

RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CORTE E O ACABAMENTO SUPERFICIAL NA USINAGEM DE FIBRA DE CARBONO

Eduardo Droubi Irago Chazo ¹; Éd Claudio Bordinassi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Esse trabalho teve como objetivo estudar e analisar a relação entre os parâmetros de corte e o acabamento superficial de uma peça de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), permitindo selecionar os parâmetros mais adequados para o acabamento superficial desejado na peça final. Para analisar variam-se ferramentas utilizadas, ângulo da fibra, velocidade de corte, avanço e profundidade; posteriormente se avaliou a rugosidade e delaminação de cada peça usinada. Com os resultados obtidos criou-se uma tabela comparativa entre cada ensaio apresentando estatisticamente quais fatores mais influenciaram no acabamento superficial da peça. Chegou-se a conclusão que a ferramenta e o ângulo em que a fibra é usinada são os parâmetros que estatisticamente mais influenciam na peça final, apresentando menores rugosidades e delaminações na peça final. Conforme a velocidade de corte aumenta verificou-se que a rugosidade atinge seus menores valores, em contra partida, acontece o oposto para a delaminação, o mesmo fenômeno ocorre com as ferramentas, na qual obtém-se menores valores de rugosidade para as ferramentas de 45°, enquanto com a mesma pastilha, obtêm-se maiores delaminações com ferramentas de 45°.*

Introdução

A usinagem de materiais é fundamental para a confecção qualquer objeto. Segundo (Groover, 2014) o acabamento superficial da peça é determinado pelo tipo de processo e os parâmetros ao qual foi sujeito, e está ligado diretamente com a precisão desejada na peça final. O estudo do acabamento superficial aumenta a medida que a tolerância geométrica exigida é mínima e a precisão de ajuste entre duas ou mais peças cresce.

Rugosidade é o nome que se dá as irregularidades ou erros micro geométricos presentes na superfície da peça, gerados pelo processo de fabricação, sendo função do tipo de usinagem, máquina e acabamento utilizado para sua confecção. No Brasil a norma ABNT NBR ISO 4287:2002 determina os conceitos para estudo desta variável. A rugosidade influencia em diversos comportamentos mecânicos e ópticos da peça, como:

- Atrito;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência a corrosão e a fadiga;
- Início de trincas;
- Aparência;

Chama-se de delaminação o processo de separação física de dois corpos através de um choque. Na usinagem este fenômeno acontece quando a ferramenta entra em contato com a peça, tanto na entrada quanto na saída da ferramenta, este fenômeno gera tensões

residuais que diminuem a resistência do material além de ser um local de início de trinca, porém pode ser evitada caso diminua a força de corte que a peça é solicitada na usinagem. Para se obter uma maior precisão nos experimentos, deve-se aumentar a velocidade de corte cerca de 20% da sua velocidade atual e avanço entre 0,1 a 0,3 mm/revolução com profundidade entre 0,25 e 0,5 mm (profundidade ideal para acabamento final), com valores próximos a 225m/min, devido ao fato de obter-se menor rugosidade com esta velocidade (Ferreira; Coppini; Miranda, 1999).

Segundo Pecat, Rentsch, & Brinksmeier, (2012) a temperatura ideal de trabalho para a fibra de carbono é de 80°C, devido ao fato de passar a transição vítrea do epóxi utilizado por eles no experimento e estudaram também a relação da orientação da fibra e concluíram que os ângulos ideais de corte são de 0° e 45°, devido ao fato de não apresentarem quebras. Em complemento a este estudo, Wang et al. (2016) obteve resultados na qual a condutibilidade térmica da fibra de carbono varia com ângulo da fibra em relação ao fluxo de calor. O ângulo da ferramenta influencia na força de corte e temperatura de usinagem, assim o estudo conclui que ao usinar a fibra com ferramenta com ângulo de corte de 135° obtém-se a menor força de corte, porém se atinge as temperaturas mais altas, já utilizando ferramentas com corte a 45° as temperaturas de usinagem são sempre menores.

As forças de corte presentes na usinagem da peça são de extrema importância, pois determinam a potência demandada pela máquina, influenciando diretamente custos de operação e preço final da peça. Segundo Henerichs et al. (2015) a orientação da fibra que atinge as forças de corte mais críticas variam entre 30° e 90° (vista lateral), já a usinagem de 150° a 0 (vista lateral), atinge as menores forças de corte.

Com objetivo de estudar a relação entre os parâmetros de corte e o acabamento superficial no processo de fresamento em peças de fibra de carbono laminadas, realizou-se um estudo empírico que consiste em usinar um corpo de prova de dimensões 50 x 20 x 10mm variando-se a velocidade de corte, avanço, profundidade, ferramenta e ângulo da fibra.

Materiais e métodos

Processo de fabricação do corpo de prova:

Fibra de Carbono CCS200: a fibra de carbono ou fio acrílico carbonizado é muito utilizado na engenharia devido a sua alta resistência mecânica à tração;

Resina Epóxi 5052: Resina Epóxi é um termofixo que endurece após reagir com um catalizador, a mistura pode ser moldada a qualquer geometria devido sua fase líquida logo após a adição do catalizador;

Endurecedor ARADUR 837 BR: O endurecedor ou catalizador inicia ou acelera uma reação química, este endurecedor misturado com a resina epóxi faz com que a resina endureça após a cura total.

A fabricação dos corpos de prova foi dividida em 6 etapas: corte do carbono, aplicação da resina e catalisador, processo de vacuum bag, forno, corte e faceamento.

A primeira etapa consiste em cortar a fibra no tamanho e quantidade correta para obter o número desejado de corpos de prova. Inicialmente precisa-se de uma placa de 300 x 300 x 10 mm para obtenção dos corpos de prova, desta forma, é necessário 50 camadas de

fibra para atingir os 10 mm desejados (cada “tecido de carbono” tem 0,2 mm de espessura).

Na segunda etapa mistura-se resina epóxi com o endurecedor, esta mistura possui 0,37% de endurecedor para a quantidade de resina usada, e adiciona a fibra de carbono, passando uma camada da mistura a cada “tecido de carbono” adicionada.

Após a adição de resina no carbono, utiliza-se o processo de vacuum bag, na qual se coloca o compósito dentro de uma bolsa de vácuo durante 24 h, tempo necessário para a cura parcial do epóxi. Este processo garante a geometria final do compósito.

Para ocorrer a cura total, leva-se o compósito ao forno a 80° durante 24 h, garantindo a cura total da resina e a resistência mecânica do material.

Por fim corta-se a placa em corpos de prova no tamanho de 50 x 20 x 10 mm, e se faceia os corpos a fim de garantir a geometria final, utilizando velocidade de 200 m/min e avanço de 0.05 mm/dente, desta forma o acabamento dos corpos é similar em todas as peças para posterior estudo.

Com intuito de avaliar o acabamento superficial devido aos parâmetros de corte usados, utilizou-se os seguintes materiais:

Centro de Usinagem Romi D800 (Figura 1): centro de usinagem com curso de 800mm no eixo X, 700mm no eixo Y e 600mm no eixo Z com comando Fanuc, suporta até 800Kg, 10000rpm a 18,5kW;

Figura 1 - Centro de usinagem Romi D800



Rugosímetro Mitutoyo SJ-201 (

Figura 2): utilizado para a medição das rugosidades, foi utilizado cutoff 0,8 x 5 mm, na direção perpendicular à usinagem.

Figura 2 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-201



Projektor de Perfil Mitutoyo Tipo PJ – 300H (

Figura 3): utilizado para medição das delaminações nos corpos de prova.

Figura 3 - Projektor de Perfil Mitutoyo Tipo PJ - 300H



Ferramenta R245-063Q22-12M: Suporte com 5 pastilhas com ângulo de corte de 45° .

Ferramenta R390-025A25-11M: Suporte com 3 pastilhas com ângulo de corte de 90° .

Pastilha R390-11 T3 08M-KM: pastilha de metal duro com revestimento PVD (Ti,Al)N com ângulo de corte de 90°

Pastilha R245-12 T3 E-ML 1040: pastilha de metal duro com revestimento PVD (Ti,Al)N2 com ângulo de corte de 45°

Utilizando um planejamento fatorial completo (2^k), sendo k o número de variáveis a serem estudadas, com os parâmetros apresentados na Tabela 1 obteve-se 32 ensaios:

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de corte (própria autoria)

	Valor Mínimo	Valor Máximo
--	--------------	--------------

Ferramenta [°]	45	90
Ângulo da fibra [°]	45	90
vc [m/min]	200	300
ap [mm]	0,5	1
f [mm/dente]	0,05	0,1

Segundo Voss et al., (2016) as velocidades de corte ($V_c = 200$ m/min) e avanço ($f = 0,1$ mm/rotação) selecionadas apresentam menores forças de corte, e desta forma são as mais recomendadas para acabamento superficial da peça.

Resultados e discussões

Após coleta dos dados, obteve-se os resultados mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados obtidos de rugosidade e delaminação

i	Ferramenta [°]	Direção Fibra [°]	Vc [m/min]	f [mm/dente]	Ap [mm]	Rugosidade [Ra]	Delaminação [μm]
1	90	45	200	0,05	0,5	0,900	270
2	90	45	200	0,05	1,0	1,070	950
3	90	45	200	0,10	0,5	1,037	215
4	90	45	200	0,10	1,0	1,473	380
5	90	45	300	0,05	0,5	1,333	375
6	90	45	300	0,05	1,0	0,940	240
7	90	45	300	0,10	0,5	1,020	115
8	90	45	300	0,10	1,0	2,703	240
9	90	90	200	0,05	0,5	1,610	210
10	90	90	200	0,05	1,0	1,543	220
11	90	90	200	0,10	0,5	1,937	210
12	90	90	200	0,10	1,0	3,353	160
13	90	90	300	0,05	0,5	1,510	225
14	90	90	300	0,05	1,0	2,267	260
15	90	90	300	0,10	0,5	2,103	270
16	90	90	300	0,10	1,0	2,113	145
17	45	45	200	0,05	0,5	0,570	205
18	45	45	200	0,05	1,0	0,713	300
19	45	45	200	0,10	0,5	0,840	395
20	45	45	200	0,10	1,0	0,653	275
21	45	45	300	0,05	0,5	0,607	310
22	45	45	300	0,05	1,0	0,553	235
23	45	45	300	0,10	0,5	0,680	220
24	45	45	300	0,10	1,0	0,640	275

25	45	90	200	0,05	0,5	2,247	230
26	45	90	200	0,05	1,0	0,613	255
27	45	90	200	0,10	0,5	0,807	230
28	45	90	200	0,10	1,0	1,327	260
29	45	90	300	0,05	0,5	1,327	310
30	45	90	300	0,05	1,0	0,757	390
31	45	90	300	0,10	0,5	0,920	310
32	45	90	300	0,10	1,0	0,903	295

Com os resultados obtidos na Tabela 2 percebe-se que os corpos de prova que apresentam maiores valores de delaminação são respectivamente: 4, 19 e 30. Com estes dados, os corpos de prova foram submetidos a análises micrográficas, a fim de verificar o local de início e propagação da delaminação conforme as Figura 4, Figura 5 e Figura 6. As imagens abaixo foram obtidas com o microscópio Olympus BX60M e digitalizadas através do Olympus UC30, cada imagem apresenta a delaminação ocorrida na peça no ponto onde tem o seu maior valor com ampliação de 10X.

Figura 4 – Delaminação do Corpo de Prova 4 – Vista de Topo

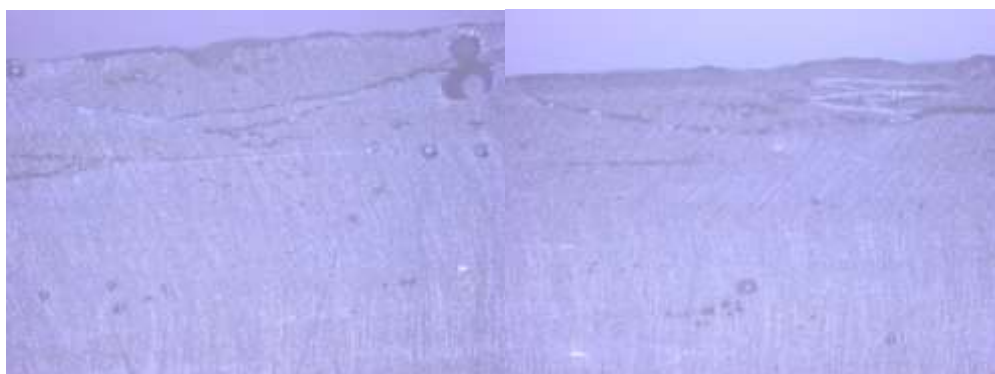
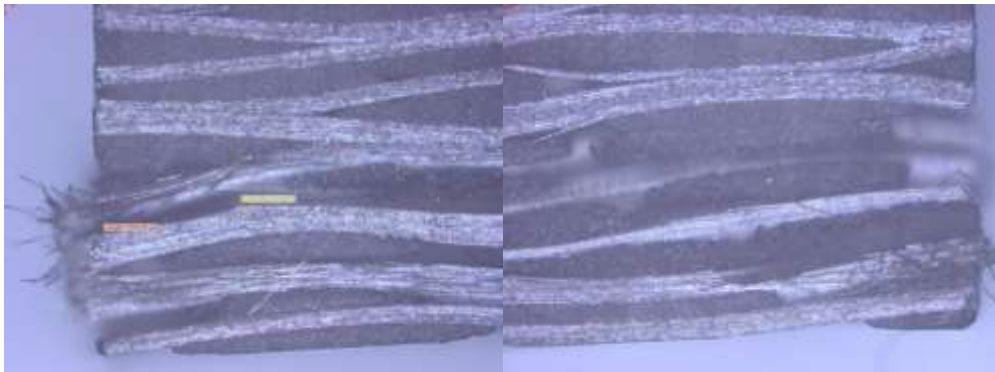


Figura 5 – Delaminação do Corpo de Prova 19 – Vista de Topo



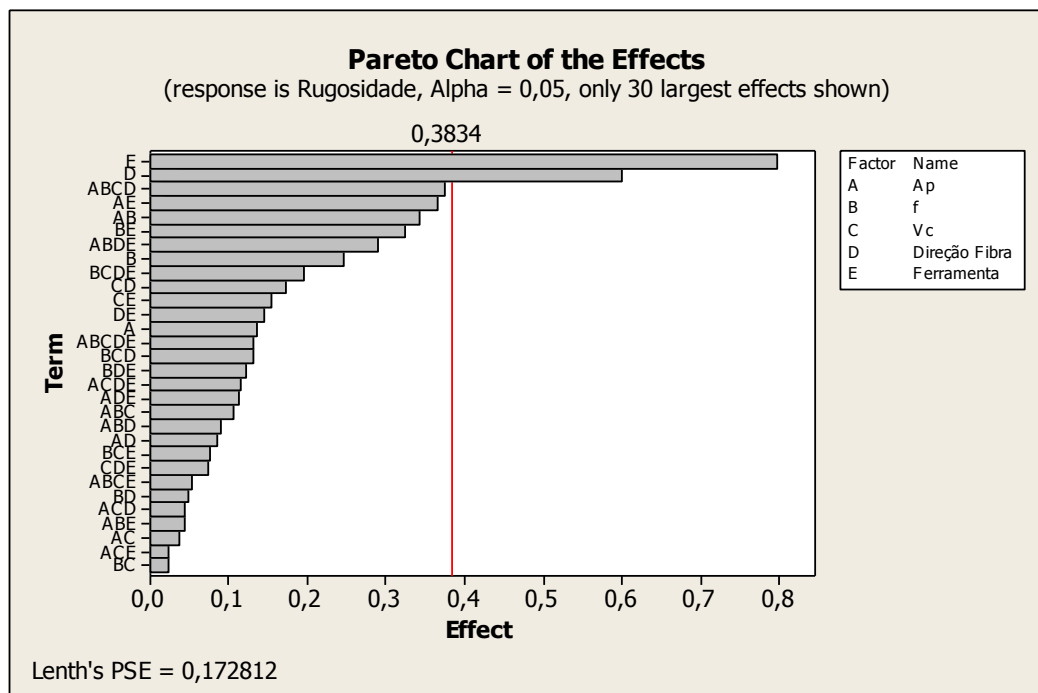
Figura 6 - Delaminação do Corpo de Prova 30 – Vista de Topo



Em ambos os casos, a delaminação ocorreu próximo à superfície de saída da ferramenta, o contrario ocorreu na superfície de entrada, na qual não se encontrou início de trinca. A delaminação acontece devido a força de corte elevada e a resina presente entre duas camadas de carbono não suportar a tensão gerada pelo corte. A força de corte é cada vez maior conforme a espessura do corte diminui, desta forma, quanto menor a profundidade de corte, maior a tensão que o material sofre.

Com os resultados obtidos na Tabela 2 é possível avaliar quais parâmetros de usinagem mais influenciam na rugosidade da peça final analisando a Figura 7 e Figura 9.

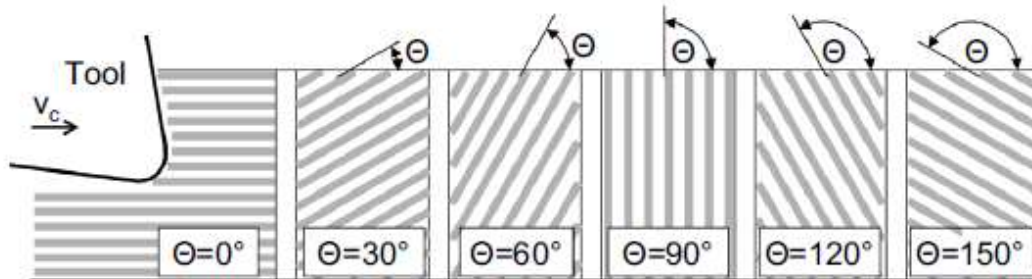
Figura 7 - Gráfico de pareto para rugosidade



De acordo com a Figura 7 é possível dizer que as variáveis que influenciaram estatisticamente na rugosidade da peça foram a direção da fibra e a ferramenta utilizada

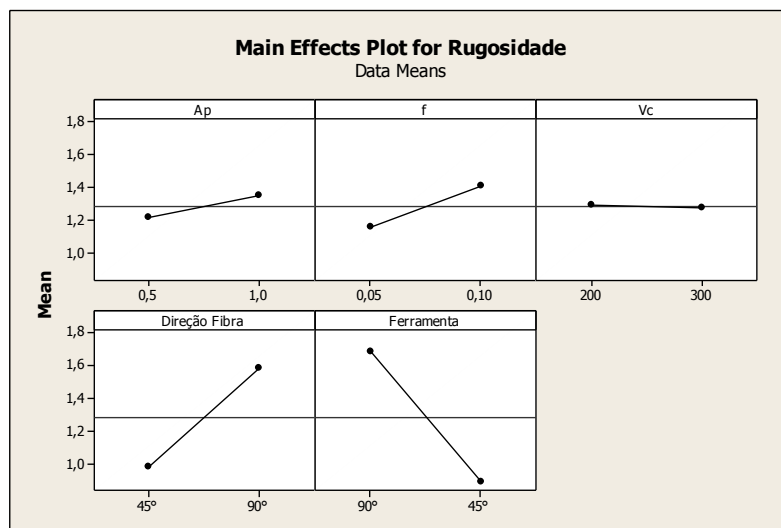
na usinagem, porém os parâmetros de usinagem influenciaram bastante, como mostrado na 3ª barra do gráfico, na qual o conjunto de a_p , f , v_c e a direção da fibra são os fatores avaliados. A definição do ângulo de fibra é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Definição da orientação da fibra



Fonte: Henerichs et al. (2015)

Figura 9 - Efeitos de cada parâmetro de corte na rugosidade do acabamento superficial da peça



A Figura 9 apresenta o comportamento da rugosidade para cada parâmetro de corte. Percebe-se que a fibra possui menores valores de rugosidade para ângulos de 45°, tanto para ferramenta quanto para a direção da fibra. Segundo Voss et al., (2016) as maiores forças de corte ocorrem quando o ângulo de corte está entre 0° e 90° e a direção da fibra entre 90° e 120°. Os maiores danos à superfície da peça acontecem quando a direção da fibra está entre 90° e 120°, ocorrendo a quebra do carbono presente na superfície usinada.

O processo de delaminação ocorre quando a fibra de carbono sofre uma usinagem (Klotz et al, 2014, Dahnel et al, 2016, Denkena et al, 2018). Segundo Hintze, Hartmann, & Schütte, (2011) a delaminação ocorre perpendicularmente à superfície de corte próximo à superfície de saída da ferramenta, e propaga-se pela peça como uma trinca, criando locais com menor resistência mecânica.

Pela análise gráfico da Figura 10, como nenhum fator é estatisticamente influenciável para a delaminação da fibra, adota-se as 4 primeiras barras como maiores influenciadores, no caso a_p , f , v_c , e ferramenta.

A Figura 11 apresenta o comportamento da delaminação para cada parâmetro de corte. Nota-se que para uma velocidade de corte $v_c = 300$ m/min a delaminação é mais grave que para uma velocidade de corte $v_c = 200$ m/min, isso ocorre devido o fato da força de corte ser menor para $v_c = 200$ m/min segundo Voss et al., (2016).

A delaminação aumenta para ferramentas com ângulos de corte de 45° , pois segundo Wang et al., (2016) é onde ocorrem as menores temperaturas de corte, e assim a matriz é mais rígida do que a maiores temperaturas, desta forma ocorre trincas na matriz próximas à saída da ferramenta onde a tensão é maior devido a área de corte.

Figura 10 - Gráfico de Pareto para delaminação

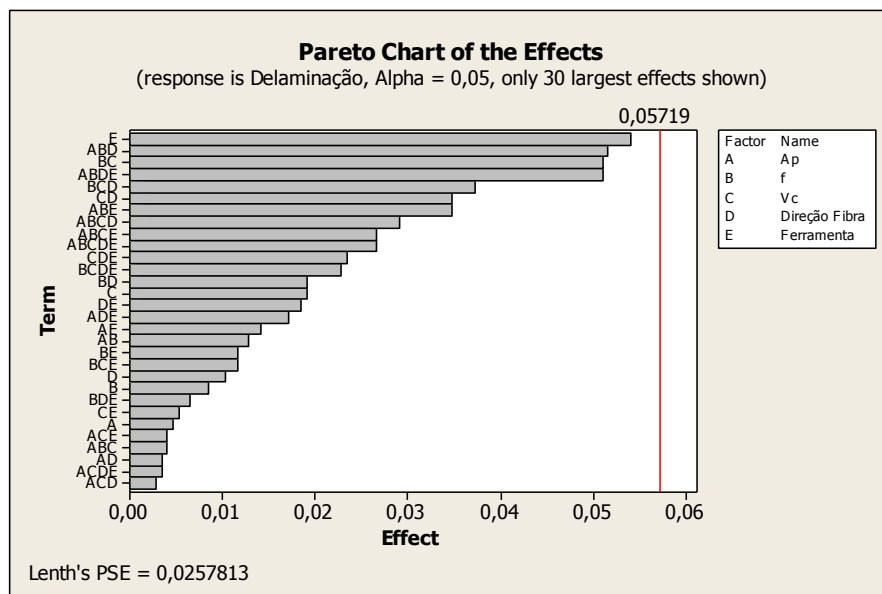
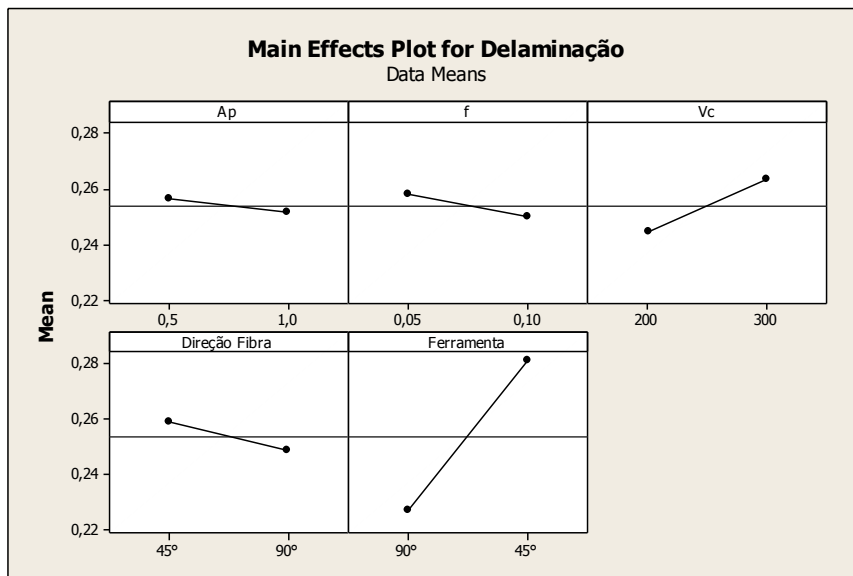


Figura 11 - Efeitos de cada parâmetro de corte na delaminação da peça



Com o gráfico apresentado na Figura 11 se percebe que a ferramenta é a maior influenciadora para delaminação, isso se deve pela geometria da ferramenta, o ângulo de corte e o ângulo de saída do cavaco são os fatores que determinam essa variação tão alta entre as ferramentas de ângulos diferentes de corte.

Conclusões:

A partir dos resultados obtidos, a rugosidade é altamente influenciada pelos parâmetros de corte na hora da usinagem, no caso a ferramenta, o ângulo em que a fibra será usinada e o avanço são os parâmetros que tem uma influência notável. Para obter menores valores de rugosidade é necessário que a fibra tenha um ângulo de usinagem próximo de 0° a ferramenta a ser utilizada deve ter um ângulo de corte de 45° e utilizar valores de avanço baixos, no caso, próximos a 0,05 mm/dente.

No caso da delaminação, apenas a ferramenta de corte obteve uma influencia significativa, e os resultados são opostos à rugosidade, ferramentas com ângulos de 90° obtiveram menores valores de delaminação.

Desta forma deve-se avaliar o fator de maior importância da peça final, uma peça com menor rugosidade, ou menor delaminação, caso ambos necessitem valores relativamente baixos, será necessário um retrabalho na peça.

Agradecimentos:

Os autores agradecem à Sandvik que tanto auxiliou no projeto, fornecendo o local, ferramentas e o centro de usinagem para a usinagem dos corpos de prova e ao Instituto Mauá de Tecnologia por fornecer toda a infraestrutura para a fabricação dos corpos de prova e coleta de dados para obtenção dos resultados.

Referências:

- Henerichs, M., Voß, R., Kuster, F., & Wegener, K. (2015). Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **9**, 137–145.
- Hintze, W., Hartmann, D., & Schütte, C. (2011). Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. *Composites Science and Technology*, 1719–1726.
- J.R Ferreira, N.L Coppini, & G.W.A Miranda. (1999). Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 135–140.
- Pecat, O., Rentsch, R., & Brinksmeier, E. (2012). Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP. *CIRP Conference on High Performance Cutting 2012*, **5**, 466–470.
- Voss, R., Seeholzer, L., Kuster, F., & Wegener, K. (2016). Influence of fibre orientation, tool geometry and process parameters on surface quality in milling of CFRP. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*.
- Wang, H., Sun, J., Zhang, D., Guo, K., & Li, J. (2016). The effect of cutting temperature in milling of carbon fiber reinforced. *Composites: Part A*.
- Groover, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. 1ª Edição. LTC, 2014.
- Klotz, S.; Zanger, F.; Schulze, V. (2014). Influence of clamping systems during milling of carbon fiber reinforced composites. *Procedia CIRP*, **24**, 38 – 43.
- Dahnel, A.N.; Ascroft, H. Barnes, S. (2016). The effect of varying cutting speeds on tool wear during conventional and Ultrasonic Assisted Drilling (UAD) of Carbon Fibre Composite (CFC) and titanium alloy stacks. *Procedia CIRP*, **46**, 420 – 423.
- Denkena, B.; Boehnke, D; Dege, J. G. (2008). Helical milling of CFRP–titanium layer compounds. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, **1**, 64–69.