

## **TESTE DE USINABILIDADE DE COMPÓSITOS DE EPÓXI E ALUMÍNIO EM CNC CORRELACIONANDO PARÂMETROS DE CORTE A RUGOSIDADE SUPERFICIAL MÉDIA $R_a$ E A DEFEITOS POR MEIO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

**Carlos Alberto Mendes Oliveira<sup>1</sup>, carlosalberto@cefetam.edu.br**

**Tiago Veroneze<sup>2</sup>, tiagovero@hotmail.com.br**

**Márcia Silva de Araújo<sup>2</sup>, araujo@utfpr.edu.br**

**Gilberto Garcia del Pino<sup>3</sup>, ggdelpin@usp.br**

<sup>1</sup>IFAM, Av. Sete de Setembro 1975, Centro, Manaus-AM/Brasil CEP 69075-350

<sup>2</sup>UTFPR, Av. Sete de Setembro 3165, Rebouças, Curitiba-PR/Brasil CEP 80230-901

<sup>3</sup>UEA-EST, Av. Darcy Vargas 1200, Parque Dez, Manaus-AM/Brasil CEP 69050-020

**Resumo:** É importante testar os parâmetros do processo de usinagem ( $V_c$ ,  $a_p$ ,  $f_z$ ) concomitante com outras qualidades como rugosidade superficial aritmética ( $R_a$ ) e Defeitos (Score) no material submetidos ao corte obtendo inferência destas variáveis observadas nos ensaios dos compósitos processado recentemente, destacando para tal fim o compósito particulado de material polimérico reforçado com metal mais agente de cura, na composição final. E igualmente analisar os eventos quantitativos e qualitativos gerados na tríade peça x ferramenta x ambiente, destacando a rugosidade superficial média ( $R_a$ ) e defeitos (Score) quando do percurso da ferramenta de corte (fresa) na usinagem desses materiais, também equiparados com outros materiais já consolidados, bem como assegurar o uso deste compósito na cadeia de manufatura. O presente estudo fracionado de um projeto mais amplo se propõe a realizar testes de usinabilidade a seco nestes compósitos em processo de fresamento CNC ancorados nas tecnologias CAD/CAM, no que tangem aos resultados aferidos consistir em utilização na confecção de moldes protótipos já em pesquisas na UTFPR. Assim os objetivos preliminares dos testes foram determinar geometria dos corpos de prova, aferir, simular, selecionar e ensaiar os parâmetros de usinabilidade e para tanto foram correlacionados os seguintes parâmetros dependentes: rugosidade superficial média ( $R_a$ ) e Defeitos (Score), obtidos depois das peças fresadas; aos parâmetros de usinagem: velocidade de corte ( $V_c$ ); avanço por dente ( $f_z$ ); profundidade de corte ( $a_p$ ) e propriedades de dureza (Shore); tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) e tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) destes materiais compósito, no evento de análises dos resultados de corte utilizando valores aleatórios dos parâmetros. Portanto foi proposto um modelo matemático por meio de regressão multivariável não linear de superfície de resposta utilizando o programa Statistica.

**Palavras-chave:** Usinabilidade de Compósito, Fresamento CNC, Modelo Matemático.

### **1. INTRODUÇÃO**

Yang e Ryu (2001) apresentaram o desenvolvimento de um material compósito aceitável para auxiliar a prototipagem rápida, nela foram feitos testes das propriedades mecânicas. De modo a testar a sua aplicação para a fabricação de molde protótipo o material foi usinado em *HSM (High Speed Machining)*. No molde bipartido foi feita a injeção de uma hélice com o próprio compósito, no artigo são feitas sugestões de correções dos defeitos de processamento do compósito. Da mesma forma materiais comerciais vem sendo testados para a fabricação de insertos em moldes metálicos para a injeção de plástico na UTFPR, nos trabalhos de Richter *et al.* (2003), Volpato *et al.* (2003) e Derenievicki (2007). Nestes trabalhos o campo de aplicação e as potencialidades da usinagem de materiais para insertos empregando tecnologia CNC e sistemas CAM (*Computer Aided Manufacturing*) como alternativa ao Ferramental Rápido são estudados. Em paralelo, na mesma universidade também tem se pesquisado o desenvolvimento de um compósito de epóxi e pó de alumínio (Serafim *et al.* (2006) e Veroneze *et al.* (2009)), uma etapa importante para a convergência destas linhas de pesquisa é o estudo da usinabilidade dos compósitos de epóxi e pó de alumínio produzidos em laboratório, o que trata este trabalho. Uma vez que os materiais compósitos já foram submetidos a vários ensaios físicos e mecânicos, tais como: densidade, rugosidade, dureza, resistência à compressão, resistência à flexão, tenacidade à fratura, o próximo desafio para estes materiais é a definição de índices médios de usinabilidade, que envolvem combinações de um conjunto de propriedades de usinagem em relação comparativa a outro material tomado como padrão tal como sugere Ferraresi (1995) e Shaw (2005). Contudo a usinabilidade do material compósito é um inter-relacionamento complexo de variáveis das propriedades do material a ser usinado com a ferramenta de corte

(fresa), dos parâmetros da máquina, do parâmetro do corte e dos parâmetros do processo Ferraresi (1995). Já nos casos específicos de peças de materiais compósitos de matriz epóxi particulado, tal como as reforçadas de alumínio, quando usinados pelo processo de fresamento *CNC* freqüentemente apresentam defeitos como: acabamentos ruins, trincas, poros e lascas com baixa resistência nos contornos e bordas e se torna quebradiço nos cantos próximos a 90° Lanz *et al.* (2002), em função de entradas e saídas da ferramenta de corte. Para analisar os resultados foram para tais fins obtidas superfícies de resposta utilizando o programa *Statistica* a partir de modelos matemáticos obtidos via regressão multivariável, tal como os estudos com fresamento de topo conduzido por Kanenobu *et al.* (2004), que acredita ser a técnica de regressão múltipla uma ferramenta para o estudo das relações entre variáveis, que pode ser implementada visando à determinação de relações entre variáveis dependentes e independentes, domínio usado para analisarem dados e gerar um modelo conforme Jenrich (1995).

Nas referências já citadas, a aquisição da velocidade de corte ( $V_c$ ) das resinas Ren Shape RS 460, RS 5166, RS Express 2000 e Lab 1000 mostradas na Tab. (1), como ferramenta de corte foi usada uma fresa de diâmetro 25 mm e rotações na faixa de 1400 a 10000 rpm, e ainda profundidades de corte ( $a_p$ ) específicas de 6 a 60 mm do desbaste para as do tipo *RS*, e ainda a resina *Lab 1000* com avanço  $f_z$  de 0,35 e 0,06 em mm/rotações, ambas para operações de desbaste e acabamento.

Tabela 1. Resinas comerciais disponíveis no mercado (Fonte: Catalogo Maxiepoxi e Axson Technologies, 2005)

Descrição do produto	Ren Shape RS 460	Ren Shape RS 5166	RS Express 2000	Lab 1000
Aplicação	Modelo padrão, protótipos e maquetes	Ferramentas para conformação e gabaritos	Moldes para injeção de termoplásticos e dispositivos	Ferramentas de estampagem
Cor	Marrom	Marfim	Cinza	Cinza
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	700 - 750	1700	1800	1670
Dureza Shore D (ASTM D-2240)	60 - 65	85 - 90	90 - 91	88 - 89
Resistência à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	20 - 25	90 -100	250 - 260	91
$V_c$ (m/min)	157,07 - 196,35	109,96 - 141,37	471,24 - 785,40	100 - 400

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Material e Composições

Composições de compósitos de matriz polimérica de epóxi carregado com alumínio em pó, entre outros componentes, já estudadas por Serafim *et al.* (2006) e Veroneze *et al.* (2009) foram disponibilizadas em forma de corpos de prova (CP) para realização dos testes de usinagem. Estas amostras em estado bruto, tal como aparece na Fig. (1) com suas respectivas composições e massas possuem dimensões aproximadas de (45x70x150) mm e geometria prismática.

Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3	Corpo de Prova 4	Corpo de Prova 5
Composição 1 10% mAl 3% EAl 5% Ac mR	Composição 2 10% mAl 3% EAl 7,5% Ac mR	Composição 3 10% mAl 3% EAl 10% Ac mR	Composição 4 15% mAl 3% EAl 10% Ac mR	Composição 5 20% mAl 3% EAl 10% Ac mR
				
Massa = 503,55 g	Massa = 487,05 g	Massa = 505,45 g	Massa = 576,85 g	Massa = 613,20 g

Siglas: mAl- massa alumínio; Eal- estearato de alumínio; Ac mR- agente de cura em massa resina

Figura 1. Corpos de prova e suas composições químicas

## 2.2. Fresamento dos Corpos de Prova

O modelo de corpo de prova para fresamento dos canais foi simulado com programa 3D no evento de planejamento conceitual para entendimento da construção do CP (corpo de prova) mostrado na Fig. (2), que contém sugestão do modelo virtual 3D, sendo que as respectivas dimensões foram geradas no aplicativo *Solid Edge*.

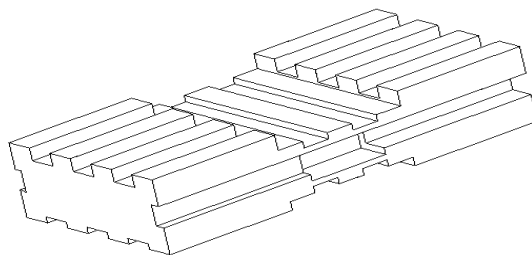


Figura 2. Modelo 3D utilizado para fresamento CNC dos canais no corpo de prova

Na programação dos locais de usinagem nos canais do CP, a primeira operação é a abertura dos ressaltos nas duas faces de fundo e topo, ambas com profundidades e larguras de (3 x 50) mm e (6,5 x 50) mm feitos na largura do CP de 70 mm. Nas próximas etapas de usinagem na parte de fundo do CP, foram construídos seis canais longitudinais de (2,5 x 10 x 50) mm para fresagem com operação adotada de acabamento tanto na parte direita quanto na esquerda do CP. Igualmente no topo na parte direita e esquerda do CP foram feitos seis canais longitudinais de (5 x 10 x 50) mm para operações de desbaste. Em outra etapa, foram construídos quatro canais transversais na parte central do CP, que aconteceu posteriormente à execução dos ressaltos em ambas as faces, na face de topo (2 x 10 x 70) mm e (4 x 10 x 70) mm, assim como na de fundo da peça dois canais (6 x 10) mm e (8 x 10) mm na mesma largura da amostra de 70 mm. Também em cada lateral 1 e 2 direito e esquerdo do CP usou-se do recurso de construir quatro canais nas duas laterais intercalados com um rasgo centralizado de alívio, todos com profundidades iguais de (8 x 10 x 50) mm.

Com a finalidade de corrigir as imperfeições deixadas pelo processo de moldagem do CP, e ainda planificar no esquadro, nivelar e alinhar, estes sofreram o processo de usinagem convencional. Na sequência os CPs foram testados em processo de fresamento CNC no Centro de Usinagem Vertical *CNC ROMI Discovery 560* equipado com *CNC GE-Fanuc 21i-M* disponibilizado em uma sala com atmosfera controlada (23°C). As informações tecnológicas da máquina são: potência de 11 KW e rotação do fuço 7500 RPM. Além disso, foi selecionada uma fresa de topo de metal duro com diâmetro 10 mm e ângulo de hélice 30° com quatro dentes de cortes (z) concêntricos, além de ser utilizada uma morsa para fixar o CP. Ainda para a centragem e o alinhamento do CP na mudança do plano de face foi preparado para usinagem um centralizador de arestas.

## 2.3. Simulação da Usinagem no Corpo de Prova em Fresamento CNC

Antes da usinagem em fresamento CNC nos corpos de prova de material compósito, também foi utilizada a simulação da usinagem com programa de interface CAM/CNC, assim sendo simulado com aplicativo *Mastercam* mostradas na Fig. 3 (a, b, c, d) para que fossem feitas correções das estratégias de usinagem ainda na programação.

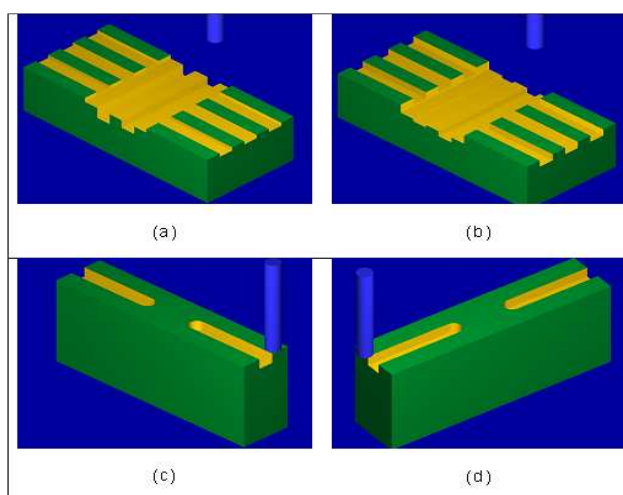


Figura 3. Modelo simulando usinagem do corpo de prova no programa *MASTERCAM*: a) fundo com acabamento: ressalto e corte transversal; b) topo com desbaste: ressalto e corte transversal; c) lado 1 e d) lado 2

## 2.4. Definição dos Parâmetros de Corte em Fresamento CNC dos Compósitos

Todos os parâmetros de corte foram definidos com valores médios aritméticos e planejamento aleatório arranjados entre si. Na Tab. (2) são encontrados os valores dos parâmetros de corte ( $V_c, f_z, a_p$ ) dos 22 canais fresados nos corpos de prova. Para usinagem com operações de desbaste e acabamento foi utilizado um valor do intervalo indicado nos catálogos de usinagem CNC de fabricante de resinas comerciais, e também fundamentados nos trabalhos de Yang e Ryu (2001), Lanz *et al.* (2002), Volpato *et al.* (2003) e Derenievicki (2007).

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados no fresamento CNC dos 22 canais nos corpos de prova

Ordem	Componente Fresado	Siglas	Operação	Parâmetros de corte		
				(m/min)	(mm/dente)	(mm)
				$V_c$	$f_z$	$a_p$
1	Ressalto topo	RT	Ressalto	120	0,0425	6,5
2	Ressalto fundo	RF		120	0,0425	3
3	Desbaste topo Canal 1	DTC1	Desbaste	90	0,01	5
4	Desbaste topo Canal 2	DTC2		90	0,07	5
5	Desbaste topo Canal 3	DTC3		90	0,13	5
6	Desbaste topo Canal 4	DTC4		90	0,19	5
7	Desbaste topo Canal 5	DTC5		90	0,25	5
8	Desbaste topo Canal 6	DTC6		90	0,28	5
9	Acabamento fundo Canal 1	AFC1	Acabamento	150	0,01	2,5
10	Acabamento fundo Canal 2	AFC2		150	0,07	2,5
11	Acabamento fundo Canal 3	AFC3		150	0,13	2,5
12	Acabamento fundo Canal 4	AFC4		150	0,19	2,5
13	Acabamento fundo Canal 5	AFC5		150	0,25	2,5
14	Acabamento fundo Canal 6	AFC6		150	0,28	2,5
15	Canal transversal 1 Topo	CT1-T	Canais Transversais	175	0,155	2
16	Canal transversal 2 Topo	CT2-T		175	0,155	4
17	Canal transversal 1 Fundo	CT1-F		175	0,155	6
18	Canal transversal 2 Fundo	CT2-F		175	0,155	8
19	Lado-1 Canal 1	L-1 C-1	Canais Laterais	175	0,02	8
20	Lado-1 Canal 2	L-1 C-2		175	0,04	8
21	Lado-2 Canal 1	L-2 C-1		175	0,08	8
22	Lado-2 Canal 2	L-2 C-2		175	0,16	8

## 2.5. Medida da Rugosidade Média Ra Após Fresamento CNC

Todos os canais usinados nos corpos de prova foram submetidos a testes de rugosidade superficial ( $R_a$ ) na unidade  $\mu\text{m}$  com o auxílio do rugosímetro portátil da marca Mitutoyo SJ 201P. As medidas foram executadas em cinco locais das superfícies usinadas dos corpos de prova para obtenção das médias das rugosidades aferidas. O método é balizado pela norma NBR ISO 4287 considerando *cut-off* pré-definido de (0,8 x 5) mm, com comprimento em toda extensão plana do corpo de prova.

## 2.6. Determinação dos Defeitos de Usinagem (Score)

De modo a inserir valores numéricos no modelo da superfície de respostas dos Defeitos de Usinagem (*Score*) e da rugosidade ( $R_a$ ), foi necessário definir pontos para os diferentes tipos de defeitos de usinagem observados nos corpos de prova, tal como apresentado na Tab. (3), no qual a soma máxima vale 10 unidades, sendo as atribuições de peso das notas empíricas de 1 a 4. Os pontos foram atribuídos com base na observação dos defeitos de quebras e lascamentos oriundos do processo de corte, função das trajetórias de entradas e saídas da fresa no corpo de prova. Para fins de

observação e registro de imagens foram utilizados como aparelhamento auxiliares: lupa manual com aumento 10x, e ainda uma máquina fotográfica digital da marca *Canon-XTi-Zoom-20x*.

### 2.7. Modelo Matemático Por Meio de Regressão Multivariável Não Linear de Superfície de Resposta Utilizando o Programa Statistica

O método de regressão multivariável não linear disponível no *StatSoft® Statistica* versão *TRIAL* (2009) apresenta para regressão no modelo a superfície de resposta ( $Y$ ) com cinco variáveis independentes contínuas  $P, Q, R, S, T$  e os seus respectivos produtos dos seus coeficientes e interseção, Eq. (1). Sendo  $b_0$  a interseção e  $b_{1, \dots, 20}$  os coeficientes dos parâmetros estimados. Nas figuras, as superfícies são acompanhadas dos modelos matemáticos já com as variáveis mais importantes codificadas.

$$Y = b_0 + b_1P + b_2P^2 + b_3Q + b_4Q^2 + b_5R + b_6R^2 + b_7S + b_8S^2 + b_9T + b_{10}T^2 + b_{11}P*Q + b_{12}P*R + b_{13}P*S + b_{14}P*T + b_{15}Q*R + b_{16}Q*S + b_{17}Q*T + b_{18}R*S + b_{19}R*T + b_{20}S*T \quad (1)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 exemplifica o efeito na usinagem dos 22 canais em cada um dos cinco corpos de prova usinados pelo processo de fresamento CNC (*PFCNC*) quando da utilização dos parâmetros de corte.

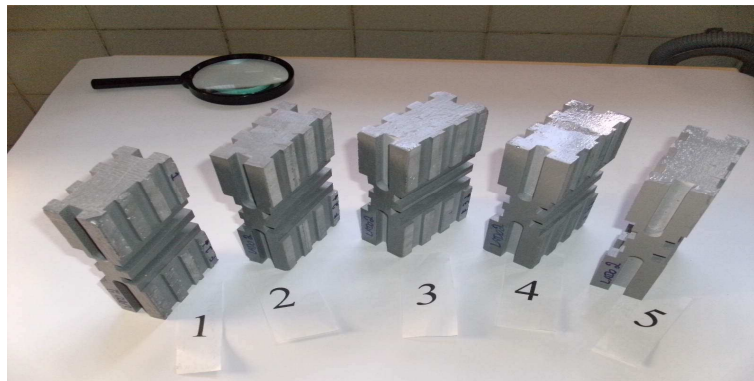


Figura 4. Exemplo dos 5 corpos de prova após usinagem *CNC*

Os resultados de rugosidade média  $R_a$  estão plotados em um gráfico mostrado na Fig. (5) que também relaciona parâmetros de corte por classe dos componentes fresados dos cinco corpos de prova.

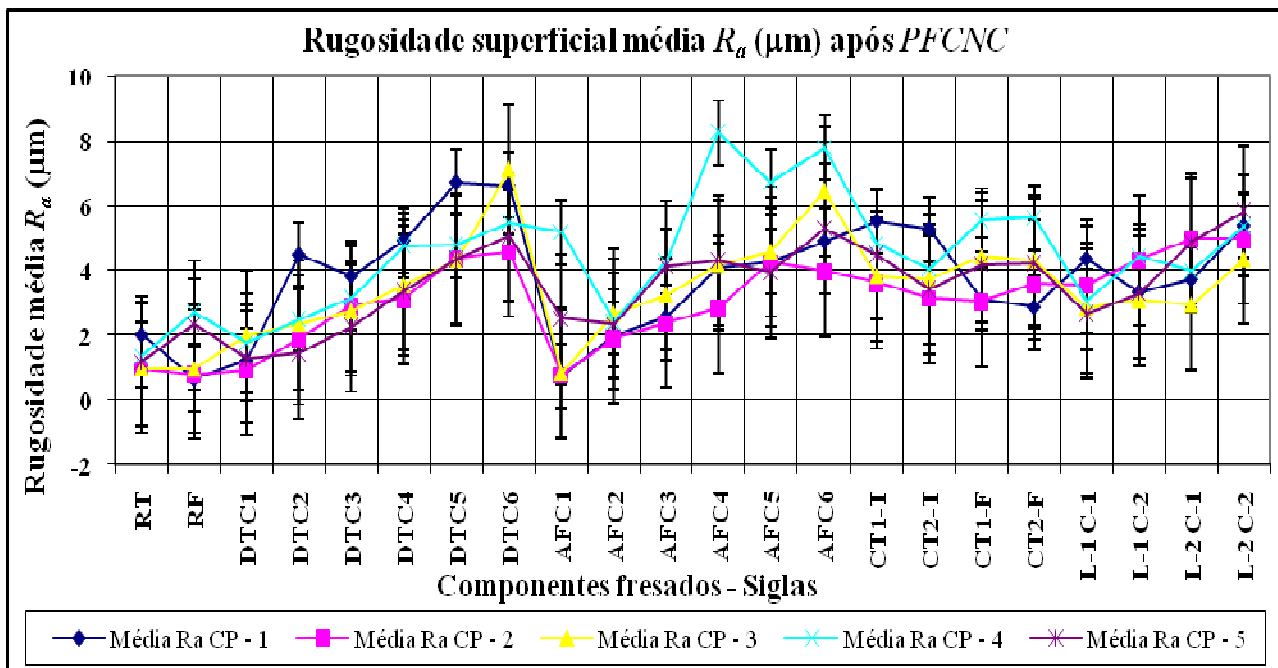


Figura 5. Efeitos comparativos da rugosidade superficial média  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) versus operações dos componentes fresados

Tabela 3. Planilha dos eventos de defeitos de usinagem (*Score*) para o CP-1

CP - 1						Trincas e Fissuras	Marcas de trajetórias	Micro quebra nas bordas	Quebra na entrada da ferramenta	Quebra na saída da ferramenta	Somatório do Score
Nota	Qualidade da Rugosidade no canal cortado										
0	Não há ocorrência prejudicial										
1	Há ocorrência prejudicial de pouca significância										
2	Há ocorrência prejudicial com moderada significância										
3	Há ocorrência prejudicial de grave significância										
4	Há ocorrência prejudicial de gravíssima significância										
$\Sigma = 10$ Somatório máximo da nota do Score			Parâmetros de corte <i>CNC</i>								
Ordem	Componente Fresado	Siglas	$f_z$ (mm/dente)	$a_p$ (mm)	$V_c$ (m/min)	Eventos					
1	Ressalto fundo	RF	0,0425	3	120	0	0	0	0	0	0
2	Acabamento fundo Canal 1	AFC1	0,01	2,5	150	0	0	0	0	0	0
3	Acabamento fundo Canal 2	AFC2	0,07	2,5	150	0	0	0	0	0	0
4	Acabamento fundo Canal 3	AFC3	0,13	2,5	150	0	0	0	0	0	0
5	Acabamento fundo Canal 4	AFC4	0,19	2,5	150	0	0	0	0	0	0
6	Acabamento fundo Canal 5	AFC5	0,25	2,5	150	0	0	0	0	0	0
7	Acabamento fundo Canal 6	AFC6	0,28	2,5	150	0	0	0	0	0	0
8	Canal transversal 1 Fundo	CT1-F	0,155	8	175	0	0	0	0	0	0
9	Canal transversal 2 Fundo	CT2-F	0,155	6	175	0	0	0	0	0	0
10	Ressalto topo	RT	0,0425	6,5	120	0	0	0	0	0	0
11	Desbaste topo Canal 1	DTC1	0,01	5	90	0	0	0	0	0	0
12	Desbaste topo Canal 2	DTC2	0,07	5	90	0	0	0	0	0	0
13	Desbaste topo Canal 3	DTC3	0,13	5	90	0	0	0	0	0	0
14	Desbaste topo Canal 4	DTC4	0,19	5	90	0	1	0	0	4	5
15	Desbaste topo Canal 5	DTC5	0,25	5	90	0	1	0	3	4	8
16	Desbaste topo Canal 6	DTC6	0,28	5	90	0	1	2	3	4	10
17	Canal transversal 1 Topo	CT1-T	0,155	2	175	0	0	0	0	4	4
18	Canal transversal 2 Topo	CT2-T	0,155	4	175	0	0	0	0	4	4
19	Lado-1 Canal 1	L-1 C-1	0,02	8	175	0	0	0	0	0	0
20	Lado-1 Canal 2	L-1 C-2	0,04	8	175	0	0	0	0	4	4
21	Lado-2 Canal 1	L-2 C-1	0,08	8	175	0	0	0	0	4	4
22	Lado-2 Canal 2	L-2 C-2	0,16	8	175	0	1	0	0	4	5

A Figura 6 (a, b, c, d) ilustra a ocorrência dos defeitos de quebra em função das saídas e entradas da ferramenta de corte, após serem aplicados os parâmetros de corte em fresamento *CNC* dos 22 canais em cada corpo de prova.

A Eq. (2) apresenta o modelo da regressão multivariável não linear de superfície de resposta encontrado para os defeitos de usinagem (*Score*), sendo usado no programa *Statistica* as variáveis independentes de propriedades mecânicas ( $\sigma_{máx}$ ,  $K_{IC}$ ) e parâmetros de corte ( $f_z$ ,  $a_p$ ,  $V_c$ ). A importância relativa dos parâmetros da equação é apresentada por meio do diagrama de Pareto na Fig. (7). Em primeiro lugar está o avanço por dente  $f_z$ , em segundo a interação avanço por dente e velocidade de corte ( $f_z \times V_c$ ), e, em terceiro e último a  $V_c$  ao quadrado. Tanto  $f_z$  quanto  $V_c$  aumentam os defeitos. A interação tem um efeito negativo no *Score*, ou seja, ele diminui os defeitos e/ou a gravidade deles. Nenhuma propriedade do material influenciou o *Score*, apenas os parâmetros de processo.

$$(\text{Score}) = 0,10529 + 2,48561 * f_z + 1,25325 * V_c^2 - 1,14785 * f_z * V_c \quad (2)$$

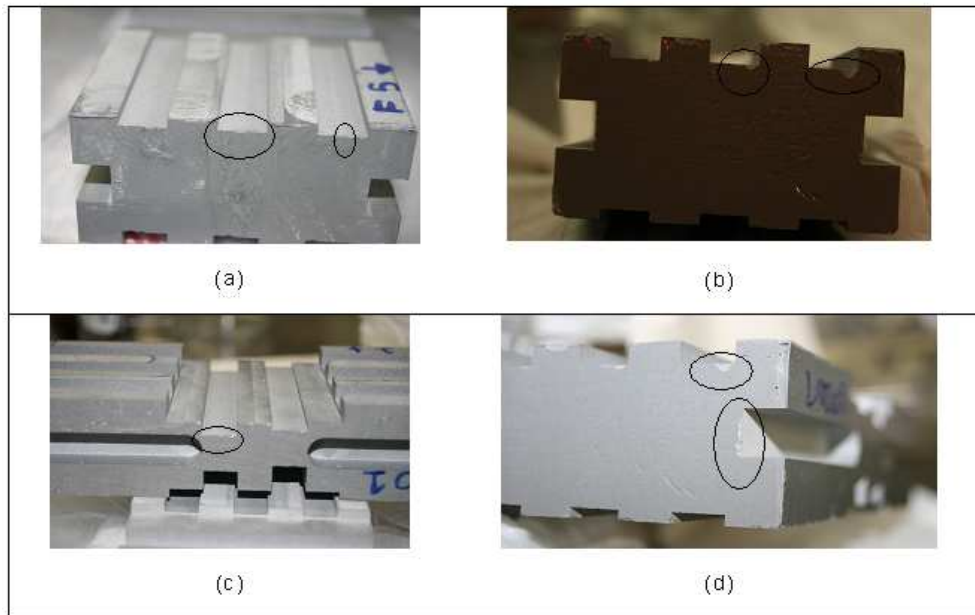


Figura 6. Defeitos de usinagem observados nos corpos de prova; a) quebra na entrada canal de acabamento; b) quebra na entrada canal de desbaste; c) quebra na entrada do canal transversal; d) quebra na saída do canal lateral

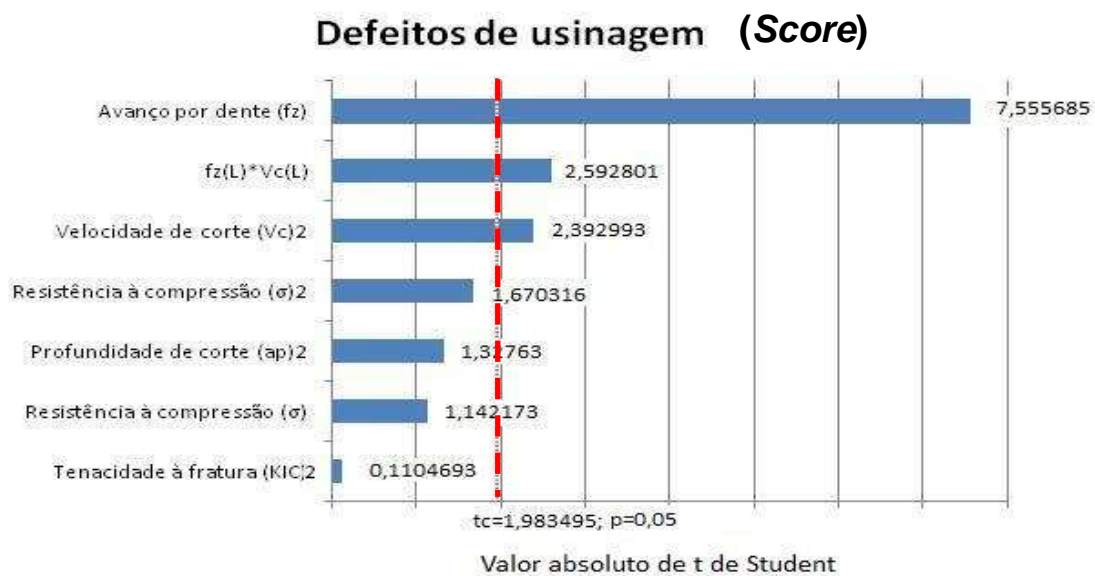


Figura 7. Pareto da importância relativa dos parâmetros nos defeitos de usinagem (Score)

Os eixos plotados no gráfico ( $Score \times f_z \times V_c$ ) foram considerados neste caso como:  $X$  velocidade de corte  $V_c$  (m/min);  $Y$  avanço por dente  $f_z$  (mm/dente) e  $Z$  defeitos de usinagem (Score). A importância estatística da análise foi realizada para um nível de significância de 5%, ou seja, para um nível de confiança de 95%, e o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a (0,457959), ou seja, 46% dos pontos são representados pela superfície, portanto a resposta não é previewal. Isto ocorreu provavelmente pela falta de outros parâmetros, como por exemplo, as forças envolvidas no processo, que já foram pesquisados em materiais similares, nos testes realizados por Lanz *et al.* (2001) e Yang e Ryu (2001). Em destaque, a superfície que representa as variáveis de maior importância ( $f_z$  e  $V_c$ ) do evento (Score) está apresentada na Figura (8). Quanto maior o avanço por dente  $f_z$  maior o Score, e da mesma forma para  $V_c$ , mas este em menor intensidade, e na influência com  $f_z$  quanto maior a velocidade de corte maior a quantidade e a gravidade do defeito. De modo a evitar ocorrência graves deve-se usar baixos avanços por dente e velocidades de corte.

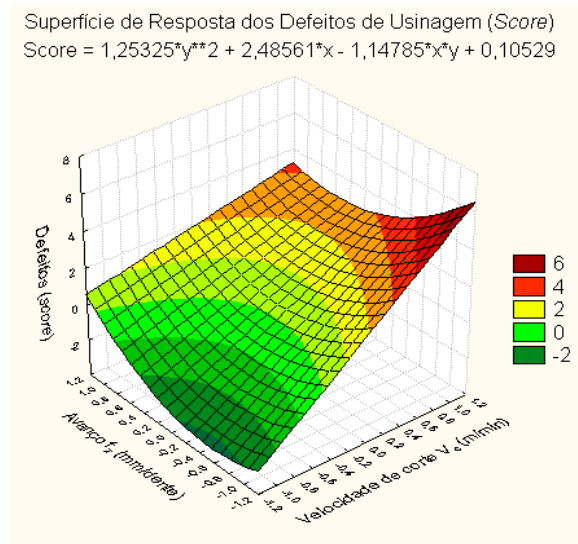


Figura 8. Superfície de resposta dos defeitos de usinagem (Score x  $f_z$  x  $V_c$ )

Lanz *et al.* (2002) também exploraram em pesquisa o efeito dos parâmetros de corte em material similar, contudo, o fenômeno de quebras e defeitos foi observado pelo legado nas marcas de trajetórias (micro lascamentos nas bordas e marcas na forma de um C) impresso pela ferramenta de corte (fresa de topo de metal duro) na superfície do material, portanto o modo de corte é equiparado aos materiais metálicos já consolidados na manufatura, como por exemplo fofo e latões (Ferraresi, 1995).

A Fig. (9) apresenta o diagrama Pareto da variável dependente de rugosidade superficial média ( $R_a$ ). As importâncias relativas em ordem decrescente dos parâmetros do modelo envolvem cinco variáveis, quais sejam:  $f_z$ ,  $a_p$ ,  $\sigma_{máx}$ ,  $V_c$ ,  $K_{IC}$ . Assim sendo, diferente do modelo do defeito, o da rugosidade apresenta parâmetros ligados às propriedades do material e às variáveis de processo. A informação em comum é a destacada importância do avanço por dente de forma também positiva, ou seja, aumentando a rugosidade. A profundidade de corte também aumenta a rugosidade, assim como a velocidade de corte. Já as propriedades mecânicas, tanto a resistência à compressão quanto a resistência à fratura influenciam negativamente, ou seja, quanto maiores as resistências menor a rugosidade. Imagina-se que um material rígido, porém tenaz seja o ideal.



Figura 9. Pareto da importância relativa dos parâmetros da rugosidade superficial média ( $R_a$ )

O modelo matemático da regressão, Eq. (3), da rugosidade superficial média ( $R_a$ ) com variáveis codificadas tem a forma:

$$(R_a) = 4,44995 - 0,80642 * \sigma - 1,31056 * \sigma^2 - 1,21866 * K_{IC}^2 + 1,87415 * f_z + 1,20638 * a_p^2 + 0,88955 * V_c^2 - 0,26399 * f_z * V_c \quad (3)$$

Na simulação os eixos plotados no gráfico ( $R_a$  x  $a_p$  x  $f_z$ ) mostrado na Fig. (10), foram considerados neste caso como:  $X$  avanço por dente  $f_z$  (mm/dente);  $Y$  profundidade de corte  $a_p$  (mm) e  $Z$  sendo  $R_a$  ( $\mu m$ ). A análise estatística dos valores foi realizada para um nível de significância de 5%, ou seja, para um nível de confiança de 95%. No gráfico



mostrado anteriormente, os valores de  $t$  para cada parâmetro, assim o seu grau de influência no resultado, podem ser observados. Nesta regressão o coeficiente de determinação  $R^2$  foi igual a 0,690593, ou seja, quase 70% dos dados estão bem representados pela superfície, portanto o modelo é previsional. Assim foi obtido a superfícies de resposta da rugosidade superficial média  $R_a$ , sendo a superfície constituída pelas variáveis de maior influência sobre a rugosidade média ( $R_a$ ). Quanto maior o avanço por dente  $f_z$  e a profundidade  $a_p$  maior a rugosidade  $R_a$ .

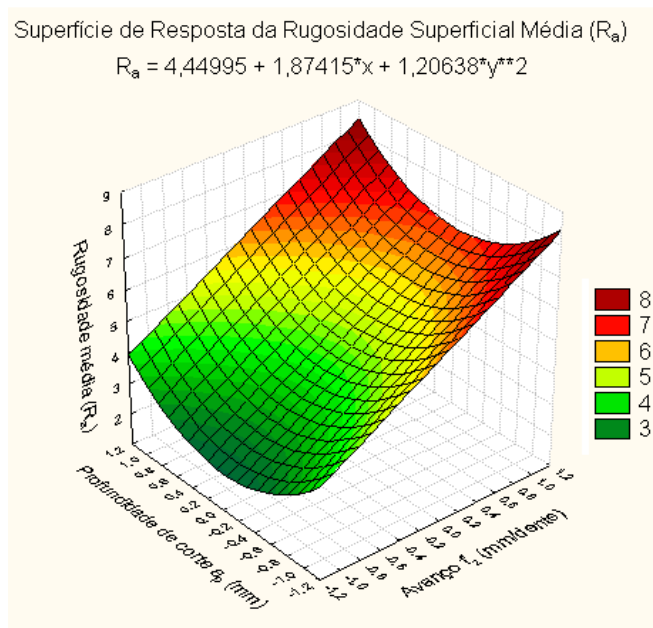


Figura 10. Superfície de resposta da Rugosidade superficial média ( $R_a$  x  $a_p$  x  $f_z$ )

Em comparação aos estudos feitos sobre usinagem de materiais afins feitos por Yang e Ryu (2001), Lanz *et al.* (2002), Volpato *et al.* (2003) e Derenievicki (2007), os compósitos obtiveram melhor desempenho do índice de rugosidade média ( $R_a$ ) variando de 0,656 a 4,3  $\mu\text{m}$ , quando usinados com velocidade de corte ( $V_c$ ) na faixa de 120 a 150 m/min e com profundidade de corte ( $a_p$ ) variando de 3 a 6,5 mm, e ainda com o avanço por dente ( $f_z$ ) no intervalo de 0,01 a 0,155 mm/dente. Logo estes foram os valores dos parâmetros do fresamento CNC no corte dos ressaltos de topo (RT) e ressaltos de fundo (RF) e dos três primeiros canais usinado nas faces de topo (desbaste) e fundo (acabamento) nos compósitos. A magnitude das rugosidades obtidas nas superfícies dos compósitos é equiparada a menor  $R_a$  média no alumínio quando usinados com  $V_c$  próximo de 120 m/min (Ferraresi, 1995). Além disso, os resultados de  $R_a$  são considerados bons conforme o campo de aplicação da superfície desejada com ilustração segundo Mitutoyo (2005),  $R_a$  igual a 2  $\mu\text{m}$  é indicada para superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos. Provavelmente se obterá sucesso na aplicação destes compósitos na manufatura de moldes para injeção.

#### 4. CONCLUSÕES

É de suma importância submeter os materiais compósitos recente aos testes de usinabilidade para efeitos de aceitação como moldes manufaturados das tecnologias de ferramental rápido (FR) e prototipagem rápida (PR). Assim para viabilizar os trabalhos de usinagem da peça com o melhor aproveitamento, satisfazendo à rigidez e os números de canais usinados, foi arquitetada uma estratégia de usinagem adequada à geometria do corpo de prova.

Foram observados alguns tipos de defeitos de usinagem (*Score*) após a etapa de usinagem porque a matriz epóxi (polimérica) é frágil e tem comportamento diferente do enchimento (alumínio) quanto aos impactos causados pela ferramenta de corte. Entretanto, um dos pontos forte do material desenvolvido foi o fato do processo de usinagem causar muito pouca catástrofe de quebra nas bordas dos materiais compósitos nos testes, sendo este um mérito do material processado.

Quanto à rugosidade superficial média  $R_a$  o material é comparável ao alumínio, sendo assim adequado para a fabricação de molde protótipo por usinagem.

#### 5. AGRADECIMENTO

As instituições CAPES-CNPq pela concretização de viabilidade do mestrado, UTFPR como realizadora do curso de mestrado, FAPEAM pela manutenção da bolsa auxílio no mestrado institucional, SUFRAMA pela parceria financeira do curso, CFPVL SENAI-AM tendo disponibilizado corpo técnico máquinas instrumentos e oficinas e também a instituição federal acolhedora IFAM pelo apoio das instalações e acesso aos laboratórios.

## 6. REFERÊNCIAS

- Derenievicki, F. O., 2007, "Procedimento para testar resinas poliméricas para a fabricação de moldes-protótipo usinados". Dissertação de Mestrado. PPGEM - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, FEVEREIRO.
- Ferraresi, D., 1995, "Fundamento da Usinagem dos Metais". São Paulo: Edgard Blücher, v.1.
- Jenrich, R. I., 1995, "An Introduction to Computational Statistics - Regression Analysis". Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall.
- Kanenobu, A. A.; Lima, C. E. C. de; Rossi, C. G.; Batalha, F. G., 2004, "Monitoramento do desgaste de ferramenta num processo de fresamento de topo". Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas PIC-EPUSP Nº2.
- Lanz, R. W.; Melkote, S. N.; Kotnis, M. A., 2002, "Machinability of Rapid Tooling Composite Board", Journal of Materials Processing Technology, v. 5760, pp. 1-4.
- Richter, O. E.; Volpato, N.; Amorim, de J. R., 2003, "Ferramental Rápido Usinado". VIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica, CEFET-PR, Curitiba-PR, Agosto.
- Serafim, C. L.; Capudi, E.; Gondak, M. O.; Araújo, M. S., 2006, "Desenvolvimento de Compósito de Alumínio para Usinagem". 17º Anais do CBECIMAT, Novembro.
- Shaw, M. C., 2005, "Metal Cutting Principles". 2ª ed. New York: Oxford University Press.
- Veroneze, T., 2009, "Desenvolvimento de Um Compósito de Epóxi e Alumínio Para Usinagem CNC e Injeção Termoplástica" Publicado no seminário SICITE 2009 Anais UTFPR, na forma de CD Pato Branco-Pr.
- Volpato, N.; Amorim, J. R.; Manente, M. M., 2003, "The use of Epoxy resins as Insert for Injection Mold". Anais do COBEM, 2003, São Paulo.
- Yang, M. Y.; Ryu, S. G., 2001, "Development of a Composite Suitable for Prototype Machining", Journal of Materials Processing Technology, v. 5760, pp. 280-284.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

### **Test of machinability in CNC of epoxy and aluminum composites correlating cutting parameters to average superficial roughness Ra and to defects by means of response surface**

**Carlos Alberto Mendes Oliveira<sup>1</sup>, carlosalberto@cefetam.edu.br**

**Tiago Veroneze<sup>2</sup>, tiagovero@hotmail.com.br**

**Márcia Silva de Araújo<sup>2</sup>, araujo@utfpr.edu.br**

**Gilberto Garcia del Pino<sup>3</sup>, ggdelpin@usp.br**

<sup>1</sup>IFAM, Av. Sete de Setembro 1975, Centro, Manaus-AM/Brasil CEP 69075-350

<sup>2</sup>UTFPR, Av. Sete de Setembro 3165, Rebouças, Curitiba-PR/Brasil CEP 80230-901

<sup>3</sup>UEA-EST, Av. Darcy Vargas 1200, Parque Dez, Manaus-AM/Brasil CEP 69050-020

#### Abstract

It is important test the parameters of the machining process ( $V_c$ ,  $a_p$  e  $f_z$ ) concomitantly with others occurrences like arithmetic superficial roughness  $R_a$  and defects in material submitted to the cut, obtaining inference of these variables observed in tests of the recently processed composites, pointing for this purpose the particulate composite of polymeric material reinforced with metal more cure agent, in the final composition. And analyze alike the quantitative and qualitative events generated in the workpiece x tool x ambient, pointing the average superficial roughness ( $R_a$ ) and defects (Score) when the cutting tool course (milling cutter) in machining of these materials, also match up to others materials already consolidated, as well as ensure the use of this composite in the manufacture chain. The present study fractionated of a wider project propose to do dry machinability tests in these composites in the CNC milling process anchored in the CAD/CAM technologies, as regard to the gauged results to entail utilization in the fabrication of prototypes molds already in researches in UTFPR. Thus the preliminary objectives of the tests were determine geometry of the specimens, gauge, simulate, select and test the machinability parameters and thereunto were correlated the following dependents parameters: average superficial roughness ( $R_a$ ) and defects (Score), obtained after of the milling workpieces; to machining parameters: cutting speed ( $V_c$ ); feed per tooth ( $f_z$ ); cutting depth ( $a_p$ ); and hardness properties (Shore); maximum stress ( $\sigma_{máx}$ ) and fracture to the toughness ( $K_{IC}$ ) of these composite materials, in the event of the cutting results analysis using aleatory values of the parameters. Therefore was proposed a mathematical model by means of non-linear regression analysis of response surface using the software Statistica.

Keywords: composites machinability, CNC milling, mathematical model