Um importante fato é que o fator F (a_p), ao qual obteve a maior significância do estudo levando em consideração taxa de remoção e tempo, obteve bons resultados de qualidade tanto no nível 1 quanto no nível -1, ou seja, apesar de relevante para tal saída qualitativa, o fato de puramente diminuir ou aumentar o fator a fim de obter-se um menor lascamento passa a ser uma análise superficial da resolução do problema pois, além de diminuirmos a taxa de remoção, não mostra-se como sendo o único, nem o maior fator de impacto na qualidade da peça.

Tabela 2. classificação de aprovação geral (próprio Autor)

Estratégia	Raio Ferramenta	v_c	f_z	a_e	a_p	Material	Y1 (Minutos)	Qualidade	Q (mm ³ / min)
-1	-1	1	1	-1	1	1	4,87	Descartada	266687,26
-1	-1	-1	1	1	1	-1	5,55	Aprovada	233851,89
1	1	1	1	1	1	1	5,57	Retrabalhada	233151,74
-1	1	1	-1	1	1	-1	6,93	Descartada	187193,94
1	1	-1	1	-1	1	-1	8,15	Aprovada	159248,83
1	-1	1	-1	-1	1	-1	8,98	Retrabalhada	144476,22
1	-1	-1	-1	1	1	1	9,37	Descartada	138563,49
-1	1	-1	-1	-1	1	1	10,75	Aprovada	120732,84
-1	1	1	1	-1	-1	-1	11,55	Aprovada	112370,39
1	-1	1	1	1	-1	-1	11,75	Descartada	110457,7
-1	1	-1	1	1	-1	1	13,32	Aprovada	97462,68
-1	-1	1	-1	1	-1	1	14,13	Aprovada	91830,99
1	-1	-1	1	-1	-1	1	14,72	Retrabalhada	88191,03
1	1	1	-1	-1	-1	1	16,45	Aprovada	78898,36
1	1	-1	-1	1	-1	-1	19,58	Aprovada	66274,62
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	21,73	Retrabalhada	59718,31

Como peças descartadas não poderão ser utilizadas, resolveu-se por excluir as mesmas das prováveis melhores respostas. Peças que necessitam ser retrabalhadas também foram descartadas já que torna-se necessário adicionar o tempo do retrabalho o que aumentaria significativamente o tempo de entrega total, focando o estudo somente nas peças aprovadas como respostas válidas para a continuidade do mesmo.

Com o objetivo de facilitar as análises, decidiu-se por criar a Tab. 3 excluindo os resultados que não seriam considerados no final.

Tabela 3. Peças Aprovadas (próprio Autor)

Estratégia	Raio Ferramenta	v_c	f_z	a_e	a_p	Material	Y1 (Minutos)	Qualidade	Q (mm ³ / min)
-1	-1	-1	1	1	1	-1	5,55	Aprovada	233851,89
1	1	-1	1	-1	1	-1	8,15	Aprovada	159248,83
-1	1	-1	-1	-1	1	1	10,75	Aprovada	120732,84
-1	1	1	1	-1	-1	-1	11,55	Aprovada	112370,39
-1	1	-1	1	1	-1	1	13,32	Aprovada	97462,68
-1	-1	1	-1	1	-1	1	14,13	Aprovada	91830,99
1	1	1	-1	-1	-1	1	16,45	Aprovada	78898,36
1	1	-1	-1	1	-1	-1	19,58	Aprovada	66274,62

Como pode-se notar, o melhor resultado em termos de qualidade e taxa de remoção utilizou a estratégia de desbaste (fator A) no nível -1 (Volume Rough), raio da ferramenta (fator B) no nível -1 (ferramenta com raio 0mm), v_c (fator C) no nível -1 (250 m/min), f_z (fator D) no nível 1 (0,6 mm/aresta), a_e (fator E) no nível 1 (10mm), a_p (fator F) no nível 1 (8mm) e material (fator G) no nível -1 (Ren Shape® 460).

Dessa maneira, avaliou-se todos os fatores, levando a significância estatística e prática observada nos Gráficos de Probabilidade Normal e Pareto, a fim de definir a melhor combinação de fatores e assim, levar para uma análise final de comparação entre fatores novos e os utilizados anteriormente. Nota-se que alguns dos fatores aparentemente possuem um impacto qualitativo, ao qual optou-se por realizar uma avaliação prática a fim de reduzir o impacto nesse quesito.

A tabela 4 apresenta a definição utilizada bem como o motivo de tal decisão.

Tabela 4. Definição de níveis para testes finais (próprio Autor)

Fator	Nível	Motivo
A - Estratégia	Volume Rough	Melhores resultados de taxa de remoção e impacto em qualidade.
B - Raio Ferramenta	0 mm	Melhores resultados de taxa de remoção e com resultados de qualidade boa.
C - v_c	250 m/min	Fator significativo que obteve resultados melhores de taxa de remoção quando no nível 1. Apesar disso, possui um impacto maior em qualidade do que em tempo, fazendo a opção por seu valor em 250 m/min.
D - f_z	0,6 mm/aresta	Alto impacto na taxa de remoção e com as duas melhores respostas de qualidade.
E - a_e	10 mm	Impacto mediano na taxa de remoção e qualidade. Optou-se por levar em consideração o que obteve o melhor resultado.
F - a_p	8 mm	Alto impacto na taxa de remoção e com boas respostas quanto à qualidade. Fator mais significativo da análise realizada e que impacta significativamente no resultado da taxa de remoção.
G - Material	Indiferente	Resultado não teve impacto na taxa de remoção e a princípio não possui impacto na qualidade da peça, tendo obtido bons resultados em ambos os materiais.

Com o objetivo de realizar uma avaliação final e confirmar na prática a significância dos fatores escolhidos e aos parâmetros encontrados com melhores resultados, optou-se por realizar uma análise de comparação entre os parâmetros utilizados anteriormente e os parâmetros futuros, a fim de verificar o ganho em tempo de máquina para o processo de desbaste em tais resinas poliméricas.

Para as conclusões de ganho, utilizaram-se duas peças diferentes. A primeira delas foi a validada no DOE, ao qual optou-se por realizar uma nova rodada fixando os parâmetros tidos como os melhores para comparação com o modelo antigo. A segunda peça pode ser vista na Fig. 5.

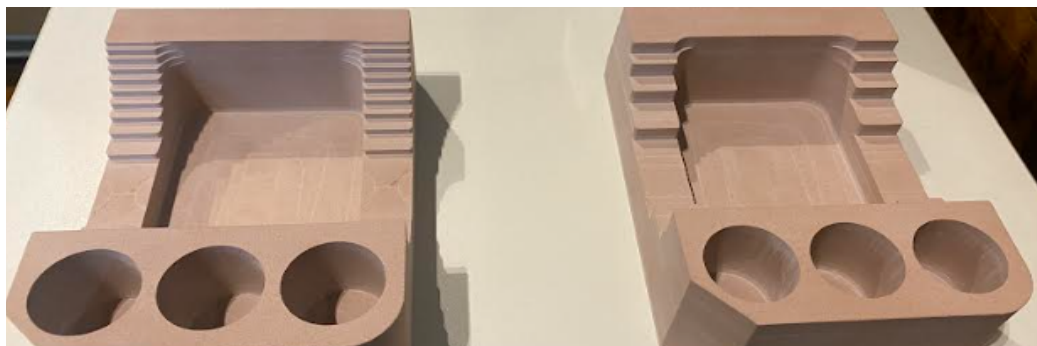


Figura 5. Comparação entre peças com parâmetros antigos (esquerda) e novos (direita) (próprio Autor)

Nota-se que ambas as peças possuem diferentes características críticas para o processo de usinagem para que assim fosse possível testar os resultados experimentais e sua qualidade no extremo da complexidade.

Em ambas as peças, notou-se que a qualidade dos parâmetros antigos em comparação com os novos, foi exatamente a mesma. A diferença entre elas é proveniente do incremento (a_p) utilizado, ao qual criou-se um degrau maior, como

podemos ver na Fig. 5. Apesar disso, essa diferença não foi vista como um possível problema, já que a peça ainda passaria pelo processo de acabamento final, ao qual o material em excesso seria removido.

Pode-se ver através da Tab. 4 que os resultados finais obtiveram um ganho satisfatório. Para a peça 1, obteve-se 55% de ganho, já para a peça 2, o ganho obtido foi de 49% no aumento da taxa de remoção de material Q.

Tabela 5. Comparação entre parâmetros antigos e novos. (próprio Autor)

Peça	Q com parâmetros antigos (mm ³ /min)	Q com parâmetros novos (mm ³ /min)	Ganho (%)
Peça 1	119.257	268.545	55%
Peça 2	77.254	151.798	49%

4. CONCLUSÕES

Para a análise da variável resposta Q a ordem de magnitude dos efeitos significantes foram do fator F profundidade de corte (a_p), fator C velocidade de corte (v_c), D avanço por aresta (f_z) e E penetração de trabalho (a_e). Sendo que o fator F (a_p) foi predominantemente mais significativo do que os efeitos dos outros fatores devido estar diretamente relacionado à equação da taxa de remoção de material, este é responsável pela maior fração de aumento da taxa Q. Isso se deve ao intervalo entre os níveis para o fator a_p que foi bem alto, passando de 3,5 mm para 8 mm. Este aumento não seria factível para aços e demais materiais mais duros, no entanto, se tratando de resina polimérica como material de substrato, foi possível explorar níveis bem mais altos de profundidade de corte.

O fator A estratégia de usinagem diminuiu a taxa de remoção quando aplicado o conceito HPC. devido ao maior número de desvios e mudanças de trajetória da ferramenta durante a usinagem, a aceleração, desaceleração, inclinação no segmento da trajetória, afetam diretamente a eficiência da predição teórica dos tempos de usinagem.

A diferença entre os dois materiais de substrato foi muito pequena com relação à variável resposta Q e obteve-se amostras aprovadas nos dois materiais.

Apesar de comprovadamente, ferramentas de perfil reto obterem uma taxa de remoção de material maior, o estudo evidenciou uma melhora na diminuição do fenômeno de lascamento conforme usava-se ferramenta com raio de canto de 2 mm.

Conclui-se que a mudança de parâmetros para a etapa de desbaste de resinas poliméricas foi satisfatória e com um ganho significativo em razão do tempo. Estima-se que, no mínimo, ter-se-á um ganho de 40% para qualquer tipo de peça realizada com o material, independente de sua complexidade e detalhamento.

Como próximos estudos, entende-se necessário realizar uma avaliação mais aprofundada quanto ao nível de qualidade aceitável para a etapa de desbaste, tendo em vista que as peças finais, tiveram como premissa um desbaste perfeito, ou seja, sem lascas ou áreas danificadas. Nesse quesito, por conta do sobremetal utilizado, pode-se trabalhar com uma margem de lascamento ao qual no processo de acabamento final seria eliminada. Isso propicia um ganho ainda maior, tendo em vista que os parâmetros podem ser extrapolados atingindo um menor tempo de execução da peça e consequentemente uma maior taxa de remoção.

4. REFERÊNCIAS

- Albiero, Daniel et al. Gráficos de probabilidade normal para avaliação de mecanismos de distribuição de sementes em semeadoras. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 2012, n. 332, p. 507-518, abr. 2012. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445744112008>. Acesso em: 21 jun. 2022.
- Burek, Jan et al. The influence of the cutting edge shape on high performance cutting. *Aircraft Engineering And Aerospace Technology*. Rzeszow, p. 134-145. out. 2018.
- CIRP, 2014, Paris. CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Paris, Fr: Springer, 2014.
- Denkena, B. et al. Hybrid spindle - An approach for a milling machine tool spindle with extended working range for HSC and HPC. In: 4th international conference on system-integrated intelligence, 4., 2018, Hannover. *Procedia Manufacturing*. Hannover: Elsevier, 2018. p. 159-165.
- Derenievicki O. F. Procedimento para Testar Resinas Poliméricas para a Fabricação de Moldes-Protótipo Usinados. (Dissertação de Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e PósGraduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM. Curitiba, 2007.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo, Artliber, 2006.
- Fernandes, Marcello Oliver et al. Usinagem de plásticos de engenharia. Uma opção de processamento. 2007, Anais.. São Carlos: ABpol, 2007. . Acesso em: 27 jun. 2022.
- Lanz, R. W., Melkote, S. N., Mahesh, A. K. Machinability of rapid tooling composite board. *Journal of Material Processing Technology*, no576, p. 1-4, 2002.
- Levine, David M. Statistics for Six Sigma Green Belts: with minitab® and jmp. Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2006.
- Machado, Álisson R. et al. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Blucher, 2015.
- Moen, R.D.; Nolan, T.W.; Provost, L.P. Quality improvement through planned experimentation. McGraw-Hill, 1999
- Monaro, Renato Luis Garrido. Avaliação de estratégias de usinagem na manufatura de superfícies complexas considerando as características dinâmicas da máquina-ferramenta. Mostra Acadêmica Unimep. Piracicaba, p. 10-16. nov. 2011.
- Neugebauer R, Drossel W-G, Pagel K, Bucht A, Anders N (2011) Design of a controllable shape memory- actuator with mechanical lock function. In: Ghasemi-Nejhad MN (ed); Active and passive smart structures and integrated systems V : 6–10. März 2011. – San Diego Bellingham, WA : SPIE, 2011 (Proceedings of SPIE 7977, 797719).
- Neves, Helaine P. Influência da variação dos parâmetros do processo de eletroerosão por penetração no desgaste do eletrodo e na produtividade no desgaste do aço inoxidável 304 e do iniconel 718. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Itatiaia. (Anais) Itatiaia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2013.
- Oliveira C.A.M, Veroneze T., Araújo, M.A, Del Pino, G.G: Teste de usinabilidade de compósitos de epóxi e alumínio em cnc correlacionando parâmetros de corte a rugosidade superficial média ra e a defeitos por meio de superfície de resposta. VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Paraíba, 2010
- Pyzdek, Thomas; Keller, Paul. The Six Sigma Handbook: a complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels. 3. ed. San Francisco: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010.
- Toh, C.K.. Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mold and die materials. *Materials And Design*. Birmingham, p. 517-533. jul. 2004.
- Tonshoff, H. K. Cutting, fundamentals. *Encyclopedia of production engineering*. Springer, Heidelberg, 2011.
- Uhlmann E, Wacinski M (2010) Development and test of monolithic ceramic end milling cutters for high speed machining of nickel-based alloys. In: Aoyama T, Takeuchi Y (eds) Proceedings of the HPC2010, 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Gifu, Japan.
- Valim, D. B. . Usinagem. 01. ed. Porto Alegre: Sagah, 2018.
- Volpato, N.; Derenievicki O. F. Uma análise da usinagem de resinas para ferramental rápido. 2005.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STUDY OF OPTIMIZATION OF PARAMETERS FOR ROUGH MILLING OF POLYMER COMPOSITES THROUGH DOE FRACTIONAL FACTORIAL EVALUATION

Gustavo Maia Arnaud

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, R. Pavão, 1377 - Costa e Silva, Joinville - SC, 89220-618
gustavo.maiaag@gmail.com

Daniel Gomes Videira

Universidade Federal de Santa Catarina, R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade, Florianópolis - SC, 88040-900
daniel.gvideira@gmail.com

Ivandro Bonetti

Anael Preman Krelling

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, R. Pavão, 1377 - Costa e Silva, Joinville - SC, 89220-618
ivandro@ifsc.edu.br
anael.krelling@ifsc.edu.br

Abstract: The use of tools from the six sigma methodology, such as DOE (Design of Experiment), contributes to the analysis of the significance of the factors involved in rough machining of polymeric resins, such as machining strategy, tool corner radius, substrate material and cutting parameters (v_c , f_z , a_p and a_e) against the material removal rate response variable (Q). The objective of the study proposed the realization of machining tests using two types of raw material from composite material with polymeric matrix (Necuron® 651 and Ren Shape® 460), aiming to improve the parameters empirically used in the industry, considering the application of High Performance Machining (HPC) concepts as a machining strategy, taking into account the impact on chipping surface defects, promoted by changing cutting parameters. The case study itself used statistical graphic analysis such as the Pareto chart of standardized effects, normal probability chart and main effects charts obtained through a fractional factorial DOE with 7 factors and 2 levels aiming at the regression model linear to evaluate the response variable removal rate (Q). From the use of a response optimizer with Minitab® software, it was possible to define the optimized combination of parameters, within the inference space of the study, which led to the elaboration of an empirical characterization that maximized the result of the removal rate. The analysis and discussion of the results showed a difference between the values of the removal rate obtained experimentally compared to the theoretical values, indicating the interoccurrence of external factors that influence the efficiency of the material removal rate. However, the result of the study showed that the HPC roughing strategy when applied to polymeric resin substrates potentiates the generation of chipping during machining. The materials Necuron® 651 and Ren Shape® 460 did not show significant differences during the experiments. When the cutting tool has a corner radius, according to the experiments, it can mitigate chipping machining defects. Also, the parameters f_z , a_p and v_c were the most significant factors in increasing the material removal rate, with a_p being the most relevant parameter.

Keywords: Six Sigma; DOE; Rough milling; Polymeric Resin;

RESPONSIBILITY NOTICE

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