



**FRANCISCO ROMEO MARTINS**

**CARACTERIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE CHAPAS DE  
COMPÓSITO POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC)**

51/2014

Campinas,  
2014  
i



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**FRANCISCO ROMEO MARTINS**

**CARACTERIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE CHAPAS DE  
COMPÓSITO POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO  
(PRFC)**

Tese apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof.Dr. Nivaldo Lemos Coppini.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO FRANCISCO ROMEO MARTINS, E ORIENTADA PELO PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI.

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini

A handwritten signature in black ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be "Nivaldo Lemos Coppini".

CAMPINAS,  
2014

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M366c Martins, Romeo Francisco, 1953-  
Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) / Francisco Romeo Martins. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Compósitos poliméricos. 2. Fibras de carbono. 3. Fresamento. 4. Compósitos. 5. Polímeros. I. Coppini, Lemos Nivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Caracterização do fresamento de chapas de compósito polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)

**Palavras-chave em inglês:**

Polymeric composites

Carbon fiber

Milling

Composites

Polymers

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Doutor em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Nivaldo Lemos Coppini [Orientador]

Anselmo Eduardo Diniz

Amauri Hassui

Álisson Rocha Machado

João Roberto Ferreira

**Data de defesa:** 29-05-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

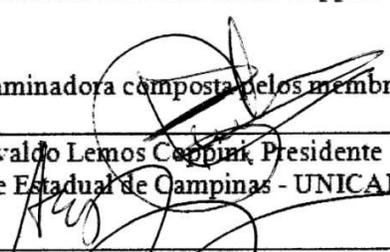
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MANUFATURA E**  
**MATERIAIS**

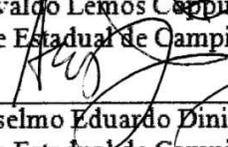
**TESE DE DOUTORADO**

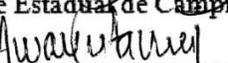
**CARACTERIZAÇÃO DO FRESAMENTO DE CHAPAS DE COMPOSITO**  
**POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC)**

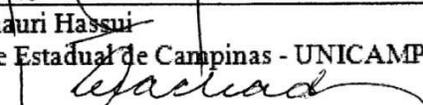
Autor: Francisco Romeo Martins  
Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini

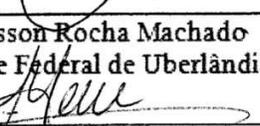
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Amauri Hassui  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alisson Rocha Machado  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Roberto Ferreira  
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Campinas, 29 de Maio de 2014

## RESUMO

Este trabalho se justifica pelo fato de que a utilização de materiais compósitos tem crescido substancialmente e os seus métodos de produção se tornaram mais populares. Estes materiais vêm sendo cada vez mais utilizados em aplicações das mais diversas áreas industriais, tais como: aeroespacial, aviação comercial, indústria naval, automobilística, indústrias de máquinas ferramentas e equipamentos desportivos. Os materiais compósitos (PRFC) são importantes materiais de componentes estruturais, devido às suas propriedades de alta resistência, elevada rigidez, elevado grau de amortecimento, baixa expansão térmica e boa estabilidade dimensional. Entretanto, devido à sua anisotropia, este material pode apresentar problemas durante a usinagem. Pode ocorrer ruptura de fibra, trincas, descolamento de fibras, degradação térmica e delaminação

O objetivo deste trabalho é caracterizar o material composto PRFC (Polímero Reforçado com Fibras de Carbono) em relação ao seu comportamento durante o processo de fresamento cilíndrico tangencial simétrico. Foi usado um método experimental onde uma fresa de 8 mm de diâmetro e com seis arestas de corte de metal duro ISO K10 foi usada para usinagem placas (PRFC) com 4 mm de espessura. Todo o limite da máquina foi explorado em termos de velocidade de corte que variou de 100 em 100 m/min. na faixa de 100 a 600 m/min. A profundidade de usinagem (espessura da chapa) foi de 4 mm. Dois avanços por dente da fresa foram utilizados em parte das experiências nos valores de 0,075 e 0,1 mm/dente. Os resultados obtidos mostraram que o principal mecanismo de desgaste foi abrasivo seguido por aderência cuja influência foi desprezível. Os valores dos coeficientes de vida de Taylor permitiram verificar que o material compósito é fácil de fresar. Os resultados das forças e potências de corte, instantâneas e médias também mostram ser um material fácil de cortar, principalmente quando comparado com um ferro fundido de baixa resistência. Os desgastes apresentaram comportamento não convencional e este fato foi evidenciado após a comparação feita com resultados obtidos para os mesmos tipos de materiais compósitos disponíveis na literatura. Não foi observada a presença de delaminação ou qualquer tipo de dano, pois, foi observada uma boa rugosidade da superfície fresada.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to characterize the composite Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) with respect to its behavior during symmetric cylindrical milling process. It was used an experimental method. 8mm milling cutter diameter with six cutting edge of cemented carbide ISO K10 was used to mill (CFRP) plates with 4 mm thick. The entire Machine limit was explored in terms of cutting speed from 100 to 600 m/min, 100 by 100 m/min steps. Other parameters were axial depth of cut 4 mm (plate width), feed rate of 0,075 and 0,1 mm/tooth. The focus of the present work is justified by the fact that the use of composite materials has been grown substantially and their manufacturing methods have become more popular and they are now being increasingly used in industrial applications such as aerospace, commercial aircrafts, ships, automobiles, machine tool and sports equipments. Composite materials such as carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are important materials for structural components owing to their excellent properties such as high specific strength, high specific stiffness, high damping, low thermal expansion and good dimensional stability. However, due to its anisotropy, (CFRP) poses problems in machining such as fiber breakage, matrix cracking, fiber/matrix debonding, fiber pullout, thermal degradation, and delamination. The results showed that the main wear mechanism was abrasion followed by attrition that showed to be absolutely not important. The Taylor's tool life coefficients showed that to cut the composite material was very easy. Instantaneous and medium cutting power and cutting forces determined during the tests showed that the composite material is easier to cut when compared, for instance, with a low resistance casting iron. The wear evolution showed not conventional behavior and this fact was evidenced after comparison made with similar results from the literature. It was not observed delamination or any kind of damage and it was observed a good surface roughness.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVO .....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.	Resumo da Revisão Bibliográfica.....	3
2.2.	Revisão Bibliográfica Propriamente Dita.....	4
2.3.	Detalhes Sobre o Que São os Materiais Compósitos.....	46
2.4.	Detalhes Sobre A Usinagem De Materiais Compósitos .....	61
3.	MATERIAIS E MÉTODO.....	69
4.	ases Teóricas Utilizadas No Trabalho .....	77
4.1	Caracterização do Fresamento Cilíndrico Tangencial .....	77
4.2	Avarias e Desgastes em Ferramentas de Fresamento .....	78
4.2.1	Avarias.....	78
4.2.2	Desgastes .....	80
4.2.3	Mecanismos de Desgaste.....	80
4.2.4	Vida de Ferramentas de Usinagem.....	83
4.2.5	Otimização dos Parâmetros de Corte .....	84
4.2.6	Força e Potência Instantânea de Corte no Fresamento.....	88
4.2.7	Força e Potência Média de Corte no Fresamento .....	89
4.2.8	Rugosidade de Superfície Fresada.....	91
4.3	Determinação do Número Mínimo de Amostra .....	92
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	95
5.1	Análise Quantitativa dos Desgastes.....	95
5.2	Análise do Comportamento dos Desgastes.....	99
5.3	Análise dos Mecanismos de Desgastes.....	106
5.4	Força de Usinagem do PRFC.....	110
5.4.1	Cálculo dos Coeficientes de Kinzle para Força Instantânea de Corte.....	114
5.4.2	Cálculo da Força Média de Corte.....	115
5.4.3	Determinação da Pressão Específica Média para os valores médios por dente, medidos na direção do eixo X, para a velocidade de corte de 100 m/min.. ..	115
5.4.4	Determinação da Pressão Específica Média para os valores médios por dente, medidos na direção do eixo Y, para a velocidade de corte de 100 m/min. ....	117
5.5	Rugosidade da Superfície Usinada .....	119

CONCLUSÃO .....	121
5.6 TRABALHOS FUTUROS .....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125
ANEXO 1 .....	135
ANEXO 2 .....	143
ANEXO 3 .....	147

*“A busca do bem é o que difere a ação humana de todos os outros animais.”*

(Aristóteles)

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela presença constante e, proporcionado-me a oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Comando da Aeronáutica – Comaer e ao Centro Técnico Aeroespacial – CTA, através do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, e em especial à Divisão de Mecânica – AME, a qual forneceu apoio logístico e técnico e recursos que tornaram possível a realização do presente trabalho.

Ao Prof. Nivaldo Lemos Coppini, meu orientador, pela confiança, incentivo e sua ajuda nos momentos de decisão, e acima de tudo pela dedicação, parceria e amizade sempre. Pela sua atuação constante como pesquisador e inspirador dos trabalhos realizados.

Ao Prof. Dr. Amauri Hassuí, pelo apoio, dedicação, paciência, e parceiro constante em todos os momentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus três motivos fortes, Rafael Vítor, Filipe Augusto, Camila Regina, e a minha dedicada e incansável esposa Márcia Regina, minhas desculpas pelos momentos de ausência e abnegação para a concretização deste trabalho.

À todos meus familiares pelo incentivo e compreensão durante a realização deste trabalho.

Ao meu chefe de Divisão (IAE/AME) Eng. Valderci Giacomelli, pelo apoio e estímulo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À divisão de ensaios (AIE), pela colaboração na realização dos ensaios, especialmente ao Eng. Geraldo e aos técnicos Hênio e Henrique pela dedicação durante a preparação, filmagem e monitoramento dos resultados obtidos.

Aos meus amigos da divisão de mecânica (IAE/AME), pelo apoio e incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho,

À doutora e pesquisadora Mirabel Cerqueira de Rezende, pelo apoio e paciência durante os momentos das consultas técnicas.

Ao doutor e pesquisador Davi Neves, pela atenção, apoio e paciência durante a realização dos ensaios.

Ao doutor e pesquisado Damião, pelo apoio e equipamentos cedidos durante a realização dos ensaios no IEAv.

Aos meus pais (em memória) e minha família pelo incentivo e apoio durante toda a extensão do trabalho.

Ao chefe de divisão de Materiais (IAE/AMR), apoiando no decorrer dos trabalhos com recursos laboratoriais em microscopia ótica e de varredura, especialmente à amiga pesquisadora Mirabel, pela suas palavras de incentivo e apoio.

À Divisão de Materiais- AMR, apoiando no decorrer dos trabalhos com a realização dos ensaios no MEV, através do Engº João Bosco e operador do MEV técnico Duke.

À empresa Faotec, aos amigos Vitor e Genésio pela amizade e pelo apoio no desenvolvimento das ferramentas.

À empresa Brasileira de Aeronáutica- EMBRAER, em nome dos Eng. Tironi e Leandro pelo apoio no desenvolvimento do ferramental, material para os ensaios, software e ferramentas.

À empresa Modelação Unidos, aos amigos diretor Jorge e Eng. Erick pelo apoio no desenvolvimento dos ensaios.

A todos os professores, funcionários e colegas da FEM/UNICAMP, que colaboraram de forma direta e indireta no decorrer deste trabalho, especialmente aos pesquisadores doutores Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz e Prof. Dr. Olívio Novalski.

E a todos aqueles que me ajudaram incentivando nos momentos difíceis na concretização deste trabalho, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FORMAS DE REFORÇOS E SUA DISTRIBUIÇÃO NAS MATRIZES (MARINUCCI, 2011).....	48
FIGURA 2 - ILUSTRAÇÃO DOS MONÔMEROS (A) ETILENO, (B) CLORETO DE VINILA (MARINUCCI, 2011).....	49
FIGURA 3 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA FIBRA DE CARBONO (BUCKLEY, 1991).....	54
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PRINCIPAIS TIPOS DE TRAMAS DE TECIDO DE REFORÇO (CHAWLA, 2012).....	56
FIGURA 5 - MOLDAGEM UTILIZANDO FIBRA PICADA, (JAMAL, Y. S., 2009).....	56
FIGURA 6 - MOLDAGEM UTILIZANDO FIBRA PICADA (JAMAL, 2009). ....	58
FIGURA 7 - DOIS TIPOS DE EQUIPAMENTOS PARA MOLDAGEM DE PEÇAS POR LAMINAÇÃO (JAMAL, 2009).....	58
FIGURA 8 - MOLDAGEM DE PEÇAS POR CAMISA DE VÁCUO (JAMAL, 2009). ....	59
FIGURA 9 - MOLDAGEM DE PEÇAS POR BOBINAGEM CNC (5 EIXOS) (JAMAL, 2009).....	59
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÕES DE PRÉ-FORMAS QUE TÊM SIDO UTILIZADAS (THOMAS, 2014).....	60
FIGURA 11 - CAMISA DE VÁCUO NA PARTE DE CIMA DA FIGURA E ABAIXO AUTOCLAVE, (REZENDE, 2011).....	61
FIGURA 12 - INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM NA SUPERFÍCIE USINADA DO MATERIAL COMPÓSITO À BASE DE FIBRAS (WOLFGANG, 2011). ....	63
FIGURA 13 - POSIÇÕES DE CORTE DE COMPÓSITOS EM RELAÇÃO ÀS VÁRIAS ORIENTAÇÕES DAS FIBRAS (KONIG ET AL., 1985). ....	63
FIGURA 14 - ADESÕES DE PARTÍCULAS DO COMPÓSITO NA SUPERFÍCIE DA ARESTA DA FERRAMENTA, (STACHOWIAK, G. H., 2005).....	63
FIGURA 15 - TIPOS DE ROMPIMENTO DAS FIBRAS DURANTE A USINAGEM (RAMULU, 2013).....	65
FIGURA 16 - RUPTURAS, DEFORMAÇÃO, E CISALHAMENTO DURANTE O CORTE DE COMPÓSITOS (RAMULU, 2013). ....	65
FIGURA 17 - POSIÇÕES RELATIVAS ENTRE A $V_C$ E $V_F$ EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS E, AS DIREÇÕES DE CORTE E AVANÇO DURANTE: (A) FRESAMENTO ( $0^0$ ); (B) FRESAMENTO ( $0^0, 90^0$ ) E (C) FRESAMENTO COM FIBRAS EM VARIAS DIREÇÕES, (WOLFGANG, H., 2011). ....	66
FIGURA 18 - EMISSÃO DE PÓ DURANTE USINAGEM POR FRESAMENTO (KLOCKE, 1996). ....	66
FIGURA 19 - CAMADAS FORMADORAS DA CHAPA UTILIZADA COMO CORPO DE PROVA PARA USINAGEM. ....	70
FIGURA 20 - IMAGEM DA FRESA CILÍNDRICA UTILIZADA NOS ENSAIOS. ....	71
FIGURA 21 - DETALHES DAS CUNHAS CORTANTES DA FRESA. ....	771
FIGURA 22 - CENTRO DE USINAGEM FIDIA D165 UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	772
FIGURA 23 - SISTEMA DE ASPIRAÇÃO E REMOÇÃO DOS PÓS DE PRFC GERADOS DURANTE A USINAGEM. ....	73
FIGURA 24 - MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO LEICA, MODELO S6D. ....	73
FIGURA 25 - DISPOSITIVO PARA MEDIDA DOS DESGASTES DA ARESTA DE CORTE DA FRESA E FACILITADOR DA MONTAGEM E DESMONTAGEM NO MICROSCÓPIO E NA MÁQUINA A CADA MEDIDA REALIZADA.....	74
FIGURA 26 - TERMO-CÂMERA UTILIZADA PARA MEDIR A TEMPERATURA DE CORTE. ....	74
FIGURA 27 - DISPOSITIVOS ESPECIALMENTE CONSTRUÍDOS PARA PERMITIR A MEDIDA DA RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES FRESADAS. ....	75

FIGURA 28 - SISTEMA ESPECIALMENTE MONTADO PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIDAS DA RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES FRESADAS.....	75
FIGURA 29 - OPERAÇÃO DE FRESAMENTO COM UMA FRESA ATUANDO COMO FRESA DE TOPO E CILÍNDRICA TANGENCIAL COM DENTES HELICOIDAIS. (DINIZ ET AL., 2013).....	78
FIGURA 30 - OPERAÇÃO DE USINAGEM QUE PODEM SER DESENVOLVIDAS COM UMA FRESA CILÍNDRICA TANGENCIAL. A) (FRESAMENTO SIMÉTRICO DE RASGO; B) FRESAMENTO SIMÉTRICO; C) FRESAMENTO ASSIMÉTRICO EM TODA A LARGURA DA PEÇA; D) FRESAMENTO ASSIMÉTRICO. ADAPTADA DE (DINIZ ET AL, 2013). ....	78
FIGURA 31 - ILUSTRAÇÕES DO DESGASTE DE FLANCO (A) E DOS DESGASTES DE ENTALHE (B) E (C). FOTOS DE INSERTOS COM OS DESGASTES MENCIONADOS. (DINIZ ET AL., 2013).....	80
FIGURA 32 - ILUSTRAÇÃO DO DESGASTE DE CRATERA E FOTO DE INSERTO COM O DESGASTE DE CRATERA (DINIZ ET AL., 2013). ....	80
FIGURA 33 - FAIXAS DE INCIDÊNCIA DOS MECANISMOS DE DESGASTES DE ACORDO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE. ADAPTADO DE: HTTP://WWW.MOLDESINJECAOPLASTICOS.COM.BR/AVARIAS.ASP NOVEMBRO DE 2013.....	81
FIGURA 34 - IME – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA. ....	88
FIGURA 35 - $IME_{MAQ}$ – INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA DA MÁQUINA.....	88
FIGURA 36 - RUGOSIDADE MÁXIMA TEÓRICA GERADA PELA FRESA CILÍNDRICA (DINIZ ET AL., 1999). .....	91
FIGURA 37 - EVOLUÇÃO DO DESGASTE DA FRESA COM O TEMPO DE CORTE. ....	96
FIGURA 38 - CURVA DE VIDA PARA O PAR FRESA/PRFC. ....	97
FIGURA 39 - EVOLUÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE (FERREIRA, 1999). ....	99
FIGURA 40 - EVOLUÇÃO DO DESGASTE COM A VELOCIDADE DE CORTE PARA O COMPRIMENTO DE CORTE DE 2000 MM (FERREIRA, 1999) (ADAPTADA PELO AUTOR).....	100
FIGURA 41 - DESGASTE DE FLANCO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE CORTE PARA COMPÓSITO PRFC-FB. AVANÇO 0,12 MM/ROT E PROFUNDIDADE DE USINAGEM DE 1 MM. (FERREIRA 1999). .....	101
FIGURA 42 - DESGASTE DE FLANCO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE PARA O MATERIAL PRFC-FP. AVANÇO 0,12 MM/ROT E PROFUNDIDADE DE USINAGEM DE 1 MM. (FERREIRA, 1999).....	101
FIGURA 43 - VARIAÇÃO DO DESGASTE COM A VELOCIDADE DE CORTE PARA O FRESAMENTO. ....	102
FIGURA 44 - MEDIDA DA TEMPERATURA DE CORTE COM A TERMOCÂMARA NO INÍCIO DA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO. ....	102
FIGURA 45 - MEDIDA DA TEMPERATURA DE CORTE NO FINAL DO REGISTRO, MOMENTO EM QUE A FERRAMENTA SE AFASTA DA PEÇA. ....	103
FIGURA 46 - EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS ATINGIDAS DURANTE O FRESAMENTO PARA AS VELOCIDADES TESTADAS(AVANÇO = 0,075 MM/ARESTA). ....	104
FIGURA 47 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE CORTE DURANTE O FRESAMENTO PARA CADA UMA DAS VELOCIDADES DE CORTE TESTADAS ( $F_z= 0,075$ MM/ARESTA). ....	105
FIGURA 48 - FOTO DA FERRAMENTA NOVA. ....	106
FIGURA 49 - FOTO DA MESMA FERRAMENTA DA FIGURA 48, MOSTRANDO POSSÍVEL ADERÊNCIA DO PRFC DEPOIS DO FRESAMENTO. ....	106
FIGURA 50 - DESTAQUE EM BRANCO DA REGIÃO DEMARCADA SOBRE A SUPERFÍCIE DO CANAL DE ACOMODAÇÃO E SAÍDA DO CAVACO MOSTRADA NA FIGURA 49.....	107
FIGURA 51 - ANÁLISE EDS SOBRE A REGIÃO DA FIGURA 46.....	107

FIGURA 52 - FOTO DO MATERIAL COMPÓSITO PRFC TIRADA COM O MEV QUE ESTAVA ADERENTE À SUPERFÍCIE DO CANAL DE ACOMODAÇÃO E SAÍDA DO CAVACO.....	108
FIGURA 53 - DESTAQUE DA SUPERFÍCIE DE FOLGA DA FERRAMENTA NOVA.....	108
FIGURA 54 - ANÁLISE EDS DA REGIÃO DESTACADA NA SUPERFÍCIE DE FOLGA DA FERRAMENTA NOVA. ....	108
FIGURA 55 - FOTO REALIZADA NO MEV MOSTRANDO PONTOS ESCUROS NA ARESTA DE CORTE DEPOIS DO FRESAMENTO DO PRFC. ....	109
FIGURA 56 - RESULTADOS DA ANÁLISE POR EDS DE UM DOS PONTOS ESCUROS DA FIGURA 55 (18% DE C E 78% DE W).....	109
FIGURA 57 - REGISTRO DA RESULTANTE DOS ESFORÇOS DE CORTE PARA AS CONDIÇÕES DE 100 M/MIN DE VELOCIDADE DE CORTE; 0,075 MM/ROT (A) E 0,1 MM/ROT DE AVANÇO (B) PARA UMA VOLTA COMPLETA DA FRESA.....	110
FIGURA 58 - = ILUSTRAÇÃO MOSTRANDO OS SENTIDOS DAS PROJEÇÕES DOS ESFORÇOS NA DIREÇÃO DO EIXO X (A) E NA DIREÇÃO DO EIXO Y (B) SEMPRE CONSIDERANDO A ROTAÇÃO NO SENTIDO HORÁRIO.....	112
FIGURA 59 - GRÁFICO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS COEFICIENTES $K_w$ E $w$ DA EQUAÇÃO QUE DETERMINA O VALOR DE $K_{SMX}$ , COM DADOS NA DIREÇÃO DO EIXO X.....	116
FIGURA 60 - GRÁFICO UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DOS COEFICIENTES $K_w$ E $w$ DA EQUAÇÃO QUE DETERMINA O VALOR DE $K_{SMY}$ , COM DADOS NA DIREÇÃO DO EIXO Y.....	117
FIGURA 61 - TENDÊNCIA DA VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE $R_a$ COM A VELOCIDADE DE CORTE.(AVANÇO DE 0,075MM/ARESTA .....	119

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSES DE MATERIAIS COMPÓSITOS (MARINUCCI, 2011) .....	47
TABELA 2 - PROPRIEDADES DAS RESINAS TERMOPLÁSTICAS (MARINUCCI, 2011). .....	50
TABELA 3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO POLIPROPILENO (MARINUCCI, 2011).....	50
TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIPROPILENO (REZENDE, 2011). .....	51
TABELA 5 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DO POLIPROPILENO (REZENDE, 2011).....	51
TABELA 6 - PROPRIEDADES DOS DIVERSOS TIPOS DE RESINAS TERMOFIXAS, (MARINUCCI, 2011) .....	52
TABELA 7 - PROPRIEDADE DAS FIBRAS DE CARBONO (MARINUCCI, 2011). .....	54
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS (MARINUCCI, 2011).....	59
TABELA 9 - PROPRIEDADES DO COMPÓSITO PRFC, (REZENDE, 2011). .....	71
TABELA 10 - AVARIAS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSO DE FRESAMENTO. ....	79
TABELA 11 - MECANISMOS DE DESGASTE E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSO DE FRESAMENTO (BUDINSKI, 1988).....	81
TABELA 12 - MECANISMOS DE DESGASTE E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O PROCESSO DE FRESAMENTO (BUDINSKI, 1988).....	82
TABELA 13 - EXEMPLO DOS VALORES DE $K_w$ E $w$ PARA AÇOS CARBONO (COPPINI ET AL., 2013). VALORES DETERMINADOS PARA UNIDADES [N E [MM]. .....	90
TABELA 14 - VALORES CRÍTICOS ASSOCIADOS AO GRAU DE CONFIANÇA NA AMOSTRA. ....	93
TABELA 15 - VIDA DA FRESA PARA CADA VELOCIDADE DE CORTE TESTADA .....	96
TABELA 16 - DADOS PARA OS CÁLCULOS DAS VELOCIDADES DE MÍNIMO CUSTO E MÁXIMA PRODUÇÃO.....	97
TABELA 17 - ILUSTRA O NÚMERO DE DENTES DA FRESA EM CONTATO COM A PEÇA, DURANTE O PROCESSO. ....	111
TABELA 18 - VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE COM A VELOCIDADE DE CORTE E COM O AVANÇO MEDIDA NA DIREÇÃO DO EIXO DO $X$ .....	112
TABELA 19 - VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE COM A VELOCIDADE DE CORTE E COM O AVANÇO MEDIDA NA DIREÇÃO DO EIXO DO $Y$ .....	112
TABELA 20 - VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE COM A VELOCIDADE DE CORTE MEDIDA NA DIREÇÃO DO EIXO DO $X$ , COMPARADA COM A MEDIDA NO EIXO $Y$ , PARA O AVANÇO DE 0,075 MM/DENTE/ROT.....	113
TABELA 21 - VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE COM A VELOCIDADE DE CORTE MEDIDA NA DIREÇÃO DO EIXO DO $X$ , COMPARADA COM A MEDIDA NO EIXO $Y$ , PARA O AVANÇO DE 0,1 MM/DENTE/ROT.....	114
TABELA 22 - COMPARAÇÃO DOS ESFORÇOS MÉDIOS E DA POTÊNCIA MÉDIA DE CORTE ENTRE O MATERIAL COMPÓSITO PRFC E O FOFO CINZENTO DE BAIXA RESISTÊNCIA. ....	118

## LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

### Nomenclatura

#### Letras Latinas

$a_p$	profundidade de usinagem	[mm]
$k$	constante da equação de Taylor	
$C'$	capacidade térmica	[KJ/KgK]
$C_{af}$	custo de afiação	[\$]
$C_{ft}$	custo de ferramenta por vida	[\$]
$C_p$	custo de usinagem por peça	[\$]
$C_{pf}$	custo do porta-ferramenta	[\$]
$C_{uf}$	custo da ferramenta	[\$]
$C_{um}$	custo da máquina	[\$]
$C_{us}$	custo de mão de obra de usinagem	[\$]
$E$	módulo de elasticidade	[Gpa]
$f$	avanço	[mm/volta]
$F_c$	força de corte	[N]
$F_f$	força de avanço	[N]
$F_p$	força passiva	[N]
$K$	constante da equação de Taylor	
$K_{lc}$	tenacidade à fratura	[MPa]
$K_s$	pressão específica de corte	[N/mm <sup>2</sup> ]
$KT$	profundidade do desgaste de cratera	[ $\mu$ m]
$L_c$	comprimento de corte	[m]
$L_f$	comprimento do avanço	[mm]
$n$	rotação	[rpm]
$n_1$	número de vidas da ferramenta	
$n_2$	número de afiações	
$n_{pf}$	número de vidas do porta-ferramentas	

$P_{el}$	potência elétrica consumida pela máquina	[W]
$P_c$	potência de corte	[CV]
$r_\epsilon$	raio de ponta	[mm]
$S_h$	salário e encargos do operador	[\$/hora]
$S_m$	custo total da máquina	[\$/hora]
$T$	vida da ferramenta	[min]
$t_a$	tempo de aproximação e afastamento	[min]
$t_c$	tempo de corte	[min]
$t_{ft}$	tempo de troca da ferramenta	[min]
$t_i$	tempos improdutivos	[min]
$t_p$	tempo de preparo da máquina	[min]
$t_s$	tempo secundário	[min]
$t_t$	tempo total de usinagem de uma peça	[min]
$V$	tensão elétrica do motor	[V]
$V_0$	velocidade de mínimo custo	[m/min]
$V_{c_{ot}}$	velocidade de corte otimizada	[m/min]
$V_f$	fração volumétrica	[%]
$V_{m_{xp}}$	velocidade de máxima produção	[m/min]
$x$	constante de equação de Taylor	
$w$	ângulo de bobinagem	[graus]
$Z$	número de peças de um lote	

## LETRAS GREGAS

$\alpha$	ângulo entre a direção de corte e a orientação das fibras	[graus]
$\alpha_0$	ângulo de folga no plano ortogonal	[graus]
$\alpha'$	coeficiente de expansão linear	[°K <sup>-1</sup> ]
$X_r$	ângulo de posição da ferramenta	[graus]
$\epsilon$	deformação do material à ruptura	[%]
$\Phi$	ângulo de cisalhamento do cavaco	[graus]
$\lambda$	condutividade térmica	[W/m.K]
$\lambda_s$	ângulo de inclinação medido no plano de corte	[graus]
$\rho$	densidade	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_c$	resistência à compressão	[MPa]
$\sigma_T$	resistência à tração	[MPa]
$\sigma_{rt}$	resistência à ruptura transversal	[Kg/mm <sup>2</sup> ]

## ABREVIACES

A/D	analógico/digital	
APC	aresta postga de corte	
C/C	carbono-carbono	
CMC	compósito de matriz cerâmica	
CRFC	carbono reforçado com fibras de carbono	
CVD	deposição química de vapor	
FC	fibra de carbono	
HRC	dureza Rockwell C	
HV	dureza Vickers	
MEV	microscópio eletrônico de varredura	
MMC	compósito de matriz metálica	
PAN	poliacrilonitrila	
Patm	pressão atmosfera	
PCBN	nitreto de boro cúbico policristalino	
PIC	impregnação e carbonização sob pressão	
Prepeg	pré-impregnado	
PRF	plástico reforçado com fibras	
PRFC	plástico reforçado com fibras de carbono	
PRFC-FP	plástico reforçado com fibras de carbono picada	
PRFC-FB	plástico reforçado com fibras de carbono bobinada	
PRFC-V	plástico reforçado com fibras de vidro	
R <sub>a</sub>	rugosidade média	µm
R <sub>max</sub>	rugosidade máxima	µm
RFC	reforçado com fibras de carbono	
SiC	carbeto de silício	
TTT	temperatura de tratamento térmico	
TiC	carbeto de titânio	
TiCN	carbonitreto de titânio	
TiN	nitreto de titânio	

$V_c$	Velocidade de Corte (m/min.);
VB	desgaste de flanco da ferramenta
$VB_b$	desgaste de flanco médio da ferramenta
$VB_c$	desgaste de entalhe no flanco secundário da ferramenta
$VB_n$	desgaste de entalhe no flanco principal da ferramenta
WC	carboneto de tungstênio

## SIGLAS

CTA	Centro Técnico Aeroespacial
UNICAMP-	Universidade Estadual de Campinas
DEF	Departamento de Engenharia de Fabricação
VLS	Veículo lançador de satélite .
IAE	Instituto de Aeronáutica e espaço
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
AME	Divisão de Mecânica
AMR	Divisão de Materiais
AIE	Divisão de Ensaios
CNC	Comando Numérico Computadorizado

# 1. INTRODUÇÃO

A utilização dos materiais pelo homem primitivo foi motivada essencialmente pela curiosidade estética. E de fato, os estudos arqueológicos indicam que o homem utilizou os materiais para confeccionar objetos decorativos (pinturas nas paredes das cavernas e esculturas) antes mesmo de utilizá-los para a confecção de objetos que facilitassem a sua sobrevivência.

Com o passar do tempo, o homem foi utilizando crescentemente os materiais para melhorar o seu padrão de vida. Na Mesopotâmia, há 2500 anos, a utilização de metais e ligas para a confecção dos mais diversos objetos já estava disseminada (SMITH, 2010).

Ao longo dos séculos, a evolução do conhecimento esteve intimamente ligada ao aprimoramento e ao desenvolvimento de novos materiais, que permitiram atingir duas das mais importantes etapas do progresso humano: a navegação marítima e a exploração do espaço. Esta evolução contínua, no entanto, tem exigido materiais ainda mais resistentes que seus predecessores e, ao mesmo tempo, mais leves. Aços especiais, como o maraging, e ligas de alumínio de alta resistência têm contribuído significativamente para este fim.

Nesse contexto, os materiais compósitos têm tido participação relevante nas últimas quatro décadas, especialmente naquelas envolvendo tecnologias de ponta. Com o aprimoramento da química orgânica, desenvolvendo resinas apropriadas para as mais diversas aplicações, e a evolução da qualidade das fibras de vidro, foi possível a afirmação dos compósitos poliméricos como materiais de engenharia.

Todavia, foi com o surgimento da fibra aramida e da fibra de carbono que os compósitos tiveram um grande salto tecnológico. Estes tiveram sucesso em projetos arrojados como é exigido na indústria nuclear, na indústria aeronáutica e aeroespacial, na indústria petroquímica, na fabricação veículos de competição e na fabricação de embarcações (MARINUCCI, 2010). A evolução dos compósitos poliméricos tem permitido a fabricação de peças e estruturas antes reservada aos metais. O emprego de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) em componentes estruturais eleva a confiabilidade dos materiais compósitos e lhes garante cada vez mais aplicações. Projetos recentes, como os inovadores Boeing 787 e Airbus A-350, reafirmam o potencial dos compósitos e sua capacidade de reduzir componentes e massa sem que ocorra comprometimento do comportamento mecânico.

Quando comparado com os metais, os componentes de materiais compósitos poliméricos são resistentes ao ataque químico, são não magnéticos, apresentam uma excepcional relação resistência/peso e uma expressiva redução de peso na fabricação de peças e componentes. Permitem também, a consolidação de vários elementos em um único componente, eliminando pontos de solda e rebites que seriam necessários para fixar as partes de uma peça.

O material tem uso bastante diversificado, estando presente em quase todos os segmentos que envolvem aplicações aeroespaciais, náuticas e terrestres. Como exemplo de aplicações militares tem-se o envelope de combustível sólido de foguetes, vasos de pressão, componentes empregados em mísseis e em aviões de combate.

De aplicações civis, entre outras, são fabricados estruturas de satélites, tanques de armazenagem, barcos, tubos, artigos esportivos, chassi e carenagem de automóveis de competição, componentes de avião e veículos de transportes, piscinas e banheiras, telhas, estações compactas de tratamento de água e equipamentos para obtenção de energia eólica.

Como definição de materiais compósitos, o significado do substantivo compósito indica que este é formado por dois ou mais componentes, o que poderia levar à conclusão que todo material tendo dois ou mais materiais distintos ou fases distintas poderia ser considerado como material compósito. Na verdade, para ser representativo da definição atual de compósito ou material compósito, admite-se que as fases constituintes apresentem nítida diferença nas propriedades físicas e químicas, mostrando pelo menos uma fase descontínua e uma fase contínua.

## **1.1. OBJETIVO**

A exigência dos requisitos de desempenhos em estruturas aeroespaciais vem propiciando o desenvolvimento de novos materiais, bem como de novas técnicas de fabricação. Normalmente, elevados valores de resistência e rigidez são procurados, obtendo-se freqüentemente soluções por meio da utilização de materiais compósitos, particularmente polímeros termofixos dotados de reforços fibrosos.

O objetivo deste trabalho é caracterizar o compósito PRFC, apresentando e analisando suas propriedades e o seu comportamento durante a usinagem por fresamento de chapas típicas normalmente aplicadas em indústrias aeroespaciais e aeronáuticas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta dois itens: um primeiro que resume a revisão bibliográfica realizada nos últimos anos e um segundo que apresenta a lista de revisões propriamente ditas relacionadas por autores.

### **2.1. RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Foi possível observar durante a revisão bibliográfica, alguns aspectos que mereceram destaque e serão resumidos em seguida:

Materiais compósitos em geral e, em particular, à base de fibras de qualquer natureza, despertam o interesse dos pesquisadores já há algum tempo. Entretanto, foram encontrados inúmeros artigos recentes, no período de 2010 a 2013, que mostram que o assunto está ainda sendo alvo de muitas pesquisas, fazendo parte da preocupação em desenvolvimento deste assunto com frequência.

As pesquisas publicadas que foram levantadas mostram desde o desenvolvimento de novos materiais compósitos, como também, a preocupação em caracterizar melhor os processos de fabricação que são utilizados na produção das peças. Estes processos são: fundição, moldagem e usinagem de materiais compósitos de qualquer natureza. No caso da usinagem, foram encontrados trabalhos em torneamento, furação, fresamento e retificação.

No caso particular dos processos de usinagem foram publicados artigos que utilizaram microscopia ótica e eletrônica na avaliação dos mecanismos de desgastes atuantes durante processos de usinagem. Ao serem avaliados, os níveis de desgastes foram levantados e o principal mecanismo de desgaste apontado foi a abrasão. Em segundo lugar, vem o mecanismo de aderência, porém de forma muito menos significativa que o mecanismo por abrasão.

Em alguns casos foram utilizados *softwares* e métodos estatísticos tais como softwares de elementos finitos e DOE, respectivamente.

Foi analisada a influência sobre os mais diversos parâmetros de usinagem, tendo como entrada o avanço, a profundidade de usinagem e a velocidade de corte, a variação da orientação

das fibras de carbono, a refrigeração criogênica, o uso da técnica de MQL, a refrigeração por inundação, etc.. Os parâmetros de saída foram o desgaste, o mecanismo de desgaste, a temperatura de corte, os esforços de corte, a rugosidade e a integridade da superfície e subsuperfície, etc..

## **2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PROPRIAMENTE DITA**

Classificação da revisão por áreas de fabricação, temos;

### **1 – Furação**

Plásticos Reforçados por Fibra de Carbono (PRFC) são compósitos que têm potencial para aplicações em vários setores. Furação é um processo requerido essencialmente para unir mecanicamente diferentes estruturas. A furação de PRFC exige cuidados especiais, podendo gerar problemas que diminuem a qualidade de furos. Nesta pesquisa, os estudos de Krishnamoorthy et al,( 2012) em furações de materiais compósitos, o arranjo ortogonal usado pelo método Taguchi foi aplicado na execução de furos em compósitos PRFC. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos furos, uma combinação de parâmetros ideais é escolhida denominada grupo cinza. Foram criados cinco grupos indistintos com características de desempenho definidas, força de torque, torque de delaminação, saída de delaminação e excentricidade dos furos. Análise de Variância (ANOVA) foi usada para encontrar a porcentagem de contribuição dos parâmetros e também a influencia do avanço na furação de compósitos PRFC.

Delaminação é um dos efeitos indesejáveis de usinagem quando usando parâmetros de corte não apropriados na usinagem de materiais compósitos. A modelagem por elementos finitos de usinagem no processo de furação foi uma ferramenta adequada para previsão de surgimento de danos. O custo computacional desta modelagem complexa tem sido a grande desvantagem quando comparando com modelos simplificados que considera a ferramenta broca como um perfurador que atravessa o compósito. Nesta pesquisa realizada por Feito et al., (2013), ambos os modelos completos e simplificados foram utilizados e comparados em termos de prever o surgimento de delaminações. O modelo simplificado apresentou resultados adequados e menor custo computacional que o mais complexo.

Na pesquisa realizada por Taskesen et al., (2011) parâmetros de usinagem foram avaliados e otimizados com análise relacional aplicados na furação de Compósitos de Matriz Metálica (MMCs) reforçados por B4C produzidos por metalurgia do pó. Brocas de HSS e metal duro revestidas de TiAlN foram ensaiadas em corte sem adição de fluidos de corte. Os parâmetros: avanço, material das brocas e porcentagem de partículas de B4C foram otimizados com base em características de desempenho múltiplo incluindo torque e rugosidade. A pesquisa realizada mostrou que o aumento da porcentagem de B4C resulta em considerável aumento do torque. Além disso, a média da rugosidade dos furos diminuiu com o aumento do conteúdo de partículas para ferramentas de metal duro e aumentou para ferramentas de aço rápido. Entre as ferramentas testadas, as de metal duro revestidas de TiAlN mostraram melhor desempenho quando o parâmetro foi a rugosidade. Os fatores de maior influência foram o material da ferramenta e o avanço.

Plásticos Reforçados por Fibra de Carbono (PRFC) são compósitos que têm potencial para aplicações em vários setores. Furação é um processo requerido essencialmente para unir mecanicamente diferentes estruturas. A furação de PRFC exige cuidados especiais, podendo gerar problemas que diminuem a qualidade de furos. Nesta pesquisa, os estudos de Krishnamoorthy et al. (2012) em furações de materiais compósitos, o arranjo ortogonal usado pelo método Taguchi foi aplicado na execução de furos em compósitos PRFC. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos furos, uma combinação de parâmetros ideais é escolhida denominada grupo cinza. Foram criados cinco grupos indistintos com características de desempenho definidas, força de torque, torque de delaminação, saída de delaminação e excentricidade dos furos. Análise de Variância (ANOVA) foi usada para encontrar a porcentagem de contribuição dos parâmetros e também a influência do avanço na furação de compósitos PRFC.

Na pesquisa realizada por Taskesen et al., (2011) parâmetros de usinagem foram avaliados e otimizados com análise relacional aplicados na furação de Compósitos de Matriz Metálica (MMCs) reforçados por B4C produzidos por metalurgia do pó. Brocas de HSS e metal duro revestidas de TiAlN foram ensaiadas em corte sem adição de fluidos de corte. Os parâmetros: avanço, material das brocas e porcentagem de partículas de B4C foram otimizados com base em características de desempenho múltiplo incluindo torque e rugosidade. A pesquisa realizada mostrou que o aumento da porcentagem de B4C resulta em considerável aumento do

torque. Além disso, a média da rugosidade dos furos diminuiu com o aumento do conteúdo de partículas para ferramentas de metal duro e aumentou para ferramentas de aço rápido. Entre as ferramentas testadas, as de metal duro revestidas de TiAlN mostraram melhor desempenho quando o parâmetro foi a rugosidade. Os fatores de maior influência foram o material da ferramenta e o avanço.

Iliescu et al., (2010) realizaram testes experimentais visando a previsão e avaliação de esforços de corte em furação de materiais compósitos de polímeros reforçados com fibra de carbono. Com o objetivo de entender e melhorar a qualidade de furos, uma avaliação do comportamento de ferramentas com e sem revestimentos se fez necessária. Os resultados experimentais indicaram que o avanço e o desgaste foram os fatores que mais influenciaram o valor da força de corte. Este modelo pode então ser usado para monitorar desgaste de ferramentas.

Marques et al., (2009) realizaram pesquisas em furação de compósito epóxi reforçadas com fibra de carbono. Neste trabalho, quatro brocas, sendo três comerciais e um protótipo especial proposto, são comparadas em termos de força de avanço durante a furação e delaminação. A broca protótipo mostrou resultados encorajadores em termos de força de avanço e redução do efeito de delaminação. Além disso, foi possível afirmar que a escolha correta da geometria da broca, da velocidade de corte de 53 m/min. e o baixo avanço de 0,025 mm/rev. tende a evitar a delaminação.

A flutuação de carga que atua na aresta de corte durante a furação de compósitos promove características de desgaste em função da anisotropia das fibras duras e das interações termomecânicas entre a superfície da broca e o compósito com a inerente baixa condutividade térmica, principalmente quando comparado com os metais. As fibras duras causam o excessivo desgaste abrasivo e geram calor por fricção enquanto a matriz um pouco mais macia e aderente que as fibras provocam o arredondamento e alisamento das arestas. Desgaste abrasivo, lascamento e adesão são os mecanismos de desgaste de ferramentas durante a furação de compósitos laminados. Poucas pesquisas foram encontradas na literatura sobre furação em alta velocidade de corte em compósitos laminados. O objetivo sempre foi obter menos delaminação pela redução de forças de avanço. Foram apresentados os efeitos das variáveis de processo (como velocidade de corte e de avanço, e ângulo de ponta da broca) na delaminação durante a furação

em alta velocidade. Revelou-se redução na tendência de delaminação com o aumento da velocidade de corte. A combinação de baixa velocidade de avanço e de ângulo de ponta torna-se essencial para minimizar a delaminação de laminados compósitos (LIU et al., 2013).

Na furação de compósitos o micro lascamento e a abrasão são os principais mecanismos de desgaste das brocas de metal duro. Os dois regimes de fricção, o leve (provocado pela matriz) e o pesado (provocado pelas fibras) determinam as cargas dinâmicas das forças atuantes, provocam a delaminação do compósito e a rugosidade da superfície. A fricção agressiva das fibras de grafite fraturadas e o atrito dos grãos de WC contra a matriz macia de epóxi mole causam elevação da temperatura e conseqüentemente, acelera o desgaste de flanco. Durante as fases primárias e secundárias de desgaste, o desgaste de flanco de arestas de corte é dominante, enquanto a adesão de carbono ocorre juntamente com abrasão na zona terciária. No ensaio de vida da ferramenta percebeu-se o aumento da rugosidade da superfície e a ocorrência de delaminação na transição do regime de desgaste de primário para o secundário e terciário. Segundo os estudos de Rawat, (2014) micros lascamentos ocorrem no início do processo de furação, com subseqüente abrasão e possivelmente a adesão de carbono. Estes são os três mecanismos de desgaste dominantes observados na furação de alta velocidade em compósitos. Desgaste abrasivo na face de flanco da aresta de corte primária, muito mais dominante do que o desgaste na superfície de saída, é o principal comportamento não linear do sistema tribológico ferramenta/peça. A transição do tribosistema de primário para o secundário e, finalmente, para a região de desgaste terciário regula a mudança de variáveis de processo, tais como, às forças de corte e de avanço e, assim, afeta a qualidade do furo seja pela delaminação, erros geométricos, e a rugosidade da superfície. Existe uma forte correlação entre as variáveis de processo e o desgaste da ferramenta, bem como a qualidade final do furo.

Devido à estrutura anisotrópica e heterogênea do compósito, defeitos provocados pela furação tais como a delaminação em torno da borda do furo é crítica e prejudicial para a durabilidade, reduzindo a vida em serviço de componentes. Na indústria aeronáutica a delaminação responde por 60% das rejeições durante a fase final de montagem de uma aeronave. A delaminação pode se tornar um fator limitante no uso de compósitos para aplicações estruturais. Desta forma tecnologias que melhorem a qualidade da furação em compósitos é imperativa (LINBO et al., 2009).

Uma alternativa a furação convencional, a furação orbital permite a realização de diferentes geometrias com uma mesma ferramenta. Esta técnica permite uma melhor integridade da superfície em compósitos, conduz a temperaturas de processo mais baixas e as forças de avanço inferiores. Somente em velocidade de corte elevadas é que trincas na superfície dos furos podem ser observadas (BRINKSMEIER et al., 2013).

## **2 - Torneamento**

Hanafi et al. (2012) estudaram o torneamento de material compósito de fibras de carbono e outras fibras reforçadas com carbono, cuja especificação é PEEK CF30 (polímero reforçado com 30% de fibra de carbono). Na verdade, os autores estavam interessados em identificar a potencialidade do estudo com a aplicação de lógica fuzzy e puderam concluir sobre a validade de aplicação deste procedimento quando estudaram o comportamento da usinagem através de ensaios de medida de esforços e da potência de corte.

A usinabilidade dos compósitos de fibra de carbono é fortemente dependente do ângulo de orientação das fibras. No torneamento, o ângulo de orientação das fibras medido no plano de trabalho varia continuamente em relação à pontada ferramenta. Esta variação promove solicitações mecânicas ora de tração e ora de compressão, alterando o mecanismo de formação do cavaco e promovendo a formação de defeitos na peça. A medição do ângulo de cisalhamento em compósitos é difícil e não há nenhuma técnica padronizada de medição nestes materiais. Com exceção do ângulo de inclinação da fibra de  $0^\circ$ , os cavacos são geralmente na forma de pó, tornando extremamente difícil de medir a espessura do cavaco para determinar o ângulo de cisalhamento. É questionável que o ângulo médio de atrito entre o cavaco e a ferramenta possa ser o mesmo para todos os ângulos de orientação das fibras. A estimativa de força de corte é extremamente complexa conforme Bhatnagar et al. (2014).

Em função da presença de fases com propriedades mecânicas e térmicas drasticamente diferentes, existem interações complexas entre a matriz e o reforço durante a usinagem. A natureza abrasiva da fibra provoca o desgaste severo na ferramenta de corte durante a usinagem. O mecanismo de usinagem envolve a combinação de deformação plástica, cisalhamento e ruptura por flexão. Estes mecanismos dependem da flexibilidade, tenacidade e orientação das fibras. As

áreas desgastadas pela usinagem de compósito concentram-se na área do flanco e na ponta da ferramenta de corte. O desgaste de ponta sobre a ferramenta de corte é função das cargas dinâmicas e o desgaste na área do flanco está associado com a abrasão, aderência e ao calor intenso. Normalmente o desgaste de cratera não ocorre na ferramenta de corte na usinagem de compósitos. Parâmetros de corte afetam o desgaste durante a usinagem de compósitos, sendo que a influência da velocidade de corte afeta de forma mais significativa, quando se atinge o pico crítico. O aumento da velocidade de avanço leva a um maior desgaste de flanco da ferramenta e o aumento da profundidade de corte aumenta a geração de calor e desgaste na ferramenta conforme estudos realizados por Ferreira et al., (1999 e 2012).

Este trabalho desenvolvido por Sahoo et al. apresenta o desenvolvimento de compósitos Al/SiCp (10%) de matriz metálica por um processo de fundição convencional e suas características de usinagem em torneamento usando ferramentas de corte de metal duro revestidas de TiN em processo de usinagem com e sem fluido de corte. Abrasão foi o desgaste predominante neste estudo experimental realizado por Sahoo et al., (2012). A velocidade de corte mostrou ser a variável mais significativa afetando o desgaste de flanco e, por outro lado, o avanço mostrou-se o parâmetro que mais influenciou na rugosidade superficial. Os valores experimentais obtidos foram muito dispersos, não sendo adequados para sugerir aplicações na prática.

Este trabalho desenvolvido por Sahoo et al. apresenta o desenvolvimento de compósitos Al/SiCp (10%) de matriz metálica por um processo de fundição convencional e suas características de usinagem em torneamento usando ferramentas de corte de metal duro revestidas de TiN em processo de usinagem com e sem fluido de corte. Abrasão foi o desgaste predominante neste estudo experimental realizado por Sahoo et al., (2012). A velocidade de corte mostrou ser a variável mais significativa afetando o desgaste de flanco e, por outro lado, o avanço mostrou-se o parâmetro que mais influenciou na rugosidade superficial. Os valores experimentais obtidos foram muito dispersos, não sendo adequados para sugerir aplicações na prática.

### **3 - Fresamento**

A complexidade do processo de usinagem, o relacionamento não linear entre os parâmetros, e a variação aleatória das propriedades dos materiais, torna a previsão de vida da ferramenta durante a usinagem de compósitos, um desafio. Entretanto, a pesquisa realizada por Azmi et al.,

(2012) apresenta a aplicação de técnicas de modelamento para análise de vida da ferramenta durante o processo de fresamento. Os experimentos de fresamento a seco foram realizados com o objetivo de obter dados e comparar a parâmetros já conhecidos baseados na lógica aleatória de Mamdani. Os resultados experimentais mostraram que os valores obtidos visando prever a vida da ferramenta ficaram próximos daqueles obtidos pelo modelo proposto.

Delaminação é um dos efeitos indesejáveis de usinagem quando usando parâmetros de corte não apropriados na usinagem de materiais compósitos. A modelagem por elementos finitos de usinagem no processo de furação foi uma ferramenta adequada para previsão de surgimento de danos. O custo computacional desta modelagem complexa tem sido a grande desvantagem quando comparando com modelos simplificados que considera a ferramenta broca como um perfurador que atravessa o compósito. Nesta pesquisa realizada por Feito et al., (2013), ambos os modelos completos e simplificados foram utilizados e comparados em termos de prever o surgimento de delaminações. O modelo simplificado apresentou resultados adequados e menor custo computacional que o mais

Lasri et al., (2011) observaram danos geradores de trincas na matriz, fraturas de fibras e delaminações que ocorrem na usinagem de materiais compósitos. Geralmente, mecanismos de danos em usinagem de compósitos incluem quatro tipos de avarias: trincas transversais na matriz, descolamento na interface fibra/matriz, ruptura da fibra e início de delaminação. A qualidade superficial mostra uma importante regra na melhoria de vida da ferramenta de corte, considerando a resistência ao desgaste durante a usinagem de peças em compósitos. No caso de usinagem de materiais compósitos com alta velocidade, a qualidade superficial do produto pode ser melhorada devido à possibilidade de modificar os parâmetros de usinagem. Estes pesquisadores em suas análises procuraram mostrar os efeitos dos parâmetros de corte e os efeitos causados por danos superficiais nos componentes usinados, e sua resistência ao desgaste. Foi observado também neste estudo que as trincas entre matriz e a interface com as fibras ocorrem primeiro, seguido pelo desgaste das fibras. As progressões das delaminações entre a matriz e a interface das fibras ocorrem paralelas à direção das fibras. A disposição e orientação das fibras na estrutura do compósito induzem resistência ao corte e provocam o desgaste da ferramenta com presença de danos de delaminação devido aos esforços de corte.

Rusinek (2013) realizou um trabalho sobre fresamento do material compósito EPCM (Resina Epóxi reforçada com Fibras de Carbono). Concluiu que o aumento do avanço provocou um aumento nos esforços de corte, o que é relativamente óbvio, apesar de ter dado a contribuição de que este comportamento também valia para o referido material. Observou que a variação da rotação levou a uma estabilidade variada do sistema de usinagem. Relata que esta influência foi mais significativa que a existência de atrito durante o corte.

Um trabalho sobre a medida de forças durante operação de fresamento foi realizado por Schulze et al. (2011) usinando um compósito PRFG(fibra de vidro). O trabalho tratou de verificar a relação  $r_e/a_p$ (raio de ponta da ferramenta/profundidade de usinagem) maior e menor que a unidade. O trabalho resultou nas seguintes conclusões: para  $r_e/a_p$  menor que a unidade, a força específica de corte cresceu desproporcionalmente. O raio de ponta da ferramenta também exerceu variação significativa tanto no valor da força de corte quanto na sua direção.

Nas ultimas décadas, a aplicação de Polímeros Reforçados por Fibra de Carbono (PRFC) no setor aeroespacial tem aumentado drasticamente. Aspinwall et al., (2014) apresentam detalhes e efeitos de parâmetros relacionados com materiais de ferramentas (WC & PCD), e comportamento de ferramentas na usinagem a seco com refrigeração e sua relação com a rugosidade e integridade do material testado, quando comparou controle destes parâmetros com o método de Taguchi. O Microscópio Eletrônico de Varredura foi utilizado para mostrar a influência da orientação das fibras e sua relação com a direção de corte. Danos térmicos ocorridos durante a usinagem foram minimizados com refrigeração a ar. Ferramentas de diamantes (PCD) forneceram grandes vantagens no aumento de produtividade quando comparadas com metal duro (WC), com rugosidades média na faixa de 3.6  $\mu\text{m}$ , velocidade de corte de 200 m/min. e avanço por aresta de 0.03 mm.

A complexidade do processo de usinagem, o relacionamento não linear entre os parâmetros, e a variação aleatória das propriedades dos materiais, torna a previsão de vida da ferramenta durante a usinagem de compósitos, um desafio. Entretanto, a pesquisa realizada por Azmi et al., (2012) apresenta a aplicação de técnicas de modelamento para análise de vida da ferramenta durante o processo de fresamento. Os experimentos de fresamento a seco foram realizados com o objetivo de obter dados e comparar a parâmetros já conhecidos baseados na

lógica aleatória de Mamdani. Os resultados experimentais mostraram que os valores obtidos visando prever a vida da ferramenta ficaram próximos daqueles obtidos pelo modelo proposto.

Santiuste et al. (2010) analisaram o comportamento de fibras longas durante a usinagem ortogonal de compósitos reforçados por fibra de carbono com aplicação de método de elementos finitos. O mecanismo de formação de cavaco na usinagem de polímero reforçado com Carbono (PRFC) foi analisado. Observaram-se diferenças significantes de danos induzidos no decorrer da usinagem. Verificou-se que os danos estendiam-se pela superfície de saída e pela superfície de folga da ferramenta no caso de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV). Estes danos foram observados em menor escala no caso de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). A orientação da fibra influencia os mecanismos de formação de cavacos.

A usinagem de compósitos reforçados por fibra é uma importante atividade na integração de materiais avançados em aplicações de engenharia. Segundo Kalla et al., (2010) os danos causados por usinagem devido às excessivas forças de corte, podem ocasionar rejeição de componentes nas últimas etapas do ciclo de produção dos mesmos. Entretanto, é possível especificar forças de corte e selecionar parâmetros que resultem em danos menores durante a usinagem. A pesquisa usa técnicas modernas para simular o fresamento helicoidal de polímeros reforçados com fibra de carbono. A metodologia é baseada na previsão das forças de corte através da medida da energia de corte gerada pelo processo. Este procedimento mostrou-se adequado durante a usinagem de laminados unidirecionais. Entretanto, não houve o mesmo resultado para o caso de usinagem de laminados multidirecionais.

Lasri et al., (2011) observaram danos geradores de trincas na matriz, fraturas de fibras e delaminações que ocorrem na usinagem de materiais compósitos. Geralmente, mecanismos de danos em usinagem de compósitos incluem quatro tipos de avarias: trincas transversais na matriz, descolamento na interface fibra/matriz, ruptura da fibra e início de delaminação. A qualidade superficial mostra uma importante regra na melhoria de vida da ferramenta de corte, considerando a resistência ao desgaste durante a usinagem de peças em compósitos. No caso de usinagem de materiais compósitos com alta velocidade, a qualidade superficial do produto pode ser melhorada devido à possibilidade de modificar os parâmetros de usinagem. Estes pesquisadores em suas análises procuraram mostrar os efeitos dos parâmetros de corte e os efeitos causados por danos superficiais nos componentes usinados, e sua resistência ao desgaste.

Foi observado também neste estudo que as trincas entre matriz e a interface com as fibras ocorrem primeiro, seguido pelo desgaste das fibras. As progressões das delaminações entre a matriz e a interface das fibras ocorrem paralelas à direção das fibras. A disposição e orientação das fibras na estrutura do compósito induzem resistência ao corte e provocam o desgaste da ferramenta com presença de danos de delaminação devido aos esforços de corte.

A usinagem de compósitos reforçados por fibra é uma importante atividade na integração de materiais avançados em aplicações de engenharia. Segundo Kalla et al., (2010) os danos causados por usinagem devido às excessivas forças de corte, podem ocasionar rejeição de componentes nas últimas etapas do ciclo de produção dos mesmos. Entretanto, é possível especificar forças de corte e selecionar parâmetros que resultem em danos menores durante a usinagem. A pesquisa usa técnicas modernas para simular o fresamento helicoidal de polímeros reforçados com fibra de carbono. A metodologia é baseada na previsão das forças de corte através da medida da energia de corte gerada pelo processo. Este procedimento mostrou-se adequado durante a usinagem de laminados unidirecionais. Entretanto, não houve o mesmo resultado para o caso de usinagem de laminados multidirecionais.

A usinagem de materiais compósitos leva o sistema a altas temperaturas e danos das superfícies usinadas. Isto pode causar perda de desempenho das peças usinadas. Esta pesquisa realizada por GHIDOSI et al. apresenta uma investigação da influência de parâmetros de corte na usinagem de materiais compósitos. A análise da rugosidade da superfície usinada e as observações microscópicas revelam a importância fundamental da orientação relativa das fibras com respeito ao sentido de corte. Análises experimentais identificam a influência dos parâmetros de corte e geometria da aresta de corte sobre as tensões finais dos testes. Os resultados mostram a importância da configuração e orientação das fibras em relação ao corte sobre os desempenhos mecânicos. Alguns parâmetros foram definidos para quantificar os danos na superfície de corte e relacioná-la com a diminuição da tensão de ruptura. Uma análise estatística rigorosa é importante para avaliação dos resultados nesta pesquisa (GHIDOSI et al. (2006).

A ocorrência de delaminação e saliências de fibras durante a usinagem de PRFC geralmente depende do desgaste da ferramenta e do ângulo entre a direção de corte e a direção das fibras. Estas afirmações foram apresentadas após as pesquisas de Hintze (2011). A usinagem de plásticos reforçados com fibra de carbono é muitas vezes acompanhada por delaminação das

camadas superiores após usinagem. Tais danos requerem demorados e dispendiosos trabalhos de reparos e, em alguns casos, conduz à rejeição do componente. O trabalho descrito nesta pesquisa sistematicamente investiga a ocorrência de delaminação das camadas superiores durante a usinagem de peças de PRFC, com foco sobre o processo de usinagem de contorno. A ocorrência e propagação da delaminação foram estudadas por faixas de usinagem em amostras de PRFC unidirecionais com diferentes orientações de fibra e, principalmente, analisando a final de saída. Isto permitiu que os principais mecanismos a serem esclarecidas mostrassem que a delaminação é altamente dependente da orientação das fibras e a qualidade de aresta da ferramenta. As experiências permitem derivação de um novo sistema para relatar a ocorrência e propagação de delaminação durante a usinagem. Além disso, os princípios se aplicam também para a furação. Os resultados permitem a personalização do processo de usinagem para reduzir, e em alguns casos totalmente evitar a delaminação, que conduz a um aumento significativo na qualidade de componentes finais.

Bhatnagar et al., (2006) realizaram uma pesquisa em usinagem ortogonal de polímero reforçado com fibra de carbono unidirecional e polímero reforçado com fibra de vidro, utilizando o método de elementos finitos. Um modelo proposto assume que o plano de deformação encontra-se em condição quasiestática. As forças de corte durante a usinagem ortogonal fizeram parte da pesquisa. O rompimento da fibra ocorreu devido à uma combinação de esmagamento e dobra das fibras.

Hartmann et al., (2013) estudaram a produção de peças em polímero reforçadas com fibra de carbono e verificaram a necessidade de usinagem de contorno em peças moldadas para remoção de excessos de moldagem. A qualidade das arestas de peças em compósitos deve ser usinada para eliminação de possíveis propagações de trincas e delaminações nas extremidades das peças. As delaminações podem ser iniciadas por tensões aplicadas durante o processo de fresamento. Forças e distribuições de tensões e falhas estruturais foram também verificadas. Neste estudo foi analisado o comportamento de delaminações em função da orientação das fibras, realizados por modelos de flexão elementares.

Durante as últimas décadas, tem havido um progresso significativo no desenvolvimento orientado e direcionado a indústria baseado em modelos para operações de usinagem. Este trabalho elaborado por Arrazola et al., (2013) apresenta o estado da arte no desempenho preditivo

de modelos para usinagem, e identifica os pontos fortes e fracos dos modelos atuais. Inclui uma avaliação crítica das técnicas relevantes de modelagem e sua aplicabilidade e/ou limitações para a previsão das usinagens complexas. O modelamento de processos muitas vezes é utilizado para prever tensões, temperaturas e esforços ocorridos durante a usinagem.

No entanto, para serem úteis à indústria, estas variáveis devem ser correlacionadas com medidas de desempenho, tais como; qualidade do produto (precisão dimensional, tolerâncias, acabamento, etc.), de superfície e de integridade da subsuperfície, desgaste de ferramenta, formação dos cavacos, formação de rebarba, estabilidade da máquina, etc. A adoção de modelos de usinagem pela indústria depende criticamente da capacidade de um modelo para fazer essa ligação e prever o desempenho de usinagem. Portanto, este trabalho tem o objetivo de identificar e discutir vários temas-chaves de pesquisa intimamente associados com o desenvolvimento de modelos de previsão para operações de usinagem, visando principalmente aplicações industriais.

A usinabilidade dos compósitos de fibra de carbono é fortemente dependente do ângulo de orientação das fibras. No torneamento, o ângulo de orientação das fibras medido no plano. Muitas vezes, em função da utilização de máquinas capazes de gerar velocidades de corte mais elevadas do que convencionalmente utilizado, a usinagem de alta velocidade é considerada apenas como uma forma de melhorar a produtividade. O aumento da velocidade de corte reduz o tempo de usinagem e conseqüentemente, melhora a produtividade. Liu et al., (1996) fizeram estas observações pesquisando usinagem de materiais compósitos por furação. Acrescentam que a furação é uma das principais operações de usinagem que são realizadas em materiais compósitos reforçados com fibras. Problemas típicos incluem a delaminação dos compósitos, o desgaste rápido da ferramenta, arrancamento de fibras, a formação de cavaco em pó são geralmente fonte de preocupação. A ocorrência da delaminação reduz a resistência à fadiga, resulta numa baixa precisão de montagem e afeta a integridade da estrutura do compósito.

Raramente enfatiza-se que a qualidade do produto pode ser melhorada, isto é, que uma maior precisão e melhor acabamento superficial podem ser obtidos. Entretanto, torna-se necessário a adoção plena da tecnologia de usinagem com altas velocidades para atingir lucros satisfatórios. Usinagem de alta velocidade é muito mais que simplesmente altas rotações do fuso principal. Vantagens competitivas podem ser alcançadas somente se as interações entre a peça e a ferramenta forem levadas em consideração, se a máquina-ferramenta for corretamente

selecionada, as estratégias de usinagem CNC forem compatibilizadas, a seleção dos parâmetros de corte for devidamente sintonizada com o conjunto e, por último, mas não menos importante, os aspectos de segurança forem respeitados (NIEMINEN et al., 2012.).

Compósito de alto desempenho de fibra de carbono vem obtendo um rápido desenvolvimento. Com o aumento da demanda de sua utilização associada ao controle preciso de forma e dimensões, a usinagem de compósitos surge como uma necessidade. Estudos sobre a usinagem de compósitos reforçados, em geral, são muito poucos em comparação com os de outros materiais e algumas literaturas sobre a usinagem de compósitos de PRFC estão disponíveis. Os compósitos são não homogêneos, o que torna difícil uma analogia com os mecanismos de formação do cavaco bem como com os mecanismos de geração de desgaste com outros materiais. O comportamento da usinagem depende da forma de fibra, da proporção das fibras e das orientações da fibra na matriz, segundo estudos de Santhanakrishnan et al., (2013). As ferramentas de corte classe ISO K20 geram uma superfície com acabamento superior, apresentam um desempenho melhor, gerando menor desgaste de flanco do que as ferramentas de classe ISO P30 nas usinagens de compósitos de fibras de carbono PRFC. A variação da pressão específica de corte com a velocidade de corte é marginal quando se utiliza ferramentas de classe ISO K20, ao contrário do que ocorre com as ferramentas de classe ISO P30.

Os mecanismos de formação de cavaco em compósitos, identificados por câmera de alta velocidade, são delaminação, flambagem da fibra e corte da fibra. Dois tipos de formas de cavacos também são observados: um cavaco fragmentado gerado pelo corte e flambagem da fibra, e um cavaco de lasca gerada pela fratura da matriz. Desgaste de cratera e lascamento da ferramenta não foram observados por causa do mecanismo de formação do cavaco que tende a forma de pó. Observam-se dois tipos diferentes de desgaste: arredondamento da aresta de corte e desgaste de flanco. O arredondamento da aresta da ferramenta de corte surge em função da ação abrasiva das fibras de carbono que são dobrados quando a aresta de corte da ferramenta afiada toca a superfície do compósito. O desgaste de flanco ocorre pela abrasão contínua da ferramenta pelas fibras de carbono. Pontos negros localizam-se na zona periférica do desgaste de flanco. A forma predominante de pó do cavaco impossibilita o desgaste de cratera que se forma na superfície de saída. O desgaste no acabamento do material compósito de fibra de carbono é

menos dependente da velocidade de corte quando comparado com a usinagem de aços segundo pesquisas de Kim et al. (2014).

Entre os possíveis mecanismos de desgaste, só abrasão, danos na superfície e, por vezes, a adesão são de importância para a usinagem de materiais compósitos. Os mecanismos de desgaste da ferramenta estão essencialmente relacionados às características físicas e mecânicas dos diferentes sistemas da matriz e da fibra. O tipo de fibra, a arquitetura do reforço e a composição da matriz são os fatores que regem a seleção de ferramentas de usinagem e ajuste de parâmetros. As fibras de carbono apresentam um comportamento fortemente abrasivo. A aresta de corte deve possuir um alto grau de resistência à abrasão e ao lascamento. Ferramentas de metal duro, ferramentas de metal duro revestido e ferramentas de PCD apresentam bons resultados em termos de desgaste e vida da ferramenta durante a usinagem de materiais compósitos. Os cerâmicos são inadequados porque sua baixa resistência e alta fragilidade fazem com que fiquem muito sensíveis à choques, além de sua baixa condutividade. Os mecanismos de desgaste da ferramenta estão essencialmente relacionados às características físicas e mecânicas dos diferentes sistemas da matriz e da fibra. O tipo de fibra, a arquitetura do reforço e a composição da matriz são os fatores que regem a seleção de ferramentas de usinagem e ajuste de parâmetros. As fibras de carbono apresentam um comportamento fortemente abrasivo. A aresta de corte deve possuir um alto grau de resistência à abrasão e ao lascamento. Devido à susceptibilidade acentuada das fibras de carbono a fratura frágil, geometrias de ferramentas de usinagem de compósitos correspondem aproximadamente às geometrias utilizadas nas usinagens dos metais. Também o tipo de matriz polimérica exerce uma influência significativa sobre o processo, a maior diferença sendo entre termofixos e os materiais de matriz termoplástica. Para a mesma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta é mais alto para a matriz termoplástica, em vez de matriz termofixos. Na usinagem de compósitos termoplásticos, os resultados satisfatórios são obtidos apenas quando PCD é usado como material de ferramenta TETI, (2013).

Várias abordagens para melhorar a usinabilidade de compósitos foram encontradas. Diversos tipos de ferramentas de corte, variação da orientação das fibras de carbono, utilização de diferentes configurações de usinagem, técnicas de refrigeração diferenciadas, tais como refrigeração criogênica, quantidade mínima de lubrificação, refrigeração por inundação, etc foram aplicadas durante a usinagem para tentar reduzir o calor gerado. Sabe-se que o calor

gerado durante a usinagem de compósitos é um dos fatores que influenciam a qualidade do produto final e reduz a vida da ferramenta de corte conforme KHAIRUSSHIMA, et al., (2012).

Há pouca literatura ressaltando a influência da temperatura durante o corte de materiais compósitos, porém, ela influencia na qualidade da superfície de materiais fresados e na vida da ferramenta. Se a temperatura exceder a temperatura de transição vítrea da matriz de resina termofixa, uma degradação da resina ocorrerá na superfície usinada. A degradação da resina facilita a delaminação e reduz a resistência, produzindo defeitos sérios na superfície. Esta temperatura crítica é de cerca de 180°C para a maioria de compósitos à base de epóxi, (Yashiro et al., 2013).

A aplicação de ar resfriado a 8°C e a pressão de 0.4 bar direcionado a superfície usinada durante o fresamento de compósito geralmente impede a queima da superfície devido a uma melhor evacuação de fragmentos do cavaco além de propiciar o resfriamento da peça e da ferramenta segundo El-Hofy et al. (2011).

A baixa temperatura de usinagem elimina completamente a possibilidade de ocorrência de mecanismos de difusão e ou de mecanismos de desgaste por dissolução na ferramenta. A hipótese desenvolvida para explicar o arredondamento da aresta se baseia na inexistência de uma zona de estagnação durante a usinagem de compósitos. Fibras e matriz estão continuamente em ação na aresta de corte promovendo arredondamento e o desgaste de flanco. Para os mesmos comprimentos de usinagem realizados nas mesmas condições, o metal duro revestido com diamante apresenta pequeno arredondamento de aresta enquanto que AlTiN revestindo o metal duro não protege a aresta em função de sua oxidação (WANG et al., 2013).

A análise das forças de corte durante o fresamento de contorno de laminados de compósitos de carbono nas altas velocidades de corte é problemático uma vez que sinal registrado pode ser distorcido devido à ressonância do sistema de medição. Além disso, o rápido desgaste da ferramenta pode tornar a interpretação do sinal difícil. A particularidade de materiais compósitos reside na variação não linear das medias das forças de corte com a variação do avanço. A força de corte média é um resultado de muitos efeitos durante o processo de usinagem. Estes efeitos são os seguintes: a resistência à abrasão, a qual é proporcional à quantidade de material removido por dente; a resistência ao cisalhamento que é proporcional à superfície do material removido, ou seja, é proporcional ao quadrado do avanço por dente; a resistência à penetração, que é dividida

em dois componentes, um estático e o outro dinâmico. A resistência dinâmica à penetração é diretamente proporcional ao avanço, enquanto que a resistência estática de penetração deve ser uma constante que depende do material e da geometria de corte (ZAGHBANI et al., 2013).

#### **4 – Retifica**

Apesar do processo de retificação ser uma das operações de usinagem mais versáteis que podem ser utilizadas para produzir uma superfície com o nível de acabamento da ordem de milésimos, este processo induz danos térmicos à superfície usinada se a seleção cuidadosa dos parâmetros de usinagem não ocorrer. O objetivo da pesquisa realizada por Lopez-Arraiza et al, (2013) buscou investigar a aplicação do processo de retificação em uma estrutura de materiais compósitos reforçada com o auxílio de um sistema de refrigeração para otimizar o processo de retificação.

A retificação na produção de componentes de materiais compósitos é muito restrita. O foco da indústria é em fresamento de contornos, furação, escareamento e torneamento, em conjunto com os processos não tradicionais, tais como o corte a jato d'água e usinagem por feixe de laser para a geração de forma, precisão e como um meio para facilitar a montagem (SOO et al., 2012).

As forças de retificação para os compósitos de CFRP multidirecionais aumentam quase linearmente com o aumento da profundidade de retificação e são geralmente maiores do que aquelas para compósitos unidirecionais retificados sob as mesmas condições de usinagem. A forma típica do cavaco de retificação de compósitos com fibras multidirecionais é uma mistura de pó fino, fibras quebradas e fragmentos da resina da matriz (HU, 2003). A formação do cavaco, as forças atuantes na retificação e integridade da superfície retificada de um compósito com fibras unidirecionais são altamente dependentes da orientação da fibra. A orientação das fibras de 90° origina uma menor rugosidade da superfície e a profundidade de retificação tem um efeito menor sobre a rugosidade da superfície. Fibras orientadas entre 120° e 180° não são favoráveis a retificação, podendo levar a uma morfologia da superfície similar a dentes de serra e a um profundo dano subsuperficial (HU, 2004).

## **5 - Usinagem à laser**

No trabalho desenvolvido por Quintero et al., (2014) o processo de corte a laser (CO<sub>2</sub>) foi pesquisado e aplicado em placas de resina fenólica como um processo experimental. Foram analisadas a viabilidade e qualidade deste processo e comparadas com outros processos de corte. O presente trabalho demonstrou que as referidas placas podem ser cortadas com sucesso utilizando raios laser de CO<sub>2</sub> com 3kW de potência a uma velocidade de corte de 3,5 m/min. O potencial tóxico de resíduos condensados exalados e a fumaça gerada durante o corte também foram analisados revelando serem potencialmente nocivos à saúde.

Plástico reforçado com fibra é um material de alta resistência e baixo peso e frequentemente utilizado na indústria aeroespacial. Sua usinagem é difícil devido à exposição da ferramenta de corte à abrasividade, encontrando alternadamente ora a resina, ora a fibra cujas respostas para a usinabilidade pode variar sempre. O objetivo da pesquisa realizada por Choudhury (2012) foi avaliar e caracterizar a qualidade de compósitos reforçados por fibra de vidro e sua usinagem por feixes de laser. Os resultados mostram que a qualidade da superfície usinada produzida por dois passes do feixe de LASER foi melhor do que a produzida por um único passe. O acabamento superficial foi melhor quando o diâmetro do orifício de saída do feixe foi menor.

## **6 – Modelamento Computacional**

Vários estudos sobre a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) permitiram que esta metodologia fosse reconhecida na última década como ferramenta adequada para medidas experimentais em aplicações avançadas, tais como estudos de dano à fadiga e investigações de falhas em materiais compósitos. Esta metodologia dá a medida direta do deslocamento formulando uma combinação de imagens do componente, de modo que os vetores de deslocamento podem ser avaliados por um número de pontos de referência na superfície analisada. Neste trabalho, os autores Aspinwall et al., (2014) apresentam as últimas pesquisas com esta metodologia e analisam o fenômeno de falhas por fadiga em compósitos de fibra de

vidro e fibras de carbono (CVFC) sob efeito de tensão dinâmica. Esta metodologia monitora o compósito em duas áreas: de histerese local e o local de variação dos esforços. Baseada em análise de imagens, esta metodologia fornece a medida direta do campo de deslocamento devido aos esforços. Utilizando uma formulação bem definida de combinar as imagens do componente carregado e livre de carga, os vetores de deslocamento podem ser avaliados a partir de um determinado número de pontos de referência na superfície analisada.

Klinkova et al. (2011), após ressaltar a importância e as inúmeras aplicações do material PRFC, realizaram um estudo utilizando modelos de elementos finitos para melhor entender o mecanismo de atrito entre este material e pinos de metal duro com e sem recobrimento. A simulação realizada pode estar distante daquela que ocorre entre uma ferramenta e um caso real de usinagem. Os autores concluíram que o atrito foi menor do que aquele com aços e que o coeficiente de calor medido na interface também diminuiu com o aumento da velocidade de deslizamento relativa entre os pinos e o corpo de prova.

Felicelli et al., (2013) construíram um modelo em múltipla escala visando analisar deformações piezelétricas de compósitos multifuncionais com matrizes metálicas. Tirando vantagem do tamanho das partículas da microestrutura, este autor formulou uma situação variacional de troca de energia da célula unitária através de análise assintótica, para prever o efeito eletromecânico da matriz nos compósitos. Exemplos numéricos são usados para demonstrar a aplicação desta técnica atualmente, mostrando que o modelo em múltipla escala é útil no estudo do comportamento de compósitos de matriz metálica.

Os estudos de Torres-Treviño et al., (2013) propõem um sistema híbrido para estabelecer parâmetros de dados experimentais de usinagem. Uma regressão simbólica  $\alpha$ - $\beta$  foi usada para estabelecer um modelo matemático. Todo modelo é validado usando análise estatística e, evolução computacional é usada para minimizar ou maximizar o modelo gerado. A regressão simbólica  $\alpha$ - $\beta$  é usada para elaborar o modelo matemático para estabelecer a distribuição de algoritmos. Estes autores consideraram um caso prático obtendo dados de dois processos de usinagem usados em três materiais distintos para ilustrar o desempenho do sistema, gerando uma gama de parâmetros que qualificava o processo de usinagem aplicado.

A pesquisa desenvolvida por Palanikumar (2012) apresenta um estudo através da metodologia de superfície de resposta e modelagem computacional de compósitos buscando

otimizar e analisar a influência dos parâmetros de usinagem, tais como; torque, rugosidade superficial e delaminações durante furação de compósitos de matriz metálica, produzidos através de fundição de Liga de Al356 reforçada com carboneto de silício com tamanhos de grão 25µm e Mica de grão tamanho 45µm. A Análise de Regressão Múltipla (RSM) foi usada para controlar os dados de entrada e saída do processo. O modelo matemático foi desenvolvido e testado usando análise de variância para adequar medidas.

A complexidade do processo de usinagem, o relacionamento não linear entre os parâmetros, e a variação aleatória das propriedades dos materiais, torna a previsão de vida da ferramenta durante a usinagem de compósitos, um desafio. Entretanto, a pesquisa realizada por Azmi et al., (2012) apresenta a aplicação de técnicas de modelamento para análise de vida da ferramenta durante o processo de fresamento. Os experimentos de fresamento a seco foram realizados com o objetivo de obter dados e comparar a parâmetros já conhecidos baseados na lógica aleatória de Mamdani. Os resultados experimentais mostraram que os valores obtidos visando prever a vida da ferramenta ficaram próximos daqueles obtidos pelo modelo proposto.

## **7 – Análises de Materiais e Caracterização**

Os Compósitos de Matriz Metálica (MMCs) podem sofrer deformações plásticas quando em aplicações estruturais. Micro trincas iniciam propagação de trincas macro durante baixos ciclos de fadiga. Para estudar este comportamento, Iqbal et al., (2013) selecionaram três tipos de materiais: compósito de matriz metálica (MMC) com partículas de carboneto de silício e óxido de alumínio, compósito de matriz metálica com partículas de óxido de alumínio (MMC) e alumínio com ligas. Além disso, o comportamento do reforço híbrido no mecanismo de iniciação de microtrincas e propagação foram pesquisados. Nas ligas de alumínio, as microtrincas foram observadas no início do contorno do grão, mas quando a matriz foi reforçada, a localização de início mudou-se para a interface reforço/matriz e partícula/matriz e a hibridização reduziu o efeito à resistência de iniciação de trinca. Entretanto, os dois materiais compósitos metálicos (MMC) exibiam interface de descolagem na fratura. Numerosos poros foram formados a frente

das trincas. No entanto, nas ligas de alumínio, as micro trincas ocorreram entre o contorno de grão entre partículas de Si.

Neubauer et al. (2010) procuraram introduzir procedimentos de melhoria contínua das técnicas de produção de nano fibras de carbono e nano tubos de carbono juntamente com uma melhoria das qualidades dos materiais disponíveis. Estes reforços têm sido introduzidos em polímeros, cerâmica e metais. Na área de polímeros os primeiros sucessos publicados em reforços são bastante recentes. Nano partículas de carbono, inclusive metais contendo agora estes tipos de reforços em nano partículas ainda são temas de intensa investigação. Basicamente, uma situação semelhante foi encontrada quando micro fibras de carbono chegou ao mercado. Hoje muitas aplicações de compósitos reforçados com fibra de carbono são existentes, enquanto os metais reforçados com fibras de carbono convencionais ainda são encontrados apenas em aplicações específicas. Várias razões podem ser identificadas porque, a introdução de nano partículas à base de carbono (nano fibras / nano tubos) em matrizes é uma tarefa complexa. No entanto, vale à pena realizar estudos sistemáticos neste campo, devido à resultados promissores na área térmica, elétrica, mecânica e propriedades tribológicas das nano partículas. Os autores apresentam uma visão geral e resumem as atividades relacionadas com nano tubos e nano fibras de carbono utilizadas como reforço de materiais de matriz metálica.

Pesquisa realizada por Rajan et al. (2013) analisa os compósitos formados por ligas de alumínio AA7075 reforçadas por  $TiB_2$  que foram preparados pela reação de  $K_2TiF_6$  e  $KBF_4$  e alumínio fundido. Os Compósitos de Matriz Alumínio (AMCs) foram caracterizados usando difração de raios-X e microscópio eletrônico de varredura. O comportamento dos ensaios de desgaste do compósito AMCs foi avaliado usando um dispositivo de atrito pino e disco. O efeito das partículas de  $TiB_2$  contendo (0,3,6 e 9 %) e temperatura (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 °C) e a taxa de desgaste e a superfície desgastada do compósito foram analisadas. Os resultados indicam que as partículas de  $TiB_2$  foram eficazes para aumentar a resistência ao desgaste do compósito AMCs em todas as temperaturas testadas. A taxa de desgaste do compósito AMCs aumentou quando a temperatura aplicada foi aumentada. Os pontos formados de partículas de  $TiB_2$  influenciam a temperatura de transição de desgaste em torno de 30 °C. O tipo de desgaste observado foi caracterizado como abrasivo a temperatura ambiente.

Azees et al., (2013) realizaram um trabalho em epóxi nano compósitos de argila. As argilas são um dos reforços nano ideais para polímeros devido à sua alta aceitação. Epóxi argila nano compósitos estão encontrando grandes aplicações em diversos setores como aeroespacial, defesa, automobilístico, etc. As propriedades físicas e químicas dos sistemas de epóxi são influenciadas por meio das técnicas de transformação, modificadoras de argila e agentes de cura usados para a preparação de nano compósitos. A morfologia de argila (intercalação/esfoliação) dos nano compósitos é também dependente da definição de parâmetros. Assim, a ênfase do presente trabalho é destacar estes parâmetros na morfologia e as propriedades mecânicas, térmicas e finais dos nano compósitos.

Hongshuai et al., (2013) apresentaram uma pesquisa experimental e numérica para ligas de compósitos híbridos (SMAHCs) submetido a carga quase estática para verificação da interface fraca e evolução de danos. Compósitos de fibra reforçada híbridos SMA foram fabricados por vácuo com injeção de resina (VARI). Microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliar a qualidade da interface de SMA com a matriz. Ensaio de tração uniaxial foram realizados para estudar o efeito da interface no módulo do composto híbrido. As falhas foram analisadas usando microscópio digital de HF. Devido à incorporação de fibra de SMA o material exibiu um comportamento mecânico bilinear. Um roteiro foi desenvolvido para gerar o modelo composto híbrido usando ANSYS e parâmetro de projeto Language (APDL). Ensaio uniaxiais de tração foram simulados utilizando o método de elementos finitos para estudar o comportamento macroscópico de composto híbrido.

Haider et al., (2010) apresentou uma investigação experimental da avaliação da força adesiva entre a interface de aço e compósitos PRFC sob várias taxas dinâmicas. O sucesso da união destas partes depende da seleção de um adesivo adequado. Apesar de terem obtido resultados que revelam o efeito de diferentes níveis de esforços dinâmicos e de taxas de carregamento sobre o vínculo na aderência entre aço e PRFC, os autores sugerem que um maior número de experiências seja realizado sobre este tema.

Bansal et al., (2012) observaram que os Compósitos de Matriz Metálica (MMC) reforçado por partículas de alumínio MMCs têm recebido considerável atenção devido as suas excelentes propriedades mecânicas, tais como; alta dureza, alta resistência a tensão, etc. Estes materiais apresentam dificuldades durante a usinagem devido à alta dureza e abrasividade relativas às

partícula de alumina. Na pesquisa, 2%, 4% e 6% de alumina foram utilizados para produzir compósitos de matrizes metálicas. Verificou-se que aumentando o teor da alumina, ocorreu melhores propriedades mecânicas como, dureza e resistência à tensão. Os testes de torneamento foram planejados pelo método Taguchi e os dados experimentais foram analisados usando sinais de ruído com ANOVA. A influência das condições operacionais utilizadas seguiu um padrão relativamente compatível com a usinagem de materiais compósitos, sendo que os desgastes foram cada vez maiores com o crescimento da velocidade de corte e do avanço, sendo o mecanismo de desgaste preponderante a abrasão.

Witulski et al., (2011) usaram uma metodologia para a fabricação de moldes em materiais compósitos poliméricos visando a produção de ferramentas com alta resistência ao desgaste para obtenção de peças em forma de chapa. Ferramentas de estampagem profunda feitas de materiais poliméricos são utilizadas basicamente para a criação de protótipos, testes e produção de tamanho reduzido. Investigações demonstram a possibilidade de trabalhar materiais leves em aços com tais ferramentas para pequenas e médias produções. Ferramentas feitas de material polimérico tem a vantagem de ser rentável, devido ao custo do material e de sua boa usinabilidade. Partículas de materiais duros são pulverizadas termicamente em um molde estruturado por um polímero. A peça gerada é removida a partir do molde original e funciona como uma ferramenta de conformação. Experimentos de repuxamento profundo mostram que a resistência ao desgaste dessas ferramentas é adequada para conformar peças em aços.

Nas últimas décadas, a aplicação de Polímeros Reforçados por Fibra de Carbono (PRFC) no setor aeroespacial tem aumentado drasticamente. Aspinwall et al., (2014) apresentam detalhes e efeitos de parâmetros relacionados com materiais de ferramentas (WC & PCD), e comportamento de ferramentas na usinagem a seco com refrigeração e sua relação com a rugosidade e integridade do material testado, quando comparou controle destes parâmetros com o método de Taguchi. O Microscópio Eletrônico de Varredura foi utilizado para mostrar a influência da orientação das fibras e sua relação com a direção de corte. Danos térmicos ocorridos durante a usinagem foram minimizados com refrigeração a ar. Ferramentas de diamantes (PCD) forneceram grandes vantagens no aumento de produtividade quando comparadas com metal duro (WC), com rugosidades média na faixa de 3.6  $\mu\text{m}$ , velocidade de corte de 200 m/min. e avanço por aresta de 0.03 mm.

Uma combinação polimérica de fibra de vidro e resina epóxi foi investigada por Belingardi et al. (2011) analisando carregamento elástico de esforços, para avaliar os efeitos na resistência à tração deste material. Especificamente, dois tipos de abas moldadas e cinco tipos de abas coladas foram considerada dentro deste estudo. Os resultados experimentais mostraram que a configuração de abas afetou a resistência à tração dos corpos de prova. A partir dos resultados experimentais, uma metodologia de teste apropriado foi proposta para fibra de vidro e epóxi.

Witulski et al., (2011) usaram uma metodologia para a fabricação de moldes em materiais compósitos poliméricos visando a produção de ferramentas com alta resistência ao desgaste para obtenção de peças em forma de chapa. Ferramentas de estampagem profunda feitas de materiais poliméricos são utilizadas basicamente para a criação de protótipos, testes e produção de tamanho reduzido. Investigações demonstram a possibilidade de trabalhar materiais leves em aços com tais ferramentas para pequenas e médias produções. Ferramentas feitas de material polimérico tem a vantagem de ser rentável, devido ao custo do material e de sua boa usinabilidade. Partículas de materiais duros são pulverizadas termicamente em um molde estruturado por um polímero. A peça gerada é removida a partir do molde original e funciona como uma ferramenta de conformação. Experimentos de repuxamento profundo mostram que a resistência ao desgaste dessas ferramentas é adequada para conformar peças em aços.

Gang, et al., (2013) pesquisaram o desenvolvimento de materiais compósitos baseadas em poliacrilonitrila produzidos e depois convertidos em nano escala de fibras de carbono n- FC. A estrutura resultou homogênea através da introdução de múltiplas etapas a quente. Os nano tubos são altamente alinhados e obtidos numa gama de temperaturas normalmente associada com carbonização. Mostram estruturas notavelmente uniformes e uma superfície muito lisa, com uma rugosidade média de 0,249 nm. A condutividade elétrica dos nano tubos FCs atinge 15,5 S/cm ao longo da direção das fibras. Testes de tração demonstraram um aumento de 21% e 60% na resistência à tração e módulo de Young, respectivamente.

Lasri et al., (2011) observaram danos geradores de trincas na matriz, fraturas de fibras e delaminações que ocorrem na usinagem de materiais compósitos. Geralmente, mecanismos de danos em usinagem de compósitos incluem quatro tipos de avarias: trincas transversais na matriz, descolamento na interface fibra/matriz, ruptura da fibra e início de delaminação. A qualidade superficial mostra uma importante regra na melhoria de vida da ferramenta de corte,

considerando a resistência ao desgaste durante a usinagem de peças em compósitos. No caso de usinagem de materiais compósitos com alta velocidade, a qualidade superficial do produto pode ser melhorada devido à possibilidade de modificar os parâmetros de usinagem. Estes pesquisadores em suas análises procuraram mostrar os efeitos dos parâmetros de corte e os efeitos causados por danos superficiais nos componentes usinados, e sua resistência ao desgaste. Foi observado também neste estudo que as trincas entre matriz e a interface com as fibras ocorrem primeiro, seguido pelo desgaste das fibras. As progressões das delaminações entre a matriz e a interface das fibras ocorrem paralelas à direção das fibras. A disposição e orientação das fibras na estrutura do compósito induzem resistência ao corte e provocam o desgaste da ferramenta com presença de danos de delaminação devido aos esforços de corte.

Neubauer et al. (2010) procuraram introduzir procedimentos de melhoria contínua das técnicas de produção de nano fibras de carbono e nano tubos de carbono juntamente com uma melhoria das qualidades dos materiais disponíveis. Estes reforços têm sido introduzidos em polímeros, cerâmica e metais. Na área de polímeros os primeiros sucessos publicados em reforços são bastante recentes. Nano partículas de carbono, inclusive metais contendo agora estes tipos de reforços em nano partículas ainda são temas de intensa investigação. Basicamente, uma situação semelhante foi encontrada quando micro fibras de carbono chegaram ao mercado. Hoje muitas aplicações de compósitos reforçados com fibra de carbono são existentes, enquanto os metais reforçados com fibras de carbono convencionais ainda são encontrados apenas em aplicações específicas. Várias razões podem ser identificadas porque, a introdução de nano partículas à base de carbono (nano fibras / nano tubos) em matrizes é uma tarefa complexa. No entanto, vale à pena realizar estudos sistemáticos neste campo, devido à resultados promissores na área térmica, elétrica, mecânica e propriedades tribológicas das nano partículas. Os autores apresentam uma visão geral e resumem as atividades relacionadas com nano tubos e nano fibras de carbono utilizadas como reforço de materiais de matriz metálica.

Alguns desenvolvimentos recentes de polímero reforçado com fibra são analisados com ênfase para melhorar tenacidade interlaminar à fratura e compressão após a força de impacto. Tem sido observado considerável interesse nas últimas décadas em nano partículas utilizado como reforço secundário. Isto se baseia na melhoria de matrizes de resina de nano partículas

modificadas com o objetivo de aumentar tenacidade interlaminar à fratura e aumentar ainda mais a resistência de laminados.

Para avançar nesta investigação, uma série de questões fundamentais e técnicas deve ser resolvidas: para fabricar compósitos de alto desempenho com reforços híbridos, incluindo a dispersão uniforme e alinhamento de nano partículas, da interface entre a matriz e as nano partículas otimizadas, e resinas de baixa viscosidade de nano partículas modificadas para facilitar impregnação de fibras de reforço com mais resina (> 60 % em volume) (FRIEDRICH et al. (2013).

Ayrilmis (2013) pesquisou a viabilidade de utilização da celulose como matriz para união de compósito de alumínio obtida de materiais reciclados. Para tanto foram avaliadas as propriedades mecânicas deste compósito. Os compósitos foram preparados por injeção em moldes de proporções 3% em peso de celulose, e 40,50 e 60% de reforço picado, tipo serragem e casca. Esta última estrutura apresentou melhor resultado á flexão. A cuja resistência aumentou significativamente. Resultados semelhantes foram também observados para a resistência à tração.

Okayasu et al., (2013) pesquisaram as propriedades mecânicas e falhas de um plástico reforçado com fibra de carbono reciclado. As amostras foram produzidas utilizando resina de epóxi com fibra de carbono moído antes da mistura, tendo sido introduzida a resina de estireno butadieno acrilonitrila com diferentes teores em peso. A resistência à tração aumentou com o aumento do teor de fibras. A resistência à fadiga também aumentou com o aumento do teor de fibra. Detalhes do comportamento de crescimento de trincas foram discutidos usando vários modelos de crescimento de trincas propostas em estudos prévios.

Karpat et al., (2012) estudaram os polímeros reforçados por fibra de carbono que estão sendo usados com grande intensidade na indústria aeroespacial, devido às suas propriedades superiores, tais como, alta resistência, baixo peso, alta resistência a corrosão e baixo coeficiente de expansão térmica. Os componentes em PRFC são produzidos usualmente por moldagem, um processo que não se aplica usinagem. Por outro lado, as peças em seu acabamento final necessitam usinagem de contorno, tais como; usinagem de cavidades, furações e fresamentos. Nesta pesquisa os autores analisaram a usinabilidade de compósitos unidirecionais direcionado ao seu fresamento. Por se tratar de um material compósito anisotrópico e não homogêneo este material gera problemas durante sua usinagem. Dependendo das direções das fibras, os esforços

de usinagem, qualidade superficial podem mudar em função da direção de usinagem adotada. Técnicas experimentais de modelagem analíticas e elementos finitos foram empregadas para análise do mecanismo de formação de cavacos no fresamento de PRFC.

Delaminação é um dos efeitos indesejáveis de usinagem quando usando parâmetros de corte não apropriados na usinagem de materiais compósitos. A modelagem por elementos finitos de usinagem no processo de furação foi uma ferramenta adequada para previsão de surgimento de danos. O custo computacional desta modelagem complexa tem sido a grande desvantagem quando comparando com modelos simplificados que considera a ferramenta broca como um perfurador que atravessa o compósito. Nesta pesquisa realizada por Feito et al., (2013), ambos os modelos completos e simplificados foram utilizados e comparados em termos de prever o surgimento de delaminações. O modelo simplificado apresentou resultados adequados e menor custo computacional que o mais complexo.

Laurenzi et al., (2013) utilizaram um processo de análise numérica e experimental para investigar a fabricação de peças em compósitos reforçados em fibra de carbono que têm grande aplicação na indústria aeronáutica para o caso do processo de moldagem por transferência de resina. Estes componentes são peças primárias estruturais caracterizadas por paredes de vários tipos de espessuras, que dificultam a impregnação da resina durante a montagem de sua forma final. Esta simulação baseia-se em método modificado de elementos finitos e foi conduzido para investigar o fluxo de resina para encontrar uma estratégia de injeção que garanta a boa impregnação da forma inicial e mantenha um tempo compatível de cura com a resina. Os componentes foram satisfatoriamente obtidos com bom desempenho entre a análise numérica e o processo de fabricação.

No entanto, para serem úteis à indústria, estas variáveis devem ser correlacionadas com medidas de desempenho, tais como; qualidade do produto (precisão dimensional, tolerâncias, acabamento, etc.), de superfície e de integridade da subsuperfície, desgaste de ferramenta, formação dos cavacos, formação de rebarba, estabilidade da máquina, etc. A adoção de modelos de usinagem pela indústria depende criticamente da capacidade de um modelo para fazer essa ligação e prever o desempenho de usinagem. Portanto, este trabalho tem o objetivo de identificar e discutir vários temas-chaves de pesquisa intimamente associados com o desenvolvimento de modelos de previsão para operações de usinagem, visando principalmente aplicações industriais.

O trabalho desenvolvido por Asprone et al., (2013) relata um estudo abrangente da resposta à compressão de estruturas alveolares hexagonais feito de papel impregnado por resina fenólica denominada Nomex. Busca também uma resposta adequada entre os resultados da tensão de compressão determinada numericamente e os resultados de medidas experimentais. Um modelo tipo célula única de Nomex foi criado usando o software ABAQUS de elementos finitos para avaliar imperfeições devido o processo de fabricação. São considerados, incluindo imperfeições materiais como variações do módulo de elasticidade e defeitos geométricos.

O trabalho desenvolvido por Anyndia et al. (2011) estabelece um conjunto de critérios para verificar duas microestruturas em compósitos reforçados com fibras de equivalência geométrica. Os critérios estão baseados numa combinação de um processo de ponto a ponto e funções de probabilidade de dois pontos; convergência de tamanho micro e igualdade na distribuição de raios da fibra. Os critérios foram mostrados para distinguir diferentes microestruturas e identificar outras semelhantes. Além disso, uma técnica foi proposta que pode auxiliar eficientemente a reconstrução de uma microestrutura. Os resultados mostram a técnica de reconstrução com tolerâncias estabelecidas de 5% em várias amostras de observações experimentais.

Bortz et al., (2012) apresentaram estudos experimentais sobre o comportamento das tensões por fadiga axial de uma estrutura de compósitos laminados, na qual minúsculas Nanofibras de Carbono/(CNFs) foram utilizadas. Inicialmente fibras de carbono foram distribuídas biaxialmente  $\pm 45^\circ$  em camadas para estabelecer uma interação de fibra e matriz de bom desempenho. Os resultados indicam que compósitos reforçados por nanofibras alinhados possuem melhores propriedades estáticas do que seus homólogos não modificados.

As pesquisas de Hapke et al., (2011) constam de microscopia eletrônica (MEV) para investigar falhas em materiais compósitos unidirecionais (UD) de polímeros reforçados por fibra de carbono (PRFC) com foco na presença de poros. Os experimentos foram conduzidos com auxílio de um microscópio MEV para detecção de defeitos e delaminações. As mudanças da microestrutura são monitoradas durante os ensaios. Entretanto, as mudanças de características observadas têm correlação direta com as mudanças das mesmas. Foi pesquisada também a influência dos poros na estrutura dos compósitos.

Este trabalho desenvolvido por Sahoo et al. apresenta o desenvolvimento de compósitos Al/SiCp (10%) de matriz metálica por um processo de fundição convencional e suas características de usinagem em torneamento usando ferramentas de corte de metal duro revestidas de TiN em processo de usinagem com e sem fluido de corte. Abrasão foi o desgaste predominante neste estudo experimental realizado por Sahoo et al., (2012). A velocidade de corte mostrou ser a variável mais significativa afetando o desgaste de flanco e, por outro lado, o avanço mostrou-se o parâmetro que mais influenciou na rugosidade superficial. Os valores experimentais obtidos foram muito dispersos, não sendo adequados para sugerir aplicações na prática.

Os Compósitos de Matriz Metálica (MMCs) podem sofrer deformações plásticas quando em aplicações estruturais. Micro trincas iniciam propagação de trincas macro durante baixos ciclos de fadiga. Para estudar este comportamento, Iqbal et al., (2013) selecionaram três tipos de materiais: compósito de matriz metálica (MMC) com partículas de carboneto de silício e óxido de alumínio, compósito de matriz metálica com partículas de óxido de alumínio (MMC) e alumínio com ligas. Além disso, o comportamento do reforço híbrido no mecanismo de iniciação de microtrincas e propagação foram pesquisados. Nas ligas de alumínio, as microtrincas foram observadas no início do contorno do grão, mas quando a matriz foi reforçada, a localização de início mudou-se para a interface reforço/matriz e partícula/matriz e a hibridização reduziu o efeito à resistência de iniciação de trinca. Entretanto, os dois materiais compósitos metálicos (MMC) exibiam interface de descolagem na fratura. Numerosos poros foram formados a frente das trincas. No entanto, nas ligas de alumínio, as micro trincas ocorreram entre o contorno de grão entre partículas de Si.

Pesquisa realizada por Rajan et al. (2013) analisa os compósitos formados por ligas de alumínio AA7075 reforçadas por  $TiB_2$  que foram preparados pela reação de  $K_2TiF_6$  e  $KBF_4$  e alumínio fundido. Os Compósitos de Matriz Alumínio (AMCs) foram caracterizados usando difração de raios-X e microscópio eletrônico de varredura. O comportamento dos ensaios de desgaste do compósito AMCs foi avaliado usando um dispositivo de atrito pino e disco. O efeito das partículas de  $TiB_2$  contendo (0,3,6 e 9 %) e temperatura (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 °C) e a taxa de desgaste e a superfície desgastada do compósito foram analisadas. Os resultados indicam que as partículas de  $TiB_2$  foram eficazes para aumentar a resistência ao desgaste do compósito AMCs em todas as temperaturas testadas. A taxa de desgaste do compósito AMCs

aumentou quando a temperatura aplicada foi aumentada. Os pontos formados de partículas de  $TiB_2$  influenciam a temperatura de transição de desgaste em torno de 30 °C. O tipo de desgaste observado foi caracterizado como abrasivo a temperatura ambiente.

Azeez et al., (2013) realizaram um trabalho em epóxi nano compósitos de argila. As argilas são um dos reforços nano ideais para polímeros devido à sua alta aceitação. Epóxi argila nano compósitos estão encontrando grandes aplicações em diversos setores como aeroespacial, defesa, automobilístico, etc. As propriedades físicas e químicas dos sistemas de epóxi são influenciadas por meio das técnicas de transformação, modificadoras de argila e agentes de cura usados para a preparação de nano compósitos. A morfologia de argila (intercalação/esfoliação) dos nano compósitos é também dependente da definição de parâmetros. Assim, a ênfase do presente trabalho é destacar estes parâmetros na morfologia e as propriedades mecânicas, térmicas e finais dos nano compósitos.

Hongshuai et al., (2013) apresentaram uma pesquisa experimental e numérica para ligas de compósitos híbridos (SMAHCs) submetido a carga quase estática para verificação da interface fraca e evolução de danos. Compósitos de fibra reforçada híbridos SMA foram fabricados por vácuo com injeção de resina (VARI). Microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliar a qualidade da interface de SMA com a matriz. Ensaio de tração uniaxial foram realizados para estudar o efeito da interface no módulo do composto híbrido. As falhas foram analisadas usando microscópio digital de HF. Devido à incorporação de fibra de SMA o material exibiu um comportamento mecânico bilinear. Um roteiro foi desenvolvido para gerar o modelo composto híbrido usando ANSYS e parâmetro de projeto Language (APDL). Ensaio uniaxiais de tração foram simulados utilizando o método de elementos finitos para estudar o comportamento macroscópico de composto híbrido.

Haider et al., (2010) apresentou uma investigação experimental da avaliação da força adesiva entre a interface de aço e compósitos PRFC sob várias taxas dinâmicas. O sucesso da união destas partes depende da seleção de um adesivo adequado. Apesar de terem obtido resultados que revelam o efeito de diferentes níveis de esforços dinâmicos e de taxas de carregamento sobre o vínculo na aderência entre aço e PRFC, os autores sugerem que um maior número de experiências seja realizado sobre este tema.

Bansal et al., (2012) observaram que os Compósitos de Matriz Metálica (MMC) reforçado por partículas de alumínio MMCs têm recebido considerável atenção devido as suas excelentes propriedades mecânicas, tais como; alta dureza, alta resistência a tensão, etc. Estes materiais apresentam dificuldades durante a usinagem devido à alta dureza e abrasividade relativas às partícula de alumina. Na pesquisa, 2%, 4% e 6% de alumina foram utilizados para produzir compósitos de matrizes metálicas. Verificou-se que aumentando o teor da alumina, ocorreu melhores propriedades mecânicas como, dureza e resistência à tensão. Os testes de torneamento foram planejados pelo método Taguchi e os dados experimentais foram analisados usando sinais de ruído com ANOVA. A influência das condições operacionais utilizadas seguiu um padrão relativamente compatível com a usinagem de materiais compósitos, sendo que os desgastes foram cada vez maiores com o crescimento da velocidade de corte e do avanço, sendo o mecanismo de desgaste preponderante a abrasão.

Klinkova et al. (2011), após ressaltar a importância e as inúmeras aplicações do material PRFC, realizaram um estudo utilizando modelos de elementos finitos para melhor entender o mecanismo de atrito entre este material e pinos de metal duro com e sem recobrimento. A simulação realizada pode estar distante daquela que ocorre entre uma ferramenta e um caso real de usinagem. Os autores concluíram que o atrito foi menor do que aquele com aços e que o coeficiente de calor medido na interface também diminuiu com o aumento da velocidade de deslizamento relativa entre os pinos e o corpo de prova.

Felicelli et al., (2013) construíram um modelo em múltipla escala visando analisar deformações piezelétricas de compósitos multifuncionais com matrizes metálicas. Tirando vantagem do tamanho das partículas da microestrutura, este autor formulou uma situação variacional de troca de energia da célula unitária através de análise assintótica, para prever o efeito eletromecânico da matriz nos compósitos. Exemplos numéricos são usados para demonstrar a aplicação desta técnica atualmente, mostrando que o modelo em múltipla escala é útil no estudo do comportamento de compósitos de matriz metálica.

Os estudos de Torres-Treviño et al., (2013) propõem um sistema híbrido para estabelecer parâmetros de dados experimentais de usinagem. Uma regressão simbólica  $\alpha$ - $\beta$  foi usada para estabelecer um modelo matemático. Todo modelo é validado usando análise estatística e, evolução computacional é usada para minimizar ou maximizar o modelo gerado. A regressão

simbólica  $\alpha$ - $\beta$  é usada para elaborar o modelo matemático para estabelecer a distribuição de algoritmos. Estes autores consideraram um caso prático obtendo dados de dois processos de usinagem usados em três materiais distintos para ilustrar o desempenho do sistema, gerando uma gama de parâmetros que qualificava o processo de usinagem aplicado.

A pesquisa desenvolvida por Palanikumar (2012) apresenta um estudo através da metodologia de superfície de resposta e modelagem computacional de compósitos buscando otimizar e analisar a influência dos parâmetros de usinagem, tais como; torque, rugosidade superficial e delaminações durante furação de compósitos de matriz metálica, produzidos através de fundição de Liga de Al356 reforçada com carboneto de silício com tamanhos de grão 25 $\mu$ m e Mica de grão tamanho 45 $\mu$ m. A Análise de Regressão Múltipla (RSM) foi usada para controlar os dados de entrada e saída do processo. O modelo matemático foi desenvolvido e testado usando análise de variância para adequar medidas.

Bortz et al., (2012) apresentaram estudos experimentais sobre o comportamento das tensões por fadiga axial de uma estrutura de compósitos laminados, na qual minúsculas Nanofibras de Carbono/(CNFs) foram utilizadas. Inicialmente fibras de carbono foram distribuídas biaxialmente  $\pm 45^\circ$  em camadas para estabelecer uma interação de fibra e matriz de bom desempenho. Os resultados indicam que compósitos reforçados por nanofibras alinhados possuem melhores propriedades estáticas do que seus homólogos não modificados.

As pesquisas de Hapke et al., (2011) constam de microscopia eletrônica (MEV) para investigar falhas em materiais compósitos unidirecionais (UD) de polímeros reforçados por fibra de carbono (PRFC) com foco na presença de poros. Os experimentos foram conduzidos com auxílio de um microscópio MEV para detecção de defeitos e delaminações. As mudanças da microestrutura são monitoradas durante os ensaios. Entretanto, as mudanças de características observadas têm correlação direta com as mudanças das mesmas. Foi pesquisada também a influência dos poros na estrutura dos compósitos.

Este trabalho desenvolvido por Sahoo et al. apresenta o desenvolvimento de compósitos Al/SiCp (10%) de matriz metálica por um processo de fundição convencional e suas características de usinagem em torneamento usando ferramentas de corte de metal duro revestidas de TiN em processo de usinagem com e sem fluido de corte. Abrasão foi o desgaste predominante neste estudo experimental realizado por Sahoo et al., (2012). A velocidade de corte

mostrou ser a variável mais significativa afetando o desgaste de flanco e, por outro lado, o avanço mostrou-se o parâmetro que mais influenciou na rugosidade superficial. Os valores experimentais obtidos foram muito dispersos, não sendo adequados para sugerir aplicações na prática.

Os Compósitos de Matriz Metálica (MMCs) podem sofrer deformações plásticas quando em aplicações estruturais. Micro trincas iniciam propagação de trincas macro durante baixos ciclos de fadiga. Para estudar este comportamento, Iqbal et al., (2013) selecionaram três tipos de materiais: compósito de matriz metálica (MMC) com partículas de carboneto de silício e óxido de alumínio, compósito de matriz metálica com partículas de óxido de alumínio (MMC) e alumínio com ligas. Além disso, o comportamento do reforço híbrido no mecanismo de iniciação de microtrincas e propagação foram pesquisados. Nas ligas de alumínio, as microtrincas foram observadas no início do contorno do grão, mas quando a matriz foi reforçada, a localização de início mudou-se para a interface reforço/matriz e partícula/matriz e a hibridização reduziu o efeito à resistência de iniciação de trinca. Entretanto, os dois materiais compósitos metálicos (MMC) exibiam interface de descolagem na fratura. Numerosos poros foram formados a frente das trincas. No entanto, nas ligas de alumínio, as micro trincas ocorreram entre o contorno de grão entre partículas de Si.

Pesquisa realizada por Rajan et al. (2013) analisa os compósitos formados por ligas de alumínio AA7075 reforçadas por  $TiB_2$  que foram preparados pela reação de  $K_2TiF_6$  e  $KBF_4$  e alumínio fundido. Os Compósitos de Matriz Alumínio (AMCs) foram caracterizados usando difração de raios-X e microscópio eletrônico de varredura. O comportamento dos ensaios de desgaste do compósito AMCs foi avaliado usando um dispositivo de atrito pino e disco. O efeito das partículas de  $TiB_2$  contendo (0,3,6 e 9 %) e temperatura (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 e 240 °C) e a taxa de desgaste e a superfície desgastada do compósito foram analisadas. Os resultados indicam que as partículas de  $TiB_2$  foram eficazes para aumentar a resistência ao desgaste do compósito AMCs em todas as temperaturas testadas. A taxa de desgaste do compósito AMCs aumentou quando a temperatura aplicada foi aumentada. Os pontos formados de partículas de  $TiB_2$  influenciam a temperatura de transição de desgaste em torno de 30 °C. O tipo de desgaste observado foi caracterizado como abrasivo a temperatura ambiente.

Hongshuai et al., (2013) apresentaram uma pesquisa experimental e numérica para ligas de compósitos híbridos (SMAHCs) submetido a carga quase estática para verificação da interface

fraca e evolução de danos. Compósitos de fibra reforçada híbridos SMA foram fabricados por vácuo com injeção de resina (VARI). Microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliar a qualidade da interface de SMA com a matriz. Ensaios de tração uniaxial foram realizados para estudar o efeito da interface no módulo do composto híbrido. As falhas foram analisadas usando microscópio digital de HF. Devido à incorporação de fibra de SMA o material exibiu um comportamento mecânico bilinear. Um roteiro foi desenvolvido para gerar o modelo composto híbrido usando ANSYS e parâmetro de projeto Language (APDL). Ensaios uniaxiais de tração foram simulados utilizando o método de elementos finitos para estudar o comportamento macroscópico de composto híbrido.

Haider et al., (2010) apresentou uma investigação experimental da avaliação da força adesiva entre a interface de aço e compósitos PRFC sob várias taxas dinâmicas. O sucesso da união destas partes depende da seleção de um adesivo adequado. Apesar de terem obtido resultados que revelam o efeito de diferentes níveis de esforços dinâmicos e de taxas de carregamento sobre o vínculo na aderência entre aço e PRFC, os autores sugerem que um maior número de experiências seja realizado sobre este tema.

Bansal et al., (2012) observaram que os Compósitos de Matriz Metálica (MMC) reforçado por partículas de alumínio MMCs têm recebido considerável atenção devido as suas excelentes propriedades mecânicas, tais como; alta dureza, alta resistência a tensão, etc. Estes materiais apresentam dificuldades durante a usinagem devido à alta dureza e abrasividade relativas às partícula de alumina. Na pesquisa, 2%, 4% e 6% de alumina foram utilizados para produzir compósitos de matrizes metálicas. Verificou-se que aumentando o teor da alumina, ocorreu melhores propriedades mecânicas como, dureza e resistência à tensão. Os testes de torneamento foram planejados pelo método Taguchi e os dados experimentais foram analisados usando sinais de ruído com ANOVA. A influência das condições operacionais utilizadas seguiu um padrão relativamente compatível com a usinagem de materiais compósitos, sendo que os desgastes foram cada vez maiores com o crescimento da velocidade de corte e do avanço, sendo o mecanismo de desgaste preponderante a abrasão.

Vários estudos sobre a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID) permitiram que esta metodologia fosse reconhecida na última década como ferramenta adequada para medidas experimentais em aplicações avançadas, tais como estudos de dano à fadiga e investigações de

falhas em materiais compósitos. Esta metodologia dá a medida direta do deslocamento formulando uma combinação de imagens do componente, de modo que os vetores de deslocamento podem ser avaliados por um número de pontos de referência na superfície analisada. Neste trabalho, os autores Aspinwall et al., (2014) apresentam as últimas pesquisas com esta metodologia e analisam o fenômeno de falhas por fadiga em compósitos de fibra de vidro e fibras de carbono (CVFC) sob efeito de tensão dinâmica. Esta metodologia monitora o compósito em duas áreas: de histerese local e o local de variação dos esforços. Baseada em análise de imagens, esta metodologia fornece a medida direta do campo de deslocamento devido aos esforços. Utilizando uma formulação bem definida de combinar as imagens do componente carregado e livre de carga, os vetores de deslocamento podem ser avaliados a partir de um determinado número de pontos de referência na superfície analisada.

Apesar do processo de retificação ser uma das operações de usinagem mais versáteis que podem ser utilizadas para produzir uma superfície com o nível de acabamento da ordem de milésimos, este processo induz danos térmicos à superfície usinada se a seleção cuidadosa dos parâmetros de usinagem não ocorrer. O objetivo da pesquisa realizada por Lopez-Arraiza et al, (2013) buscou investigar a aplicação do processo de retificação em uma estrutura de materiais compósitos reforçada com o auxílio de um sistema de refrigeração para otimizar o processo de retificação.

Witulski et al., (2011) usaram uma metodologia para a fabricação de moldes em materiais compósitos poliméricos visando a produção de ferramentas com alta resistência ao desgaste para obtenção de peças em forma de chapa. Ferramentas de estampagem profunda feitas de materiais poliméricos são utilizadas basicamente para a criação de protótipos, testes e produção de tamanho reduzido. Investigações demonstram a possibilidade de trabalhar materiais leves em aços com tais ferramentas para pequenas e médias produções. Ferramentas feitas de material polimérico tem a vantagem de ser rentável, devido ao custo do material e de sua boa usinabilidade. Partículas de materiais duros são pulverizadas termicamente em um molde estruturado por um polímero. A peça gerada é removida a partir do molde original e funciona como uma ferramenta de conformação. Experimentos de repuxamento profundo mostram que a resistência ao desgaste dessas ferramentas é adequada para conformar peças em aços.

Gang, et al., (2013) pesquisaram o desenvolvimento de materiais compósitos baseadas em poliacrilonitrila produzidos e depois convertidos em nano escala de fibras de carbono n- FC. A estrutura resultou homogênea através da introdução de múltiplas etapas a quente. Os nano tubos são altamente alinhados e obtidos numa gama de temperaturas normalmente associada com carbonização. Mostram estruturas notavelmente uniformes e uma superfície muito lisa, com uma rugosidade média de 0,249 nm. A condutividade elétrica dos nano tubos FCs atinge 15,5 S/cm ao longo da direção das fibras. Testes de tração demonstraram um aumento de 21% e 60% na resistência à tração e módulo de Young, respectivamente.

Uma combinação polimérica de fibra de vidro e resina epóxi foi investigada por Belingardi et al. (2011) analisando carregamento elástico de esforços, para avaliar os efeitos na resistência à tração deste material. Especificamente, dois tipos de abas moldadas e cinco tipos de abas coladas foram considerados dentro deste estudo. Os resultados experimentais mostraram que a configuração de abas afetou a resistência à tração dos corpos de prova. A partir dos resultados experimentais, uma metodologia de teste apropriado foi proposta para fibra de vidro e epóxi.

Alguns desenvolvimentos recentes de polímero reforçado com fibra são analisados com ênfase para melhorar tenacidade interlaminar à fratura e compressão após a força de impacto. Tem sido observado considerável interesse nas últimas décadas em nano partículas utilizado como reforço secundário. Isto se baseia na melhoria de matrizes de resina de nano partículas modificadas com o objetivo de aumentar tenacidade interlaminar à fratura e aumentar ainda mais a resistência de laminados.

Para avançar nesta investigação, uma série de questões fundamentais e técnicas deve ser resolvidas: para fabricar compósitos de alto desempenho com reforços híbridos, incluindo a dispersão uniforme e alinhamento de nano partículas, da interface entre a matriz e as nano partículas otimizadas, e resinas de baixa viscosidade de nano partículas modificadas para facilitar impregnação de fibras de reforço com mais resina (> 60 % em volume) (FRIEDRICH et al. (2013).

A usinagem de materiais compósitos leva o sistema a altas temperaturas e danos das superfícies usinadas. Isto pode causar perda de desempenho das peças usinadas. Esta pesquisa realizada por GHIDOSSI et al. apresenta uma investigação da influência de parâmetros de corte na usinagem de materiais compósitos. A análise da rugosidade da superfície usinada e as

observações microscópicas revelam a importância fundamental da orientação relativa das fibras com respeito ao sentido de corte. Análises experimentais identificam a influência dos parâmetros de corte e geometria da aresta de corte sobre as tensões finais dos testes. Os resultados mostram a importância da configuração e orientação das fibras em relação ao corte sobre os desempenhos mecânicos. Alguns parâmetros foram definidos para quantificar os danos na superfície de corte e relacioná-la com a diminuição da tensão de ruptura. Uma análise estatística rigorosa é importante para avaliação dos resultados nesta pesquisa (GHIDOSSO et al. (2006).

Marques et al., (2009) realizaram pesquisas em furação de compósito epóxi reforçadas com fibra de carbono. Neste trabalho, quatro brocas, sendo três comerciais e um protótipo especial proposto, são comparadas em termos de força de avanço durante a furação e delaminação. A broca protótipo mostrou resultados encorajadores em termos de força de avanço e redução do efeito de delaminação. Além disso, foi possível afirmar que a escolha correta da geometria da broca, da velocidade de corte de 53 m/min. e o baixo avanço de 0,025 mm/rev. tende a evitar a delaminação.

Ayrlmis (2013) pesquisou a viabilidade de utilização da celulose como matriz para união de compósito de alumínio obtida de materiais reciclados. Para tanto foram avaliadas as propriedades mecânicas deste compósito. Os compósitos foram preparados por injeção em moldes de proporções 3% em peso de celulose, e 40,50 e 60% de reforço picado, tipo serragem e casca. Esta última estrutura apresentou melhor resultado á flexão. A cuja resistência aumentou significativamente. Resultados semelhantes foram também observados para a resistência à tração.

Okayasu et al., (2013) pesquisaram as propriedades mecânicas e falhas de um plástico reforçado com fibra de carbono reciclado. As amostras foram produzidas utilizando resina de epóxi com fibra de carbono moído antes da mistura, tendo sido introduzida a resina de estireno butadieno acrilonitrila com diferentes teores em peso. A resistência à tração aumentou com o aumento do teor de fibras. A resistência à fadiga também aumentou com o aumento do teor de fibra. Detalhes do comportamento de crescimento de trincas foram discutidos usando vários modelos de crescimento de trincas propostas em estudos prévios.

Karpat et al., (2012) estudaram os polímeros reforçados por fibra de carbono que estão sendo usados com grande intensidade na indústria aeroespacial, devido às suas propriedades superiores, tais como, alta resistência, baixo peso, alta resistência a corrosão e baixo coeficiente

de expansão térmica. Os componentes em PRFC são produzidos usualmente por moldagem, um processo que não se aplica usinagem. Por outro lado, as peças em seu acabamento final necessitam usinagem de contorno, tais como; usinagem de cavidades, furações e fresamentos. Nesta pesquisa os autores analisaram a usinabilidade de compósitos unidirecionais direcionado ao seu fresamento. Por se tratar de um material compósito anisotrópico e não homogêneo este material gera problemas durante sua usinagem. Dependendo das direções das fibras, os esforços de usinagem, qualidade superficial podem mudar em função da direção de usinagem adotada. Técnicas experimentais de modelagem analíticas e elementos finitos foram empregadas para análise do mecanismo de formação de cavacos no fresamento de PRFC.

Laurenzi et al., (2013) utilizaram um processo de análise numérica e experimental para investigar a fabricação de peças em compósitos reforçados em fibra de carbono que têm grande aplicação na indústria aeronáutica para o caso do processo de moldagem por transferência de resina. Estes componentes são peças primárias estruturais caracterizadas por paredes de vários tipos de espessuras, que dificultam a impregnação da resina durante a montagem de sua forma final. Esta simulação baseia-se em método modificado de elementos finitos e foi conduzido para investigar o fluxo de resina para encontrar uma estratégia de injeção que garanta a boa impregnação da forma inicial e mantenha um tempo compatível de cura com a resina. Os componentes foram satisfatoriamente obtidos com bom desempenho entre a análise numérica e o processo de fabricação.

Durante as últimas décadas, tem havido um progresso significativo no desenvolvimento orientado e direcionado a indústria baseado em modelos para operações de usinagem. Este trabalho elaborado por Arrazola et al., (2013) apresenta o estado da arte no desempenho preditivo de modelos para usinagem, e identifica os pontos fortes e fracos dos modelos atuais. Inclui uma avaliação crítica das técnicas relevantes de modelagem e sua aplicabilidade e/ou limitações para a previsão das usinagens complexas. O modelamento de processos muitas vezes é utilizado para prever tensões, temperaturas e esforços ocorridos durante a usinagem.

No entanto, para serem úteis à indústria, estas variáveis devem ser correlacionadas com medidas de desempenho, tais como; qualidade do produto (precisão dimensional, tolerâncias, acabamento, etc.), de superfície e de integridade da subsuperfície, desgaste de ferramenta, formação dos cavacos, formação de rebarba, estabilidade da máquina, etc. A adoção de modelos

de usinagem pela indústria depende criticamente da capacidade de um modelo para fazer essa ligação e prever o desempenho de usinagem. Portanto, este trabalho tem o objetivo de identificar e discutir vários temas chaves de pesquisa intimamente associados com o desenvolvimento de modelos de previsão para operações de usinagem, visando principalmente aplicações industriais.

O trabalho desenvolvido por Asprone et al., (2013) relata um estudo abrangente da resposta à compressão de estruturas alveolares hexagonais feito de papel impregnado por resina fenólica denominada Nomex. Busca também uma resposta adequada entre os resultados da tensão de compressão determinada numericamente e os resultados de medidas experimentais. Um modelo tipo célula única de Nomex foi criado usando o software ABAQUS de elementos finitos para avaliar imperfeições devido o processo de fabricação. São considerados, incluindo imperfeições materiais como variações do módulo de elasticidade e defeitos geométricos.

O trabalho desenvolvido por Anyndia et al. (2011) estabelece um conjunto de critérios para verificar duas microestruturas em compósitos reforçados com fibras de equivalência geométrica. Os critérios estão baseados numa combinação de um processo de ponto a ponto e funções de probabilidade de dois pontos; convergência de tamanho micro e igualdade na distribuição de raios da fibra. Os critérios foram mostrados para distinguir diferentes microestruturas e identificar outras semelhantes. Além disso, uma técnica foi proposta que pode auxiliar eficientemente a reconstrução de uma microestrutura. Os resultados mostram a técnica de reconstrução com tolerâncias estabelecidas de 5% em várias amostras de observações experimentais.

A usinabilidade dos compósitos de fibra de carbono é fortemente dependente do ângulo de orientação das fibras. No torneamento, o ângulo de orientação das fibras medido no plano Muitas vezes, em função da utilização de máquinas capazes de gerar velocidades de corte mais elevadas do que convencionalmente utilizado, a usinagem de alta velocidade é considerada apenas como uma forma de melhorar a produtividade. O aumento da velocidade de corte reduz o tempo de usinagem e conseqüentemente, melhora a produtividade. Liu et al., (1996) fizeram estas observações pesquisando usinagem de materiais compósitos por furação. Acrescentam que a furação é uma das principais operações de usinagem que são realizadas em materiais compósitos reforçados com fibras. Problemas típicos incluem a delaminação dos compósitos, o desgaste rápido da ferramenta, arrancamento de fibras, a formação de cavaco em pó são geralmente fonte

de preocupação. A ocorrência da delaminação reduz a resistência à fadiga, resulta numa baixa precisão de montagem e afeta a integridade da estrutura do compósito.

Raramente enfatiza-se que a qualidade do produto pode ser melhorada, isto é, que uma maior precisão e melhor acabamento superficial podem ser obtidos. Entretanto, torna-se necessário a adoção plena da tecnologia de usinagem com altas velocidades para atingir lucros satisfatórios. Usinagem de alta velocidade é muito mais que simplesmente altas rotações do fuso principal. Vantagens competitivas podem ser alcançadas somente se as interações entre a peça e a ferramenta forem levadas em consideração, se a máquina-ferramenta for corretamente selecionada, as estratégias de usinagem CNC forem compatibilizadas, a seleção dos parâmetros de corte for devidamente sintonizada com o conjunto e, por último, mas não menos importante, os aspectos de segurança forem respeitados (NIEMINEN et al., 2012.).

Compósito de alto desempenho de fibra de carbono vem obtendo um rápido desenvolvimento. Com o aumento da demanda de sua utilização associada ao controle preciso de forma e dimensões, a usinagem de compósitos surge como uma necessidade. Estudos sobre a usinagem de compósitos reforçados, em geral, são muito poucos em comparação com os de outros materiais e algumas literaturas sobre a usinagem de compósitos de PRFC estão disponíveis. Os compósitos são não homogêneos, o que torna difícil uma analogia com os mecanismos de formação do cavaco bem como com os mecanismos de geração de desgaste com outros materiais. O comportamento da usinagem depende da forma de fibra, da proporção das fibras e das orientações da fibra na matriz, segundo estudos de Santhanakrishnan et al., (2013). As ferramentas de corte classe ISO K20 geram uma superfície com acabamento superior, apresentam um desempenho melhor, gerando menor desgaste de flanco do que as ferramentas de classe ISO P30 nas usinagens de compósitos de fibras de carbono PRFC. A variação da pressão específica de corte com a velocidade de corte é marginal quando se utiliza ferramentas de classe ISO K20, ao contrário do que ocorre com as ferramentas de classe ISO P30.

A usinabilidade dos compósitos de fibra de carbono é fortemente dependente do ângulo de orientação das fibras. No torneamento, o ângulo de orientação das fibras medido no plano de trabalho varia continuamente em relação à pontada ferramenta. Esta variação promove solicitações mecânicas ora de tração e ora de compressão, alterando o mecanismo de formação do cavaco e promovendo a formação de defeitos na peça. A medição do ângulo de cisalhamento em

compósitos é difícil e não há nenhuma técnica padronizada de medição nestes materiais. Com exceção do ângulo de inclinação da fibra de  $0^\circ$ , os cavacos são geralmente na forma de pó, tornando extremamente difícil de medir a espessura do cavaco para determinar o ângulo de cisalhamento. É questionável que o ângulo médio de atrito entre o cavaco e a ferramenta possa ser o mesmo para todos os ângulos de orientação das fibras. A estimativa de força de corte é extremamente complexa conforme Bhatnagar et al. (2014).

Os mecanismos de formação de cavaco em compósitos, identificados por câmera de alta velocidade, são delaminação, flambagem da fibra e corte da fibra. Dois tipos de formas de cavacos também são observados: um cavaco fragmentado gerado pelo corte e flambagem da fibra, e um cavaco de lasca gerada pela fratura da matriz. Desgaste de cratera e lascamento da ferramenta não foram observados por causa do mecanismo de formação do cavaco que tende a forma de pó. Observam-se dois tipos diferentes de desgaste: arredondamento da aresta de corte e desgaste de flanco. O arredondamento da aresta da ferramenta de corte surge em função da ação abrasiva das fibras de carbono que são dobrados quando a aresta de corte da ferramenta afiada toca a superfície do compósito. O desgaste de flanco ocorre pela abrasão contínua da ferramenta pelas fibras de carbono. Pontos negros localizam-se na zona periférica do desgaste de flanco. A forma predominante de pó do cavaco impossibilita o desgaste de cratera que se forma na superfície de saída. O desgaste no acabamento do material compósito de fibra de carbono é menos dependente da velocidade de corte quando comparado com a usinagem de aços segundo pesquisas de Kim et al. (2014).

Entre os possíveis mecanismos de desgaste, só abrasão, danos na superfície e, por vezes, a adesão são de importância para a usinagem de materiais compósitos. Os mecanismos de desgaste da ferramenta estão essencialmente relacionados às características físicas e mecânicas dos diferentes sistemas da matriz e da fibra. O tipo de fibra, a arquitetura do reforço e a composição da matriz são os fatores que regem a seleção de ferramentas de usinagem e ajuste de parâmetros. As fibras de carbono apresentam um comportamento fortemente abrasivo. A aresta de corte deve possuir um alto grau de resistência à abrasão e ao lascamento. Ferramentas de metal duro, ferramentas de metal duro revestido e ferramentas de PCD apresentam bons resultados em termos de desgaste e vida da ferramenta durante a usinagem de materiais compósitos. Os cerâmicos são inadequados porque sua baixa resistência e alta fragilidade fazem com que fiquem muito

sensíveis à choques, além de sua baixa condutividade. Os mecanismos de desgaste da ferramenta estão essencialmente relacionados às características físicas e mecânicas dos diferentes sistemas da matriz e da fibra. O tipo de fibra, a arquitetura do reforço e a composição da matriz são os fatores que regem a seleção de ferramentas de usinagem e ajuste de parâmetros. As fibras de carbono apresentam um comportamento fortemente abrasivo. A aresta de corte deve possuir um alto grau de resistência à abrasão e ao lascamento. Devido à susceptibilidade acentuada das fibras de carbono a fratura frágil, geometrias de ferramentas de usinagem de compósitos correspondem aproximadamente às geometrias utilizadas nas usinagens dos metais. Também o tipo de matriz polimérica exerce uma influência significativa sobre o processo, a maior diferença sendo entre termofixos e os materiais de matriz termoplástica. Para a mesma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta é mais alto para a matriz termoplástica, em vez de matriz termofixos. Na usinagem de compósitos termoplásticos, os resultados satisfatórios são obtidos apenas quando PCD é usado como material de ferramenta TETI, (2013).

Em função da presença de fases com propriedades mecânicas e térmicas drasticamente diferentes, existem interações complexas entre a matriz e o reforço durante a usinagem. A natureza abrasiva da fibra provoca o desgaste severo na ferramenta de corte durante a usinagem. O mecanismo de usinagem envolve a combinação de deformação plástica, cisalhamento e ruptura por flexão. Estes mecanismos dependem da flexibilidade, tenacidade e orientação das fibras. As áreas desgastadas pela usinagem de compósito concentram-se na área do flanco e na ponta da ferramenta de corte. O desgaste de ponta sobre a ferramenta de corte é função das cargas dinâmicas e o desgaste na área do flanco está associado com a abrasão, aderência e ao calor intenso. Normalmente o desgaste de cratera não ocorre na ferramenta de corte na usinagem de compósitos. Parâmetros de corte afetam o desgaste durante a usinagem de compósitos, sendo que a influência da velocidade de corte afeta de forma mais significativa, quando se atinge o pico crítico. O aumento da velocidade de avanço leva a um maior desgaste de flanco da ferramenta e o aumento da profundidade de corte aumenta a geração de calor e desgaste na ferramenta conforme estudos realizados por Ferreira et al., (1999 e 2012).

Várias abordagens para melhorar a usinabilidade de compósitos foram encontradas. Diversos tipos de ferramentas de corte, variação da orientação das fibras de carbono, utilização de diferentes configurações de usinagem, técnicas de refrigeração diferenciadas, tais como

refrigeração criogênica, quantidade mínima de lubrificação, refrigeração por inundação, etc foram aplicadas durante a usinagem para tentar reduzir o calor gerado. Sabe-se que o calor gerado durante a usinagem de compósitos é um dos fatores que influenciam a qualidade do produto final e reduz a vida da ferramenta de corte conforme KHAIRUSSHIMA, et al., (2012).

Há pouca literatura ressaltando a influência da temperatura durante o corte de materiais compósitos, porém, ela influencia na qualidade da superfície de materiais fresados e na vida da ferramenta. Se a temperatura exceder a temperatura de transição vítrea da matriz de resina termofixa, uma degradação da resina ocorrerá na superfície usinada. A degradação da resina facilita a delaminação e reduz a resistência, produzindo defeitos sérios na superfície. Esta temperatura crítica é de cerca de 180°C para a maioria de compósitos à base de epóxi, (Yashiro et al., 2013).

A aplicação de ar resfriado a 8°C e a pressão de 0.4 bar direcionado a superfície usinada durante o fresamento de compósito geralmente impede a queima da superfície devido a uma melhor evacuação de fragmentos do cavaco além de propiciar o resfriamento da peça e da ferramenta segundo El-Hofy et al. (2011).

A baixa temperatura de usinagem elimina completamente a possibilidade de ocorrência de mecanismos de difusão e ou de mecanismos de desgaste por dissolução na ferramenta. A hipótese desenvolvida para explicar o arredondamento da aresta se baseia na inexistência de uma zona de estagnação durante a usinagem de compósitos. Fibras e matriz estão continuamente em ação na aresta de corte promovendo arredondamento e o desgaste de flanco. Para os mesmos comprimentos de usinagem realizados nas mesmas condições, o metal duro revestido com diamante apresenta pequeno arredondamento de aresta enquanto que AlTiN revestindo o metal duro não protege a aresta em função de sua oxidação (WANG et al., 2013).

A flutuação de carga que atua na aresta de corte durante a furação de compósitos promove características de desgaste em função da anisotropia das fibras duras e das interações termomecânicas entre a superfície da broca e o compósito com a inerente baixa condutividade térmica, principalmente quando comparado com os metais. As fibras duras causam o excessivo desgaste abrasivo e geram calor por fricção enquanto a matriz um pouco mais macia e aderente que as fibras provocam o arredondamento e alisamento das arestas. Desgaste abrasivo, lascamento e adesão são os mecanismos de desgaste de ferramentas durante a furação de

compósitos laminados. Poucas pesquisas foram encontradas na literatura sobre furação em alta velocidade de corte em compósitos laminados. O objetivo sempre foi obter menos delaminação pela redução de forças de avanço. Foram apresentados os efeitos das variáveis de processo (como velocidade de corte e de avanço, e ângulo de ponta da broca) na delaminação durante a furação em alta velocidade. Revelou-se redução na tendência de delaminação com o aumento da velocidade de corte. A combinação de baixa velocidade de avanço e de ângulo de ponta torna-se essencial para minimizar a delaminação de laminados compósitos (LIU et al., 2013).

Devido à estrutura anisotrópica e heterogênea do compósito, defeitos provocados pela furação tais como a delaminação em torno da borda do furo é crítica e prejudicial para a durabilidade, reduzindo a vida em serviço de componentes. Na indústria aeronáutica a delaminação responde por 60% das rejeições durante a fase final de montagem de uma aeronave. A delaminação pode se tornar um fator limitante no uso de compósitos para aplicações estruturais. Desta forma tecnologias que melhorem a qualidade da furação em compósitos é imperativa (LINBO et al., 2009).

Uma alternativa a furação convencional, a furação orbital permite a realização de diferentes geometrias com uma mesma ferramenta. Esta técnica permite uma melhor integridade da superfície em compósitos, conduz a temperaturas de processo mais baixas e as forças de avanço inferiores. Somente em velocidade de corte elevadas é que trincas na superfície dos furos podem ser observadas (BRINKSMEIER et al., 2013).

A retificação na produção de componentes de materiais compósitos é muito restrita. O foco da indústria é em fresamento de contornos, furação, escareamento e torneamento, em conjunto com os processos não tradicionais, tais como o corte a jato d'água e usinagem por feixe de laser para a geração de forma, precisão e como um meio para facilitar a montagem (SOO et al., 2012).

### **2.3. DETALHES SOBRE O QUE SÃO OS MATERIAIS COMPÓSITOS**

Os materiais compósitos podem ser definidos como uma união de dois ou mais componentes distintos produzindo um novo material com propriedades resultantes mais atraentes em relação às daquelas dos constituintes individuais. Formam sempre uma interface entre eles (RAWLINGS, 2013).

O processamento adequado de materiais compósitos torna possível a obtenção de produtos com propriedades específicas e características, tais como: baixa massa específica (inferior à dos metais e cerâmicas), boa resistência mecânica, alta tenacidade, boa resistência química, estabilidade térmica, boa resistência à fadiga (KELLY, 2012).

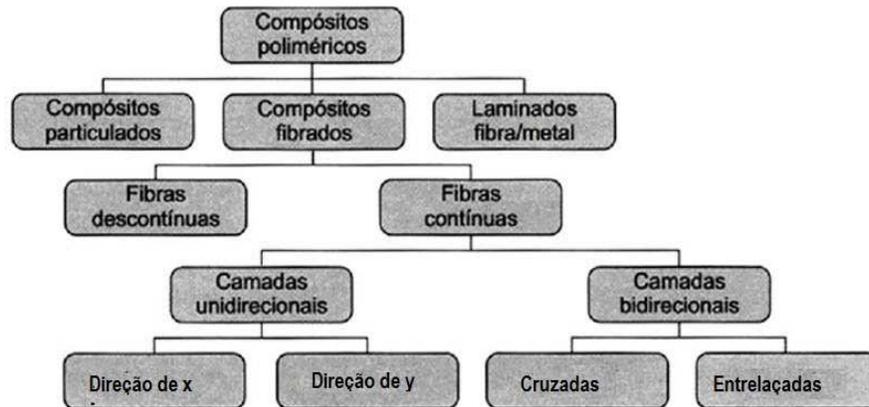
Para formar o compósito, há a necessidade da existência de uma matriz a qual é sempre formada por um material homogêneo. A matriz é reforçada por elementos nas mais diversas formas e em particular na forma de fibras. A matriz é a responsável por manter a posição relativa entre os elementos de reforço e por dar a conformação básica da peça bem como criar uma proteção contra ações externas. As matrizes são usualmente polímeros termofixos ou para aplicações mais específicas, podem ser constituídas por materiais cerâmicos ou metálicos conforme ilustra a

**Tabela 1 - Classes de materiais compósitos (MARINUCCI, 2011)**

<b>Classe de Compósitos</b>	<b>Constituição</b>	<b>Exemplos</b>
Compósitos Naturais	Fibras naturais reforçando polímeros ou tecidos naturais	Madeira, osso, bambu, músculos e outros tecidos humanos.
Compósitos Manufaturados	Dispersão de fases com diferentes características	Plástico reforçado com fibras (carbono, vidro, aramida, etc), vigas de concreto – cimento reforçado com aço, polímeros aditados com material particulado.

Nos materiais compósitos, a resistência é bastante influenciada pela geometria e orientação do reforço, de modo que é conveniente fazer essa classificação baseada nesses aspectos. Os compósitos podem ser formados por elementos de reforço particulados, de fibras picadas, de fibras bobinadas, ou de fibras/metais. Os compósitos particulados podem ser esféricos, cúbicos, tetragonais ou de qualquer outra forma, mas quase sempre equiaxiais. Já os de fibras têm este

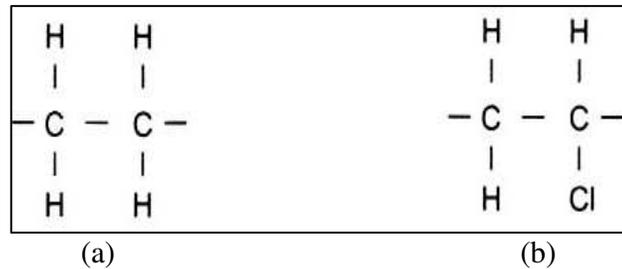
reforço picado e aleatoriamente distribuído ou na forma de um tecido bobinado que pode ser disposto formando cruzamentos em várias camadas do mesmo. Requisitos de camadas isotrópicas levaram à construção de laminados fibra/metal, que associa as vantagens dos materiais metálicos e dos materiais compósitos. A Figura 1 ilustra as diferentes formas de apresentação dos reforços.



**Figura 1 - Formas de reforços e sua distribuição nas matrizes (MARINUCCI, 2011).**

Existem vários tipos de matrizes que podem ser empregadas para a obtenção de materiais compósitos. Considerando o material básico têm-se as resinas termoplásticas e termofixas ou termorrígidas. Por seu lado os metais são formados pela união de células Cúbica de Corpo Centrado (CCC), Cúbica de Face Centrada (CFC) e Hexagonal Compacta (HC).

Os materiais poliméricos são materiais orgânicos formados por cadeias de carbono, nos quais estão ligados átomos que podem ser de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, cloro, flúor ou enxofre. Estes formam a quase totalidade dos materiais poliméricos em uma diversidade bastante grande. A diversidade é tão grande que muitas vezes basta apenas a substituição de um átomo de uma determinada molécula para formar um novo material que apresenta características distintas daquele da molécula original. É o caso do etileno, por exemplo, que pela substituição de um átomo de hidrogênio por um átomo de cloro forma o cloreto de vinila, conforme ilustrado pela Figura 2.



**Figura 2 - Ilustração dos monômeros (a) etileno, (b) cloreto de vinila (MARINUCCI, 2011).**

Segundo Rawlings et al. (2013), dependendo da aplicação do compósito é necessário ou desejável que a matriz possua as seguintes propriedades, tais como:

- baixa absorção de umidade;
- facilidade de molhabilidade e ligação às fibras;
- baixa viscosidade e fluidez para penetrar completamente entre as fibras e possibilitar a minimização ou eliminação de vazios durante o processo de consolidação do compósito;
- elasticidade para poder transferir a carga ou esforço mecânico para as fibras;
- resistência a temperaturas elevadas (dependendo da aplicação);
- capacidade de resistir a baixas temperaturas (dependendo da aplicação);
- excelente resistência química (dependendo da aplicação);
- baixa capacidade de contração ou encolhimento;
- baixo coeficiente de expansão térmica;
- resistência mecânica, módulo adequado e alongação;
- fácil processabilidade;
- boa estabilidade dimensional em serviço.

Os polímeros termoplásticos são sólidos à temperatura ambiente. Esses polímeros solidificam a temperatura ambiente e fundem quando aquecidos acima da temperatura de fusão solidificam novamente quando são resfriados. Em geral, apresentam cadeias longas lineares ou ramificadas, não possuem ligações cruzadas como os termorrígidos, e podem ser reciclados repetidamente com a aplicação de calor (processo reversível). Componentes em termoplásticos podem ser produzidos nas mais complexas formas pelos processos de moldagem por injeção,

extrusão e termo conformação (OWEN, J.M, 2012). As Tabela 2 a 5 apresentam as propriedades das resinas termoplásticas todas devidas a ZWEBEN, (2013).

Por seu lado, os polímeros termofixos ou termorrígidos são líquidos à temperatura abaixo de 50°C, na sua maioria. Isto proporciona a vantagem de serem processados quando ainda líquido, na temperatura ambiente. Necessitam de baixo investimento nos meio de produção por dispensar equipamentos como injetoras e extrusoras, por exemplo. A solidificação é obtida pela adição de agentes de cura ao polímero, podendo ocorrer também pela ação de temperatura.

**Tabela 2 - Propriedades das Resinas Termoplásticas (MARINUCCI, 2011).**

<b>Resina</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de Elasticidade em tração (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>
Poli (acetal)	1,4	3,5	70
Nylon	1,1	1,3 – 3,5	55 - 90
Poli (carbonato)	1,2	2,1 – 3,5	55 - 70
Poli (etileno)	0,9 – 1,0	0,7 – 1,4	20 - 35
Poli (propileno)	0,90 - 0,91	---	29 - 38
Poli (ester)	1,3 – 1,4	2,1 – 2,8	55 - 60
PEEK	1,3 – 1,4	3,5 – 4,4	100
PPS	1,3 – 1,4	3,5	78

**Tabela 3 - Propriedades físicas do Polipropileno (MARINUCCI, 2011).**

<b>Propriedades Físicas</b>	<b>Polipropileno</b>
Massa específica (g.cm <sup>-3</sup> )	0,90 -0,91
Absorção de água (3 mm/24h)(%)	<0,01
Dureza Rockwell (R)	85 – 110

**Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Polipropileno (REZENDE, 2011).**

<b>Propriedades Mecânicas</b>	<b>Polipropileno</b>
Resistência à tração (MPa)	29 – 38
Elongação sob tração (%)	500 – 600
Módulo de elasticidade sob flexão (GPa)	0,9 – 1,4
Módulo de flexão (GPa)	1,15
Resistência ao impacto Izod (J/cm)	30 – 450

**Tabela 5 - Propriedades Térmicas do Polipropileno (REZENDE, 2011).**

<b>Propriedades Térmicas</b>	<b>Polipropileno</b>
Temperatura de fusão (C°)	165 - 175
Temperatura de transição vítrea (C°)	4 – 12
Temperatura de processamento por compressão (C°)	215 – 227
Temperatura de processamento por injeção (C°)	182 -243
Temperatura de amolecimento (C°)	152
Condutividade térmica (W/m.C°)	0,14

A presença de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas permite a formação de uma estrutura tridimensional no polímero, tornando-o infusível e insolúvel, e desse modo sem a possibilidade de reciclagem. Exemplo de polímeros termofixos são as resinas epóxi, fenólica e poliéster. Segundo Marinucci (2011) estes polímeros apresentam propriedades mostradas na Tabela 6.

Polímeros termofixos apresentam propriedades mecânicas e elásticas superiores aos termoplásticos e exibem uma ótima estabilidade dimensional, além de possuírem excelente resistência ao ataque de produtos químicos. Uma grande desvantagem, se comparado aos materiais metálicos, é a sua baixa temperatura de utilização, na faixa de 150°C, assim como não ser um material reprocessável.

**Tabela 6 - Propriedades dos diversos tipos de resinas termofixas, (MARINUCCI, 2011)**

<b>Resina</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>
Epóxi	1,10 – 1,14	2,1 – 5,5	40 - 85
Fenólica	1,20 – 1,4	2,7 – 4,1	35 - 60
Poliéster	1,1 – 1,4	1,3 – 4,1	40 - 85

Os polímeros termofixos apresentam propriedades mecânicas e elásticas superiores aos termoplásticos e exibem uma ótima estabilidade dimensional, além de possuírem excelente resistência ao ataque de produtos químicos.

A denominação matriz polimérica advém do material formado pelas misturas em proporções adequadas de resinas e agentes de cura (iniciadores de cura/endurecedores e promotores de cura/aceleradores) que, quando convenientemente curados (polimerizados), formam um material sólido que apresenta boas propriedades mecânicas e excelente resistência química. No entanto, muitas vezes, a expressão matriz polimérica se confunde com o termo resina. Da forma que é comumente empregado, resina pode definir tanto o polímero em si, quanto a matriz polimérica, sendo necessária atenção para distinguir a que o termo se refere.

Na elaboração de um componente estrutural em material compósito procura-se otimizar o aproveitamento das propriedades mecânicas associadas aos reforços fibrosos. A seleção do reforço leva sempre em conta aspectos que variam desde o custo desses materiais até o desempenho pretendido e a técnica de fabricação empregada.

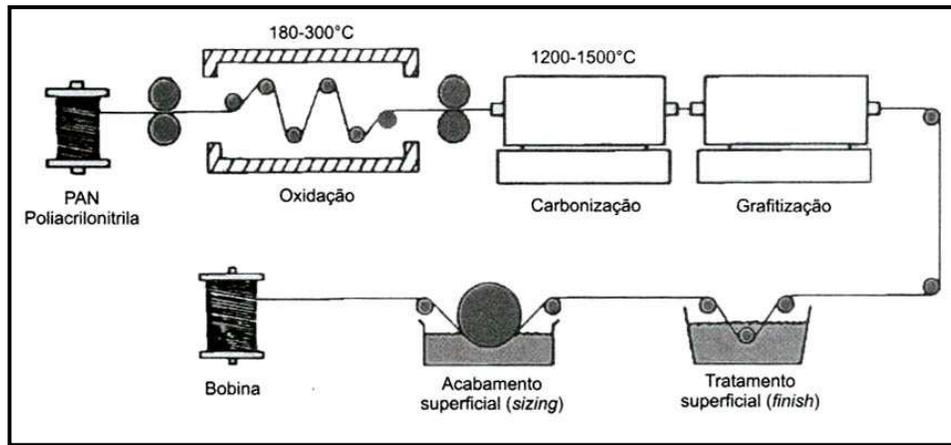
Considerando uma estrutura sob a ação de determinados carregamentos, tais como carregamentos estáticos, dinâmicos ou mesmo com esforços combinados, os componentes que a compõem têm que estar capacitados a desempenhar ações de acordo com as condições previstas ou estabelecidas em projeto. Essas condições nos compósitos são alcançadas pela capacidade do elemento de reforço, que confere à estrutura elevadas propriedades específicas de resistência e módulo de elasticidade na direção da fibra. Fibras de vidro, fibras de aramida e fibras de carbono são os elementos de reforço mais utilizados para fabricação de materiais compósitos.

O desenvolvimento das fibras de carbono no final da década de 1960 permitiu o avanço que colocaria os compósitos poliméricos como um material capaz de aplicações antes reservadas aos metais.

O potencial das fibras de carbono não está associado apenas à baixa densidade e elevada resistência mecânica, mas, sobretudo ao alto módulo de elasticidade e reduzida deformação que o material possui que as colocam como candidatas em potencial para fabricação de estruturas em que esses requisitos são exigidos. Por isso, a fibra de carbono é o reforço predominante para fabricação de compósitos estruturais.

A poliacrilonitrila (PAN), a qual obtém a fibra de carbono é uma fibra acrílica que possui uma estrutura molecular que faz lembrar o polietileno, no qual um átomo de hidrogênio foi substituído por um do grupo nitrila. A síntese da PAN é feita utilizando-se acrilonitrila, acrilato de metila e ácido itacônico. Por meio de um processo de fiação a úmido são obtidas as fibras de poliacrilonitrila. Apresentam tensão de ruptura de apenas 750 MPa, módulo de elasticidade de 10 GPa e alongamento de 15%. Por causa destas propriedades, as fibras de PAN não podem ser utilizadas em compósitos para aplicações estruturais. Segundo Buckley (2012), essas propriedades são, no entanto, drasticamente melhoradas por meio dos processos que incluem oxidação e carbonização e, em alguns tipos de fibra, grafitização que exige temperatura acima de 2000°C no forno para este fim (Figura 3). Temperaturas de carbonização mais elevadas resultam em um aumento do módulo de elasticidade, enquanto que fibras de alta resistência mecânica são obtidas em temperaturas na faixa de 1500°C.

A etapa de carbonização, de acordo com o teor de carbono alcançado, definirá propriedades que classificarão o material em classes de fibras (Fibras de alta resistência mecânica (HT); fibras de alto módulo de elasticidade (HM) e fibras de módulo intermediário (IM)), que propiciarão aos usuários uma ampla escolha dos reforços para atender às exigências de resistência, rigidez ou ambas.



**Figura 3 - Ilustração esquemática do processo de fabricação da fibra de carbono (BUCKLEY, 1991).**

A Tabela 7 relaciona as principais propriedades da fibra de carbono, cuja aplicação principal e importante em materiais compósitos é o Material Carbono/Carbono.

Na definição mais usual, fibra para fabricação de compósitos poliméricos é a reunião de milhares de monofilamentos contínuos, orientados numa só direção e unidos por um material aglomerante. Assim, a fibra é o primeiro produto na escala dos materiais de reforços. São materiais contínuos que podem ser torcidos durante a fabricação, denominados de yarns, ou não torcidos (non-twisted), denominados de rovings.

**Tabela 7 - Propriedade das fibras de Carbono (MARINUCCI, 2011).**

	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na ruptura (%)	Densidade (g.cm <sup>3</sup> )
Resistência (HT)	3400	238	1,5	1,77
Módulo (HM)	2350	358	0,6	1,79
Mód. Intermediário (IM)	4100	295	1,5	1,77

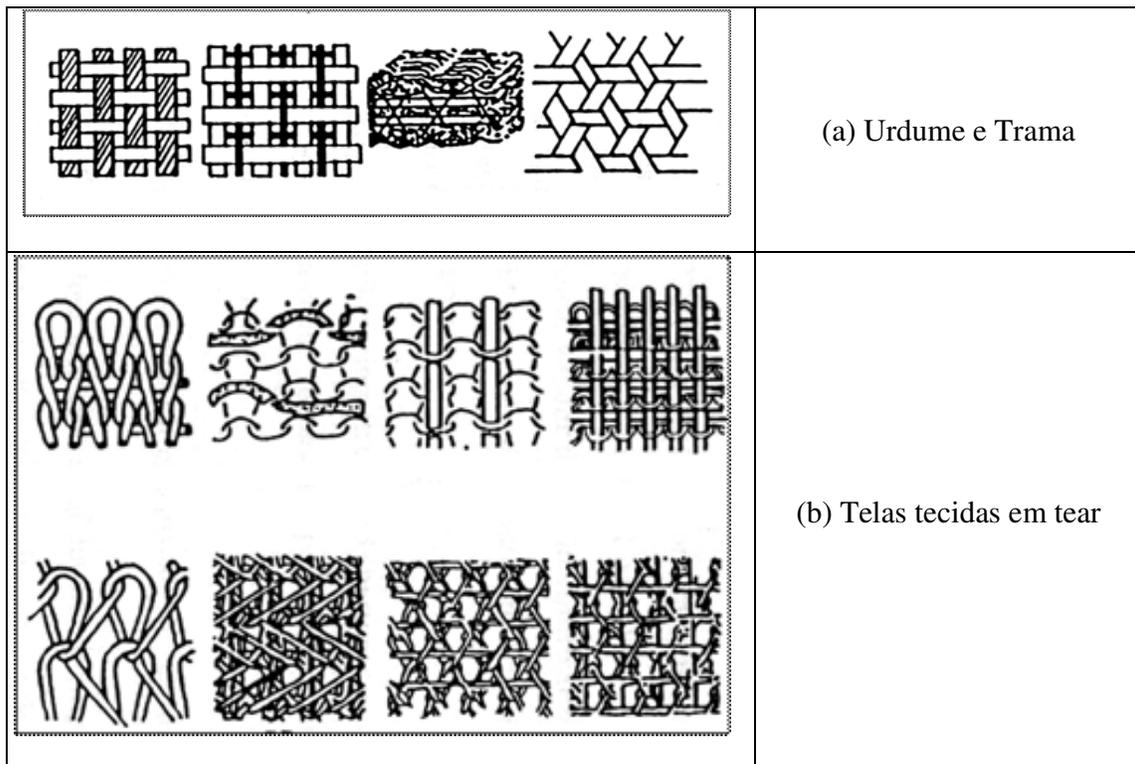
As fibras são disponíveis na forma de fibras curtas e fragmentadas ou na forma de filamentos contínuos, sendo cada uma fabricada numa ampla variedade de produtos.

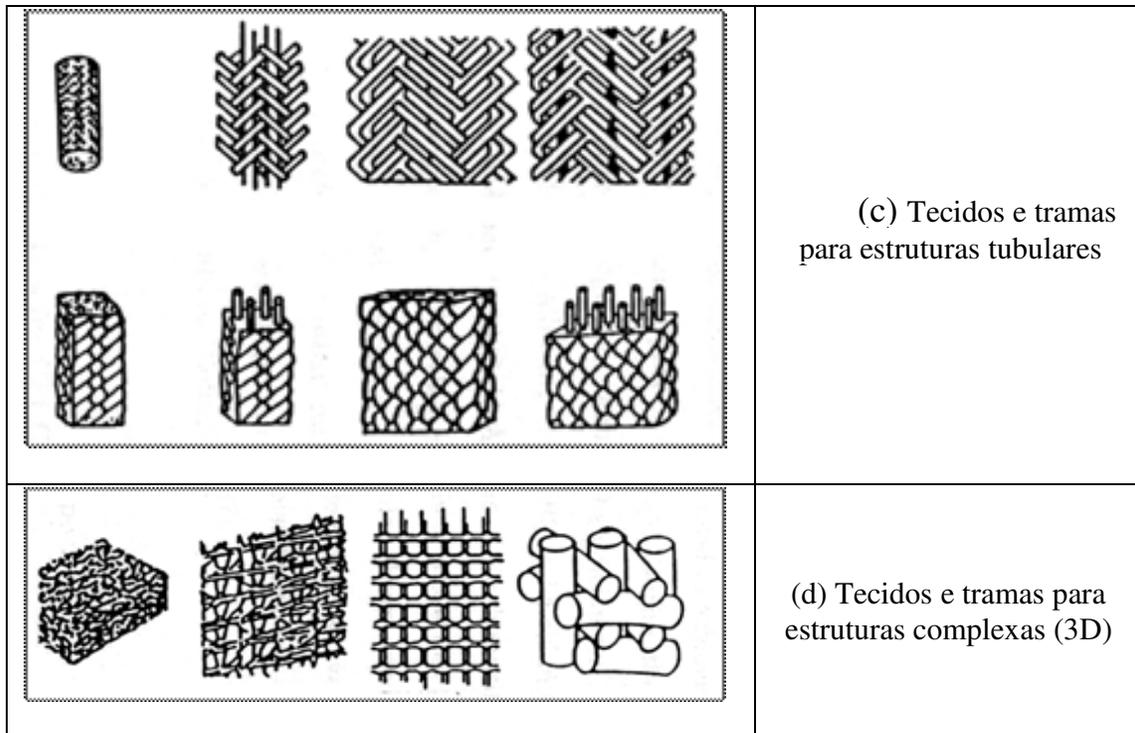
Existem vários tipos e diferentes formas de reforços que são empregados na obtenção de materiais compósitos. A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, alguns tipos de tramas de tecidos de reforço que podem ser utilizados em compósitos (CHAWLA, 2012).

Eles são os responsáveis pela resistência da peça e são classificados de acordo com suas características físicas e geométricas. Propriedades como: dureza, resistência à tração, flexão, ao cisalhamento, rigidez, tenacidade e resistência térmica, são parâmetros importantes de projeto na escolha do reforço (GONÇALVES, 2014). Quanto à geometria, os reforços fibrosos podem apresentar-se de diversas formas e estruturas conforme a necessidade de projeto.

Os compósitos termoplásticos estruturais foram inicialmente desenvolvidos para a indústria aeroespacial em aplicações de defesa, utilizando matrizes resistentes a altas temperaturas, porém de custos elevados, tais como: poli (éter-éter-cetona) (PEEK), poli (sulfeto de fenileno) (PPS) e poli (éter imida) (KIM, 2011).

Nas literaturas, normalmente, o fenômeno de conversão de uma matriz polimérica do estado líquido para o estado sólido é denominado de cura. Essa denominação, no entanto, carece de uma definição de forma mais precisa que distingue as conversões, ligações rompidas pelo iniciador de cura que efetivamente promovem as ligações cruzadas daquelas que, embora rompidas, não participam da reticulação. Assim, para essa distinção, atribui-se à primeira a denominação de interligação e à segunda, de cura.





**Figura 4 - Representação esquemática dos principais tipos de tramas de tecido de reforço (CHAWLA, 2012).**

A distinção entre interligação e cura é mais relevante em sistemas que utilizam o monômero de estireno como agente formador das ligações cruzadas, como aqueles presentes na resina poliéster. Uma interpretação dessa diferença pode ser dada pela possibilidade de formação de ligações entre as moléculas dos monômeros, como também das ligações duplas da macromolécula de poliéster que são rompidas, mas que não participam da reticulação, e daquelas que, rompidas, participam da efetiva formação de ligações cruzadas.

Para que ocorram as interligações na copolimerização do monômero de estireno com a resina poliéster ou com a resina viniléster, as ligações duplas (insaturações) da cadeia da resina têm que ser rompidas e efetivamente participar da reticulação. Ligações duplas que são rompidas, mas que não participam das ligações cruzadas, não contribui para as resistências mecânicas e químicas desejadas e participam apenas do processo de cura da matriz e não da interligação. Essa seria, portanto, a distinção entre ligação e cura que muitas vezes não é compreendida.

Existem vários processos para obtenção de compósitos poliméricos e que podem estar incluídos em duas categorias principais. A seguir são apresentados alguns destes processos.

A Figura 5 é um processo de moldagem para fibra de reforço picada com a matriz em resina mais um produto de cura da mesma (JAMAL, 2009).

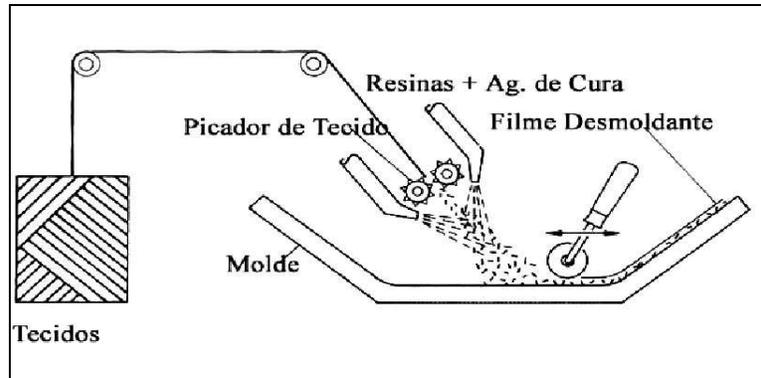
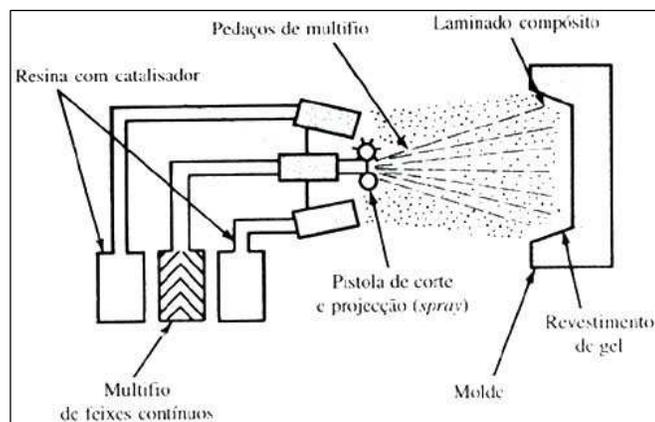


Figura 5 - Moldagem utilizando fibra picada, (JAMAL, Y. S., 2009)

A

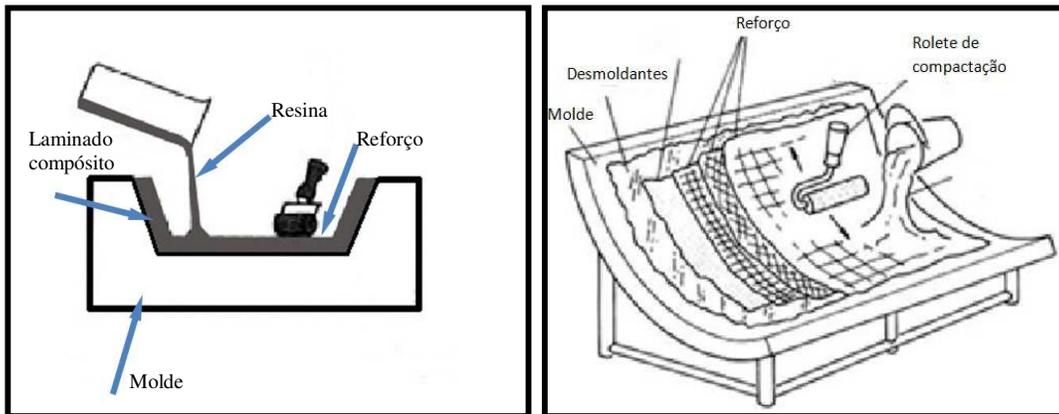
Figura 6 trata do mesmo tipo de produção de compósito utilizando apenas uma solução diferente (JAMAL, 2009).



**Figura 6 - Moldagem utilizando fibra picada (JAMAL, 2009).**

A

Figura 7 apresenta dois equipamentos utilizados para moldagem de compósitos de resina reforçada com tecidos das fibras, por laminação.



**Figura 7 - Dois tipos de equipamentos para moldagem de peças por laminação (JAMAL, 2009).**

A

Figura 8 ilustra a moldagem de materiais compósitos com reforço de fibras em equipamento que utiliza camisa de vácuo.

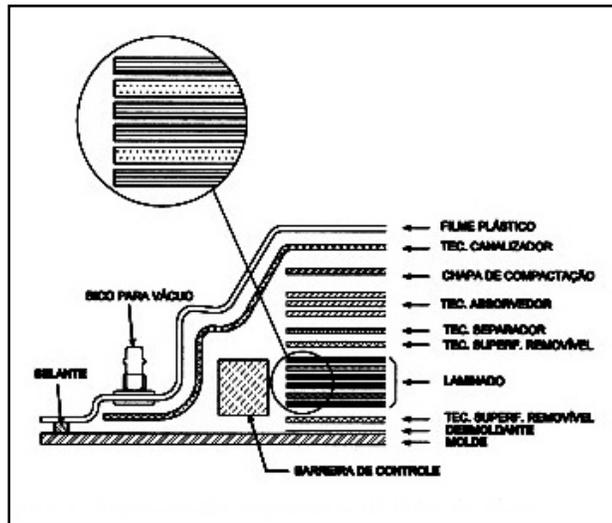


Figura 8 - Moldagem de peças por Camisa de Vácuo (JAMAL, 2009).

A Figura 9 ilustra uma máquina de Comando Numérico Computadorizado (CNC) que realiza a produção de peças realizando a bobinagem de fibras (JAMAL, 2009).

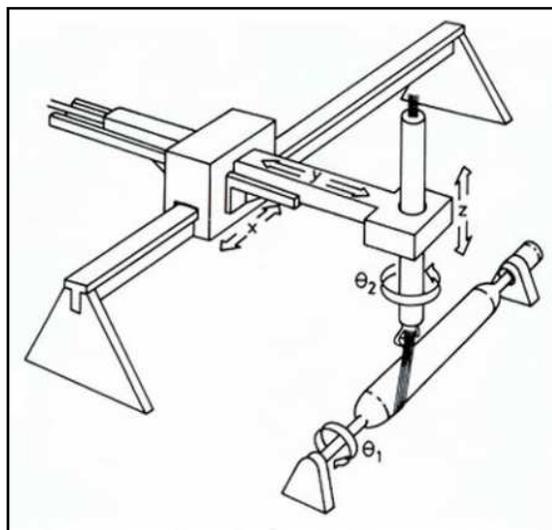


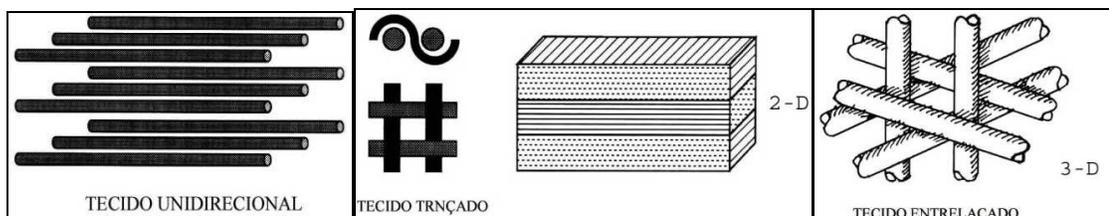
Figura 9 - Moldagem de Peças por bobinagem CNC (5 eixos) (JAMAL, 2009).

Os laminados de materiais compósitos são reconhecidos como atraentes substitutos dos materiais metálicos para diversas aplicações, sendo o setor aeroespacial um dos principais, devido às suas importantes relações resistência/peso e rigidez/peso. Dentre as fibras que são utilizadas como reforço em materiais compósitos, a fibra de Carbono se destaca devido a sua rigidez e alto módulo de Young resultante no produto onde é utilizada. A Tabela 8 destaca comparativamente as propriedades das principais fibras utilizadas como reforço.

**Tabela 8 - Propriedades mecânicas de materiais compósitos laminados (MARINUCCI, 2011).**

TIPO DE FIBRA		$\sigma$ Gpa	E GPa	$\epsilon$ (%)	$(g/cm^3)$	$\emptyset$ $\mu m$
CARBONO	1° Ger.	3, 5.	230	1, 5.	1,76	7
	2° Ger	4, 5-8.	290	1,8-2, 0	1, 80.	5 - 6
	ALTO MÓDULO	2, 5.	400	0, 5.	1, 80.	6 - 7
Vidro E		2, 5.	75	2, 5- 3, 5.	2, 55	10
Vidro S		3, 5.	85	4, 0.	2, 55.	10
POLIARAMIDA		3, 0.	125	2, 5.	1, 45.	10

A Figura 10 ilustra diversas soluções de pré-formas utilizadas na fabricação de peças de materiais compósitos reforçados com fibras.



**Figura 10 - Ilustrações de pré-formas que têm sido utilizadas (THOMAS, 2014).**

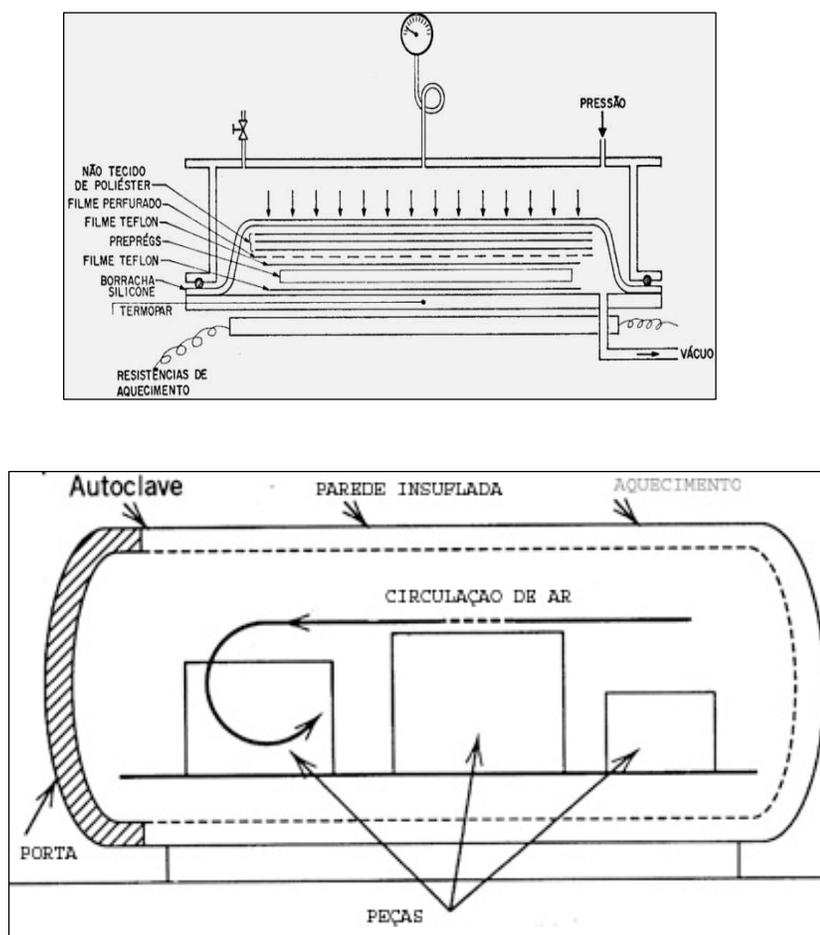
Pelo tipo de geometria e arquitetura do arranjo da fibra é possível assegurar ao compósito o desempenho dos resultados esperados. Para a fabricação de peças em materiais compósitos, onde a estrutura requer integridade estrutural livre de poros e descontinuidade para aplicações aeroespaciais e, às vezes as peças são muito grandes e de formas variadas, torna-se necessário o uso de autoclave e camisa de vácuo, conforme mostrado na Figura 11 por (REZENDE M. C., 2011).

## 2.4. DETALHES SOBRE A USINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Atualmente tem ocorrido aumento na frequência de aplicações de materiais compósitos. Apesar do processo de fabricação por moldagem ser bastante flexível com relação á geometria das peças, tem sido observado um crescimento na necessidade de uma operação posterior de usinagem. Esta providência é necessária para se conseguir uma maior precisão dimensional e de forma, e melhor acabamento superficial de peças (RAMULU, 1995).

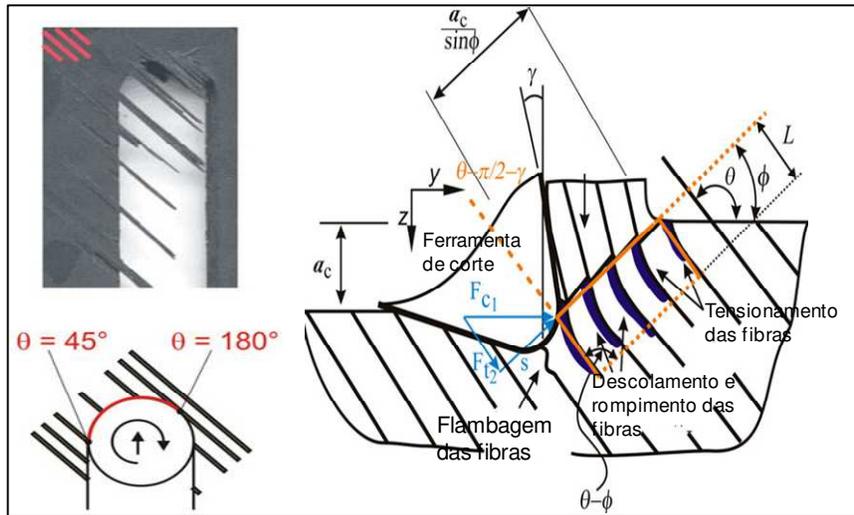
**Entretanto, na usinagem de materiais compósitos reforçados com fibras ocorre influência do processo nas superfícies usinadas em função da heterogeneidade natural desses materiais. Uma das conseqüências é a delaminação que resulta no arrancamento de fibras (HASEGAWA, 2014; TAKESHITA, 1985). Outros fatores de influência são ilustrados na**

, os quais podem levar ao comprometimento da qualidade da superfície usinada



**Figura 11 - Camisa de vácuo na parte de cima da figura e abaixo autoclave, (REZENDE, 2011).**

Na usinagem de materiais frágeis, que possuem zona plástica de formação de cavaco pequena rompem com pouca deformação plástica quando submetidos à tensão. As fases de recalque (deformações elástica e plástica), tensionamento até o cisalhamento são bem curtas, completando com a ruptura (cisalhamento) total do cavaco (não somente da peça, mas também das porções anteriores e posteriores de cavaco). Dependendo da natureza, orientação das fibras, e da geometria da ferramenta, o mecanismo de corte do compósito reforçado com fibras pode ser associado com ruptura, deformação, e cisalhamento do conjunto fibra e matriz, conforme ilustrado na



**Figura 12 - Influência do processo de usinagem na superfície usinada do material compósito à base de fibras (WOLFGANG, 2011).**

As propriedades físicas da fibra e da matriz são significativamente diferentes, as quais combinadas com as diversas orientações das fibras (Figura 13), bem como as características da interface fibra/matriz, exercem variadas influências sobre a usinabilidade dos compósitos. A fratura frágil de fibras inorgânicas como as fibras de carbono e vidro trazem dificuldades à usinagem destes compósitos e, também apresentam uma característica de corte diferente do compósito reforçado com fibras orgânicas como o Kevlar (KONIG et al., 1985).

As fibras são cortadas pela aresta da ferramenta nas direções longitudinais e transversais das mesmas, que ao mesmo tempo perdem a ligação com a matriz. As fibras não cisalhadas são deslocadas pela aresta da ferramenta provocando deformações e ou trincas na matriz (SANTHANAKRISHNAN, 2013).

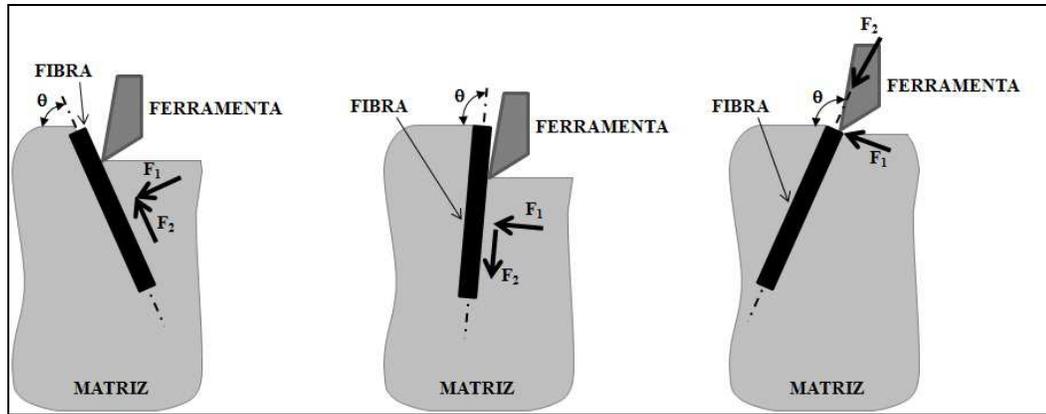


Figura 13 - Posições de corte de compósitos em relação às várias orientações das fibras (KONIG et al., 1985).

Observa-se que, com o deslizamento relativo da ferramenta (substrato) em presença de atrito e temperatura ocorre a formação de partículas duras de polímeros, provocando a adesão destes nas regiões de contato ferramenta e material usinado, conforme ilustra a Figura 14. Estas observações foram fruto de pesquisas realizadas por Stachowiak (2005) durante a usinagem de polímeros reforçados com fibras.

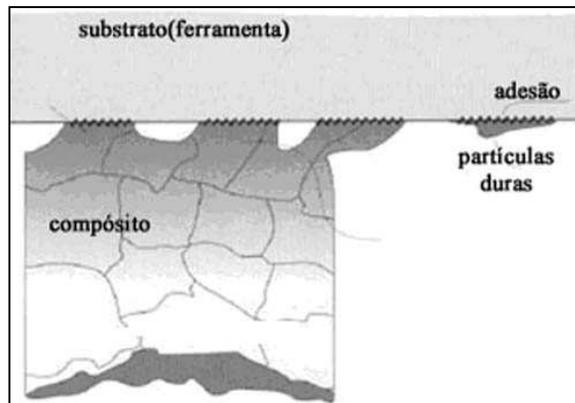


Figura 14 - Adesões de partículas do compósito na superfície da aresta da ferramenta, (Stachowiak, G. H., 2005).

A Figura 15 ilustra este comportamento típico do mecanismo de corte em compósitos reforçados com fibras, visto que as usinagens destes, apesar de ocorrer na forma de pó, as fibras tendem, geralmente, a serem tensionadas e rompidas durante a usinagem. A Figura 15 e **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** ilustram esta afirmação.

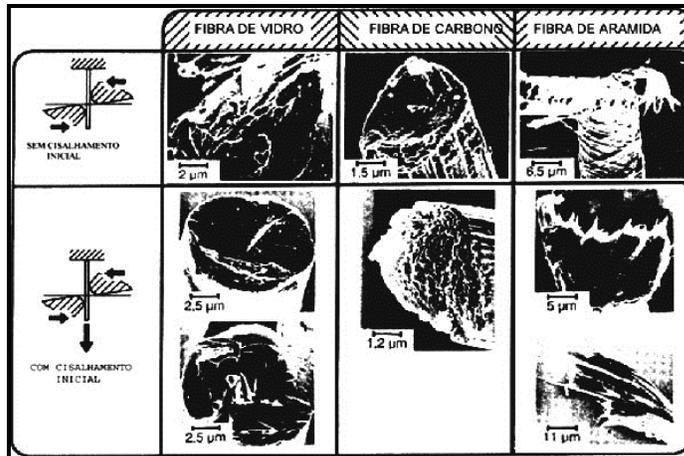


Figura 15 - Tipos de rompimento das fibras durante a usinagem (Ramulu, 2013).

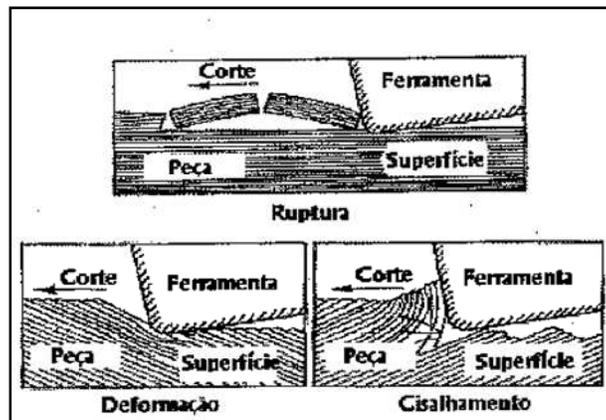


Figura 16 - Rupturas, deformação, e cisalhamento durante o corte de compósitos (RAMULU, 2013).

Segundo Wolfgang (2011) é possível visualizar as situações de corte em compósitos segundo as direções e sentidos das velocidades de corte e de avanço, conforme ilustra a Figura 17 do mesmo autor. A simples observação dos esquemas mostrados na referida figura permite relacionar os defeitos que ocorrem durante a usinagem de materiais compósitos reforçados com fibras.

Fresamento e furação são duas operações de usinagem mais frequentemente usadas em fabricação de peças de compósitos reforçados com fibras. O fresamento é principalmente utilizado em operações de contorno com a finalidade de retirada dos defeitos originários da moldagem de chapas e de estabelecimento de caracterizações dimensionais. Nestes casos, o fresamento é o cilíndrico tangencial simétrico, porém o acabamento superficial não representa

um fator restritivo do processo, mas sim as características dimensionais visando a montagem das peças fresadas. No caso de furação, o mesmo caso ocorre, pois geralmente, são realizados furos passantes para fixação (WOLFGANG, H., 2011).

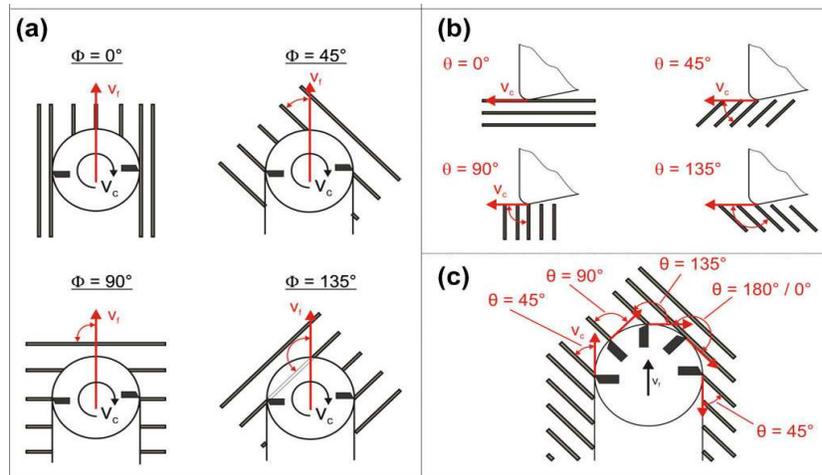


Figura 17 - Posições relativas entre a  $V_c$  e  $V_f$  em relação às fibras e, as direções de corte e avanço durante: (a) fresamento ( $0^\circ$ ); (b) fresamento ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ) e (c) fresamento com fibras em varias direções, (WOLFGANG, H., 2011).

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** foi apresentada para ilustrar o tipo e a forma do cavaco que se forma na usinagem de um material compósito reforçado com fibras.

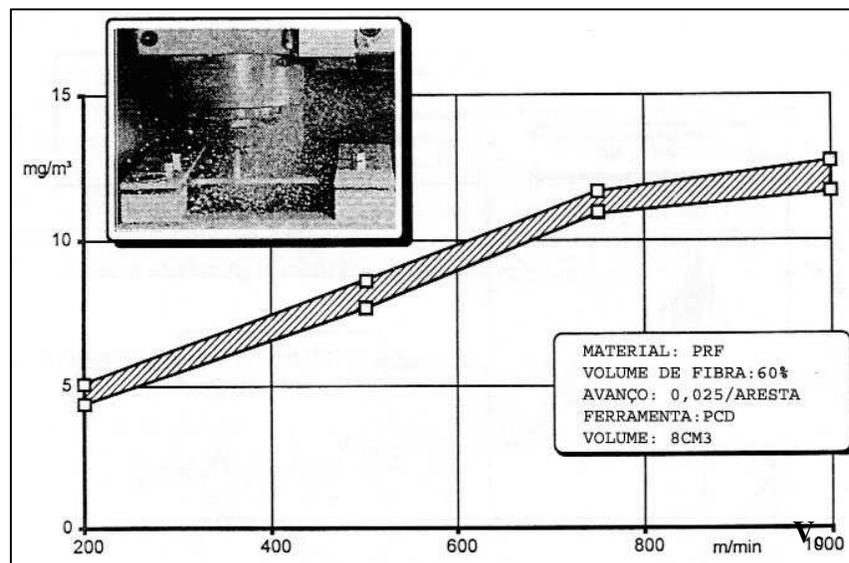


Figura 18 - Emissão de pó durante usinagem por fresamento (KLOCKE, 1996).

Durante o fresamento, rebarbas como fios de fibra sem cortar ficam expostos (HOCHENG, 1993). Cuidados especiais devem ser considerados com relação à orientação das fibras principalmente quando a ferramenta ataca a peça numa posição em que o ângulo do movimento de corte e ou avanço com a direção da fibra  $\theta$  for igual a zero. Neste caso é comum e praticamente inevitável a formação de rebarbas na peça. Uma possível explicação para este fato é que as fibras, nestes casos, estão sujeitas à falhas por dobra dificultando sua remoção.



### 3. MATERIAIS E MÉTODO

O presente trabalho segue um método de pesquisa aplicada e ou experimental realizada em ambiente de laboratório (MARCONI; LAKATOS, 1999; GIL, 2002). É aplicada no sentido de partir de dados utilizados pela Embraer visando determinar as melhores condições operacionais de usinagem por fresamento e é experimental no sentido de realizar experiências típicas de laboratório com critério científico.

Camadas de Resina Fenólica Reforçada com Fibra de Carbono (PRFC) foram utilizadas como corpos de prova para realização da usinagem e levantamento do comportamento durante fresamento cilíndrico tangencial. A

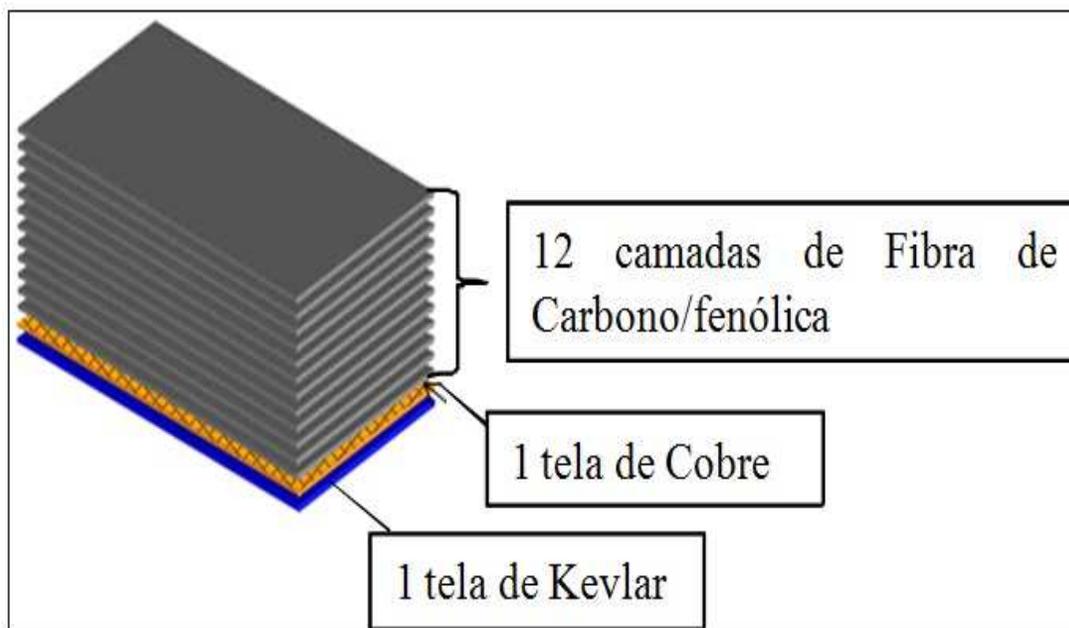
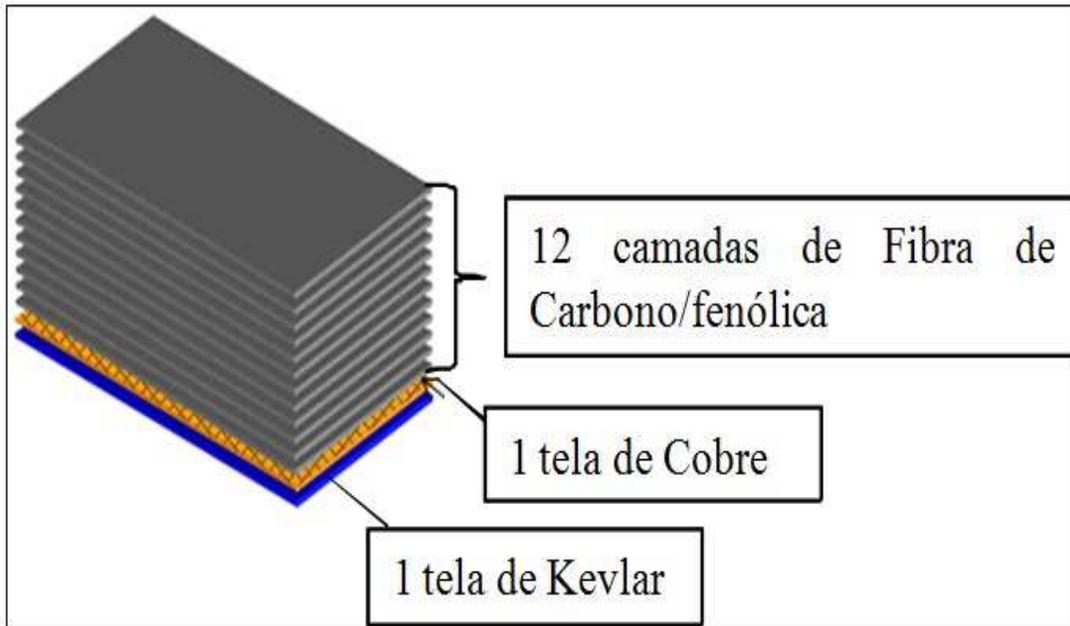


Figura 19 ilustra a formação de cada chapa: foram utilizadas 12 camadas de fibra de carbono/epóxi e uma tela de Cobre e uma última camada de Kevlar.



**Figura 19 - Camadas formadoras da chapa utilizada como corpo de prova para usinagem.**

A Tabela 9 apresenta a composição e as propriedades do material dos corpos de prova. O compósito utilizado é constituído de resina fenólica reforçada com fibra de carbono. Chapas de (900 x 600 x 4) do material compósito foram fornecidas e confeccionadas pela própria Embraer. Cada chapa foi produzida utilizando-se um tecido pré-impregnado de carbono que passou por um pré-aquecimento à temperatura de 80°C e uma pressão de compactação de 0,6 MPa para melhorar a aderência da resina à superfície da fibra com o auxílio de uma câmara de vácuo e eliminar poros.

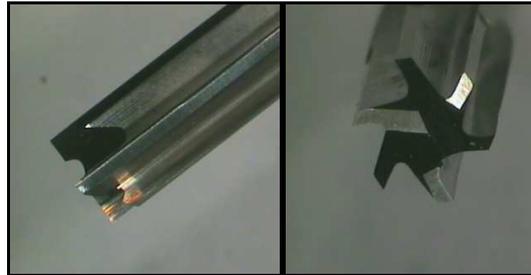
Os ensaios foram realizados visando fornecer dados para aplicações pela Embraer e CTA durante a usinagem de PRFC. Como se tratava de usinar contornos da carenagem de estruturas de componentes utilizados na montagem de aviões e peças foguete de sondagem, foi selecionada uma fresa cilíndrica de 8 mm de diâmetro com (06) arestas de corte, modelo GSR-D0800 interiça de Metal Duro WC-Co, sem cobertura classe K10, com 6% de cobalto como ligante e com estrutura de microgrãos, produzidas pela empresa inglesa CCT Tools. O diâmetro adotado visou não remover grande quantidade de material, sendo tal diâmetro mantido durante toda a experiência. A Figura 20 ilustra o corpo da fresa mencionada. A Figura 21 ilustra a parte cortante da fresa e os detalhes das cunhas cortantes da ferramenta.

**Tabela 9 - Propriedades do compósito PRFC, (Rezende, 2011).**

<b>Descrição da Matriz</b>	
Resina	Fenólica
Tipo	Resol
Solvente	Álcool etílico
Teor de sólidos	64% a 65%
Viscosidade à 20°C	480-514 Cp
<b>Pré-impregnado (Prepreg)</b>	
Tecido de fibra de carbono	Torayca cloth 6341 (Toray)
Teor de resina, % volume	38% a 42%
Teor de voláteis, % volume	3% a 6%
<b>Compósito PRFC</b>	
Densidade	1,5 a 1,6 g/cm <sup>3</sup>
Teor de resina	40% em volume
Teor de material não curado	<0,5%
Dureza	<50 shore D



**Figura 20 - Imagem da fresa cilíndrica utilizada nos ensaios.**



**Figura 21 - Detalhes das cunhas cortantes da fresa.**

A máquina utilizada nos ensaios foi um Centro de Usinagem FIDIA D165 (Figura 22) apresenta as seguintes características:

- eixos X,Y e Z com 1000, 600 e 500 mm respectivamente;
- velocidade máxima de deslocamento dos eixos lineares de 30m/min.;
- precisão de posicionamento nos eixos X,Y e Z de 0,01mm;

- mesa porta peças de 820 x 1400 mm;
- potência de 18Kw;
- rotação máxima 24000 rpm;
- porta ferramenta HSK63E.



**Figura 22 - Centro de Usinagem FIDIA D165 utilizado nos ensaios.**

**A usinagem do material compósito gera cavaco em forma de pó. É um cavaco prejudicial à máquina e à saúde das pessoas que estejam no ambiente onde os trabalhos estejam sendo realizados. Por este motivo foi utilizado um sistema de aspiração e filtro de pós, apresentado na**



Figura 23. Este sistema, existente na máquina como um acessório, leva todo o produto da usinagem para um reservatório apropriado instalado externamente ao ambiente de trabalho.



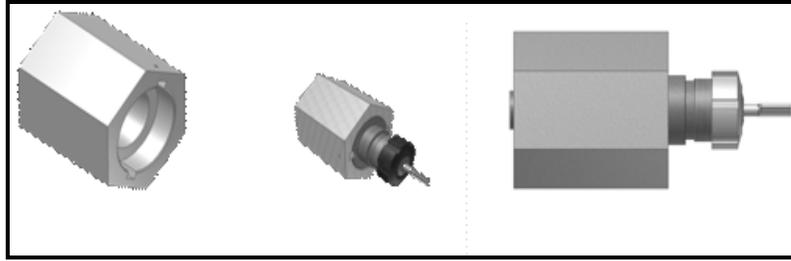
**Figura 23 - Sistema de aspiração e remoção dos pós de PRFC gerados durante a usinagem.**

Para medida do desgaste da fresa foi utilizado um microscópio Estereoscópico, marca Leica, modelo S6D, com zoom de 10x – 50x. O microscópio é apresentado na Figura 24.



**Figura 24 - Microscópio Estereoscópico Leica, modelo S6D.**

Para medida dos desgastes foi construído um dispositivo de posicionamento da fresa, visando dois aspectos: garantir o posicionamento correto de cada aresta alinhada com o foco do microscópio; diminuir o tempo de movimentação da fresa, tendo em vista que a medida dos desgastes ( $V_{Bmax.}$ ) foi sempre feita até que o número de passes fosse atingido, ou seja, a cada oito passes da ferramenta. A Figura 25 ilustra o dispositivo mencionado.



**Figura 25 - Dispositivo para medida dos desgastes da aresta de corte da fresa e facilitador da montagem e desmontagem no microscópio e na máquina a cada medida realizada.**

A termocâmara da Este equipamento foi posicionado com auxílio de tripé frontalmente ao deslocamento da velocidade de corte e focado no ponto de maior aquecimento da ferramenta em operação (distancia de posicionamento = 2m), durante o corte.

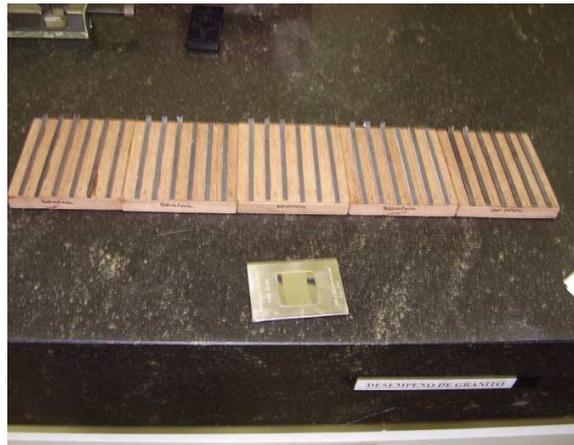
, foi utilizada para medir a temperatura da usinagem em todas as velocidades de corte testadas durante o fresamento das placas de PRFC. Este equipamento foi posicionado com auxílio de tripé frontalmente ao deslocamento da velocidade de corte e focado no ponto de maior aquecimento da ferramenta em operação (distancia de posicionamento = 2m), durante o corte.



**Figura 26 - Termo-câmara utilizada para medir a temperatura de corte.**

A medida das resultantes dos esforços de corte nas três direções de fresamento foi realizada por meio da utilização do Dinamômetro Kistler Tipo 9257BA, cabo 9403, amplificador 5233A1, gentilmente fornecido pelo Departamento de Engenharia de Fabricação da FEM/UNICAMP.

Para medida de rugosidade das superfícies usinadas foram preparados os dispositivos mostrados na Figura 27. Tiras das placas de PRFC, cujas superfícies haviam sido usinadas nas diferentes condições operacionais, foram cortadas e montadas em ranhuras previamente construídas em suportes de madeira. Estes dispositivos foram construídos para garantir a fixação sobre o barramento especificamente utilizado para este fim, conforme mostrado na Figura 28.



**Figura 27 - Dispositivos especialmente construídos para permitir a medida da rugosidade das superfícies fresadas.**



**Figura 28 - Sistema especialmente montado para realização das medidas da rugosidade das superfícies fresadas.**

Foram realizados seis ensaios de medida da rugosidade após execução dos fresamentos realizados e cdp obtidos para a combinação das seis velocidades de corte e dos dois avanços utilizados.

A Figura 28 ilustra a fixação do dispositivo com as tiras de PRFC montado sobre o barramento para garantir o posicionamento das mesmas com relação ao apalpador do rugosímetro.

Os ensaios foram desenvolvidos no Centro de Competência de Manufatura (CCM) do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, local onde estava instalada a Máquina Fídia.

Num primeiro conjunto de experiências foram utilizadas as seguintes condições operacionais:

- velocidade de corte de 100 m/min.;
- avanço 0,075 mm/volta/dente;
- profundidade de usinagem de 4 mm (espessura da placa);
- penetração de trabalho de 8 mm (diâmetro da fresa);
- operação de fresamento cilíndrico simétrico (de rasgo);
- cada curso da ferramenta teve-se um percurso de avanço de 600 mm;
- medida dos desgastes de 8 em 8 percursos de avanços efetuados;
- critério de vida: desgaste de flanco  $V_{Bmax}$  de 0,3 mm.

Durante este ensaio foi medida a temperatura de corte utilizando-se a termo-câmera da Este equipamento foi posicionado com auxílio de tripé frontalmente ao deslocamento da velocidade de corte e focado no ponto de maior aquecimento da ferramenta em operação (distancia de posicionamento = 2m), durante o corte.

Num segundo conjunto de experiências foram utilizadas as velocidades de corte de 200, 300, 400, 500 e 600 m/min. Estas velocidades de corte foram possíveis de serem adotadas porque a máquina tinha rotações disponíveis para tanto. Para todas as velocidades de corte foram medidas as temperaturas de corte. Todos os demais parâmetros de corte e procedimentos foram mantidos iguais ao primeiro conjunto de experiências.

No terceiro conjunto de experiências foi avaliada a influência da velocidade de corte e do avanço na rugosidade( $R_a$ ) das superfícies usinadas no compósito PRFC. Nos testes de velocidade

de corte ( $V_c = 100, 200, 300, 400, 500$  e  $600$  mm/min. utilizou-se ferramentas de metal duro K10, mantendo-se constantes  $f = 0,075$  mm/v e  $a_p =$  espessura da peça = 4mm.

#### **4. ASES TEÓRICAS UTILIZADAS NO TRABALHO**

Neste capítulo são apresentadas as bases para análise dos resultados e que já são consagradas pela literatura sobre o processo de usinagem por fresamento.

##### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DO FRESAMENTO CILÍNDRICO TANGENCIAL**

O fresamento é uma operação de usinagem que é realizada por uma ferramenta denominada Fresa que, geralmente utiliza uma máquina denominada Fresadora (convencional) ou por um Centro de Usinagem (CNC).

O movimento de corte ocorre com a rotação da fresa em torno do seu eixo e a velocidade de corte é tangencial a um ponto escolhido sobre uma qualquer aresta de corte. Esta é o vetor que caracteriza a rapidez com que o processo de fresamento ocorre. O movimento de avanço, cuja rapidez de deslocamento é dada pela velocidade de avanço, é perpendicular ao eixo da fresa. Geralmente o movimento de avanço é dado pelo movimento da mesa da máquina.

Existem diversos tipos de operações de fresamento. As suas denominações acompanham a parte da fresa que entra em contato com a peça bem como a sua posição relativa com relação à mesma. Neste trabalho o foco é a operação de fresamento cilíndrico tangencial.

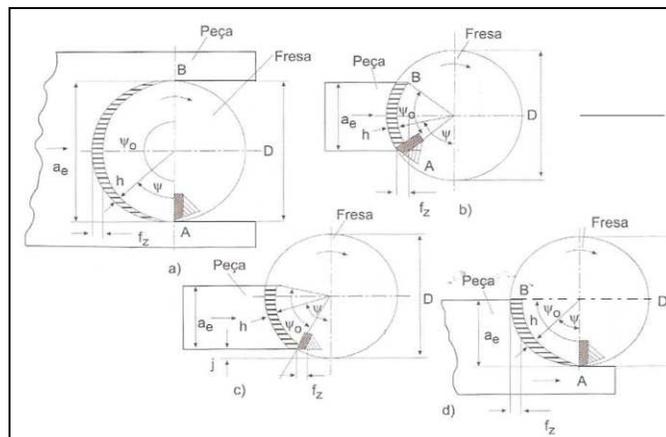
A Figura 29 ilustra uma operação de fresamento, utilizando uma fresa que pode cortar com o seu topo (fresa de topo ou frontal), mas pode também trabalhar exclusivamente com as arestas de corte distribuídas ao redor de seu eixo (fresamento cilíndrico tangencial). Estas últimas podem apresentar dentes retos (paralelos ao eixo da fresa) ou helicoidais. As fresas helicoidais apresentam maior suavidade durante a usinagem, pois os dentes penetram gradativamente na peça e não em toda a extensão da aresta de corte como ocorre com as fresas de dentes retos. O resultado final da usinagem é uma superfície com rugosidade menor.

A Figura 30 permite identificar diversas operações que podem ser realizadas com uma fresa cilíndrica tangencial. Especial destaque deve ser feito para a Figura 30(a). Esta operação foi exatamente a realizada neste trabalho. É uma operação denominada de fresamento cilíndrico

tangencial de simétrico de rasgo. Cada dente da fresa inicia o corte com uma espessura de corte zero e termina igualmente com espessura de corte zero, passando por um valor máximo igual ao avanço da fresa.



**Figura 29 - Operação de fresamento com uma fresa atuando como fresa de topo e cilíndrica tangencial com dentes helicoidais. (Diniz et al., 2013).**



**Figura 30 - Operação de usinagem que podem ser desenvolvidas com uma fresa cilíndrica tangencial. a) (Fresamento simétrico de rasgo; b) Fresamento simétrico; c) Fresamento assimétrico em toda a largura da peça; d) Fresamento assimétrico. Adaptada de (Diniz et al., 2013).**

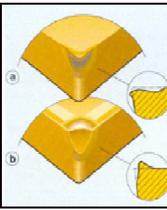
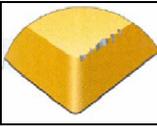
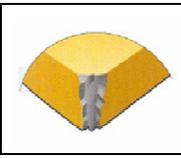
## 4.2 AVARIAS E DESGASTES EM FERRAMENTAS DE FRESAMENTO

De uma maneira geral, qualquer ferramenta de usinagem estará sujeita às seguintes ocorrências:

### 4.2.1 AVARIAS

São danos acidentais que ocorrem com a cunha cortante da ferramenta e/ou com sua aresta de corte. Uma avaria sempre pode ser detectada e é possível identificação de novas condições para evitar que elas ocorram. A Tabela 10 resume as avarias que podem ocorrer em ferramentas de usinagem, como diagnosticá-las, como evitá-las e o quanto podem estar presentes em operações de fresamento.

**Tabela 10 - Avarias e suas implicações para o processo de fresamento.**

AVARIA	ILUSTRAÇÕES	DIAGNÓSTICO	COMO EVITAR	INCIDÊNCIA PARA O FRESAMENTO
Microtrincas devido à variação intermitente de temperatura (**)		As microtrincas são aproximadamente perpendiculares à aresta. Ferramenta quebra prematuramente. Para diagnosticar é necessário observar a ferramenta antes da quebra em microscópio	Adequar a forma pela qual o fluido de corte está sendo aplicado ou cortar sem fluido de corte	ALTA (por causa da possibilidade de variação da temperatura com frequência alta)
Microtrincas devido à variação dos esforços de corte (**)		As microtrincas são aproximadamente paralelas à aresta. Ferramenta quebra prematuramente. Para diagnosticar é necessário observar a ferramenta antes da quebra em microscópio	Reduzir os esforços de corte e sanar fontes de vibração do sistema máquina, ferramenta, dispositivos de fixação e peça	ALTA (por causa da possibilidade de variação dos esforços de corte com frequência alta)
Deformação plástica da cunha da ferramenta (*)		Perda das dimensões iniciais.	Redução da velocidade e dos esforços de corte. Utilizar material de ferramenta de dureza elevada	BAIXA (geralmente o avanço por dente é pequeno e a profundidade de usinagem alta distribui os esforços ao longo da aresta de corte)
Quebra da aresta de corte ou micro lascas (*)		Quebra prematura da ferramenta. Surge devido à presença de incrustações duras geralmente presente no material da peça, principalmente quando o material da ferramenta não está adequado	Utilizar material da ferramenta mais tenaz e verificar a possibilidade de desenvolver junto ao fornecedor do material da peça sem incrustações duras	BAIXA (depende do material da peça)
Quebra ou queima da cunha cortante da ferramenta (*)		Perda massiva e prematura do material da ferramenta na ponta da sua cunha. Ocorre devido à choques mecânicos e ou velocidade de corte muito alta e ou como consequência de outra avaria ou desgaste exagerados	Reduzir velocidade de corte e ou realizar alívio no momento do início do corte.	Em fresamento é importante avaliar a entrada e a saída dos dentes quando o corte for frontal assimétrico

(\*)Sandvik Coromant do Brasil ([www.sandvik.com](http://www.sandvik.com)) em 10/2013.

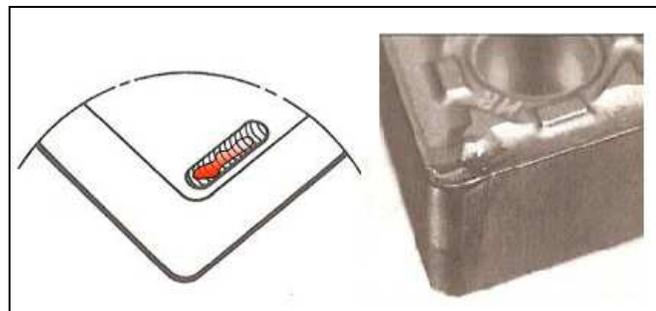
(\*\*)(Diniz et al., 2013).

#### 4.2.2 DESGASTES

Devido ao uso, a ferramenta vai perdendo, paulatinamente, porções microscópicas de seu material. O fenômeno pode ocorrer na superfície de folga da ferramenta e é denominado de Desgaste de Flanco (Figura 31). Poderá ocorrer na superfície de saída, e então, é denominado de Desgaste de Cratera (Figura 32).



**Figura 31 - Ilustrações do desgaste de flanco (a) e dos desgastes de entalhe (b) e (c). Fotos de insertos com os desgastes mencionados. (Diniz et al., 2013).**



**Figura 32 - Ilustração do desgaste de cratera e foto de inserto com o desgaste de cratera (Diniz et al., 2013).**

Nas regiões extremas da aresta principal e lateral de corte, onde o ar ou fluído de corte, o material da peça e o material da ferramenta estão presentes, ocorre uma intensificação do desgaste que é denominado de desgaste de entalhe (Figura 31).

#### 4.2.3 MECANISMOS DE DESGASTE

À semelhança do que foi apresentado para as avarias, a Tabela 11 e Tabela 12 resumem os mecanismos de desgastes que, de forma diferenciada para cada situação, incidem nas ferramentas durante a usinagem. Os desgastes, não são possíveis de serem evitados. É possível procurar amenizar o efeito de cada mecanismo de desgaste. Por este motivo, diz-se que os desgastes podem ser controlados, porém, nunca evitados. As Tabela 11 e Tabela 12 resumem os mecanismos de desgastes, como diagnosticá-los, como controlá-los e o quando podem estar mais ou menos presentes em operações de fresamento.

**Tabela 11 - Mecanismos de desgaste e suas implicações para o processo de fresamento (BUDINSKI, 1988).**

MECANISMO	ILUSTRAÇÕES	DIAGNÓSTICO MOTIVO	COMO CONTROLAR	INCIDÊNCIA
Abrasão Mecânica <sup>(1)</sup>		Ausência de material da ferramenta com superfície remanescente polida. Presença de partículas duras no material da peça e ou temperaturas elevadas. Devido ao movimento relativo entre ferramenta/peça e ferramenta/cavaco ocorrem deformações plásticas cisalhantes incentivadas pelos esforços de corte existentes.	Maior a dureza a quente da ferramenta Menores velocidades de corte	Presente
Desgaste com presença de Aresta Postiça de Corte <sup>(1)</sup>		O acabamento superficial da peça e a forma inclinada do desgaste de flanco denuncia a presença da APC.  Material da peça fica soldado na superfície de saída da ferramenta. A medida que o processo se inicia a afinidade entre o material da peça e a APC aumenta e esta cresce ainda mais. Por ficar encruado e endurecido o material substitui a aresta de corte original. Ocorre para velocidades de corte/temperaturas mais baixas e desaparece quando estas aumentam	Evitar a faixa de velocidades que provoca a presença da APC, que é a temperatura de recristalização do material da peça	Pode estar presente se não for evitada a faixa de velocidade típica de sua ocorrência

<sup>(1)</sup> AB Sandvik Coromant (2008).

A Figura 33 ilustra de forma aproximada as faixas em que os mecanismos de desgastes são mais incidentes. Esta forma de analisar os desgastes resulta numa poderosa ferramenta de controle dos desgastes.

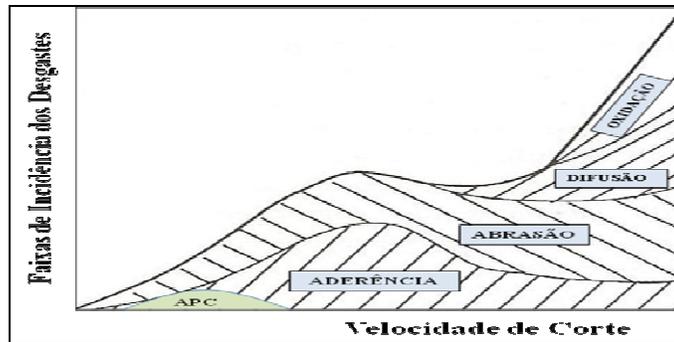
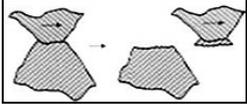
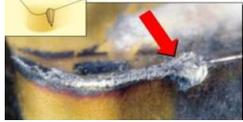


Figura 33 - Faixas de incidência dos mecanismos de desgastes de acordo com a variação da velocidade de corte. Adaptado de: <http://www.moldesinjecaoplasticos.com.br/avarias.asp> novembro de 2013.

Tabela 12 - Mecanismos de desgaste e suas implicações para o processo de fresamento (BUDINSKI, 1988).

MECANISMO	ILUSTRAÇÕES	DIAGNÓSTICO MOTIVO	COMO CONTROLAR	INCIDÊNCIA
Aderência <sup>(2)</sup>		Picos de rugosidade entre a ferramenta/peça e principalmente entre ferramenta/cavaco se soldam (aderem) em presença dos esforços de corte e temperaturas presentes. Estas soldas ocorrem durante a fração muito pequena do tempo em que não ocorre movimento entre as partes, pois, o cavaco está se deformando. Como o movimento volta a ocorrer tem-se a ruptura em uma das partes. Pode levar a formação da APC, mas independe de sua ocorrência	Difícil controle, mas a presença de fluidos com característica lubrificante pode auxiliar	Presente
Oxidação <sup>(1)</sup>		A presença de desgaste de entalhe é um indicador de que está ocorrendo oxidação do material da ferramenta. Isto ocorre, porque justamente nesta região, quando a temperatura é muito alta, é criada condições ideais para que o oxigênio do ar reaja com elementos químicos mais suscetíveis do material da ferramenta.	Presença de fluido de corte ou quando muito grave, utilizar fluido de corte gasoso e inerte, como, por exemplo o Argônio	Rara

Difusão <sup>(1)</sup>		<p>É difícil de ser diagnosticada. Resulta em degradação do material da ferramenta devido à migração de átomos do material da peça que reagem com material da ferramenta e vice-versa. As partes degradadas do material da ferramenta são facilmente destacados e então, a difusão fica mascarada pela abrasão. Este mecanismo é consequência da temperatura elevada e presença de material da peça aderido à ferramenta</p>	<p>Fluído de corte gasoso inerte. Quando a velocidade de corte for mantida alta. Diminuição da temperatura com diminuição da velocidade de corte e presença de fluído de ação parcialmente lubrificante</p>	Presente
------------------------	---	--	---	----------

<sup>(1)</sup> AB Sandvik Coromant (2008).

#### 4.2.4 VIDA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

O tempo efetivo que uma ferramenta de usinagem trabalha, descontados os tempos passivos, entre o estado de nova até ser substituída, segundo um pré-determinado critério é denominado de Vida. Além do tempo a vida pode também ser expressa pelo percurso de avanço, ou percurso de corte realizado.

O critério de fim de vida é fundamental de ser adotado e tanto pode basear-se diretamente aos desgastes, como pode ser baseado em fatores indiretamente ligados aos desgastes, como por exemplo: acabamento superficial da peça, sua tolerância dimensional, variação dos esforços de corte, etc.

No início dos anos 1900 Taylor (1911) propôs uma equação para cálculo de vida de ferramentas que tem sido utilizada até os dias atuais. Apesar de ter ocorrido algumas contribuições que foram propostas mais recentemente, a Equação 1, tal como foi inicialmente proposta, tem sido utilizada até hoje.

$$T = K \cdot v_c^{-x} \quad (1)$$

onde:

$T$  = vida da ferramenta [min];

$K$  e  $x$  = coeficientes da equação de Taylor;

$v_c$  = velocidade de corte.

O valor de  $x$  representa o quanto a aresta de corte da ferramenta é sensível com relação à velocidade de corte ao usinar um dado material. Assim, quando o valor de  $x$  for grande, pode-se inferir que o material agride mais significativamente a aresta de corte provocando desgastes mais importantes em menor tempo e vice-versa. O valor de  $K$  pode ser pensado como sendo a vida específica para o par ferramenta/peça, pois, a vida da aresta é igual a  $K$  quando a velocidade de corte for igual a 1 m/min.

#### **4.2.5 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE**

Tradicionalmente a seleção e especificação de ferramentas são realizadas a partir das recomendações de fabricantes de ferramentas. Para tanto, tais empresas apresentam catálogos através dos quais é possível selecionar:

- o mais indicado material da ferramenta para usinagem de um dado material de peça;
- o mais indicado suporte de ferramenta para uma dada geometria, uma dada dimensão e propriedades mecânicas e estruturais da peça – para ferramentas inteiriças valem as mesmas características, porém não são selecionados os suportes e sim diretamente as ferramentas;
- o mais indicado inserto que esteja geometricamente compatível com o suporte selecionado;
- as condições operacionais em termos de avanço, profundidade de usinagem e velocidade de corte – o avanço e a profundidade de usinagem, são selecionados a partir da geometria relativa entre a ferramenta e a peça, bem como do tipo de operação a ser realizada (desbaste pesado, desbaste leve, semi-acabamento, acabamento e acabamento fino) e das restrições da máquina em termos de esforços e potência. A velocidade de corte é recomendada a partir de dados acumulados pelo fabricante da ferramenta.

Observa-se do exposto anteriormente que a velocidade de corte é o único fator que exige maior atenção no sentido de ser otimizada, pois, os demais parâmetros podem ser otimizados fundamentalmente através de análise cuidadosa dos aspectos característicos do sistema máquina, ferramenta e peça.

O conhecimento dos coeficientes da equação de Taylor apresentados no item 4.2.4 abre a possibilidade de ser formulado um procedimento para determinação da melhor velocidade de corte. Este procedimento consiste em, partir do momento que a vida da ferramenta tem a

possibilidade de ser incluída no cálculo da velocidade para maior produção ou para o menor custo do processo, como visto adiante.

Assim, a Equação 2 resume todos os tempos envolvidos na fabricação de uma peça.

$$t_t = t_{pass} + \frac{\pi \times d \times l_f}{1000 \times f \times v_c} + \left[ \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \right] \cdot t_{tf} \quad (2)$$

onde:

$t_t$  = tempo total de fabricação por peça (min)

$t_{pass}$  = tempos passivos ocorridos durante o processo [min] – tempos independentes da velocidade de corte;

$d$  = diâmetro da peça ou da ferramenta [mm];

$l_f$  = percurso de avanço [mm];

$f$  = avanço por rotação [mm]

$K$  e  $x$  = coeficientes da equação de Taylor;

$t_{tf}$  = tempo de troca da aresta de corte da ferramenta.

A derivada  $d(t_t)/d(v_c)$  igual a zero, dá o valor da velocidade de máxima produção  $v_{cmax}$ , conforme Equação 3.

$$v_{cmax} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \times t_{tf}}} \quad (3)$$

Observa-se que o valor da velocidade de corte de máxima produção depende exclusivamente dos coeficientes da equação de Taylor e do tempo de troca da aresta de corte da ferramenta.

Outra observação que deve ser feita é que a velocidade de corte de máxima produção irá assumindo valores extremamente altos à medida que o tempo de troca da aresta de corte for tendendo a valores muito pequenos. Com a existência de máquinas cada vez mais flexíveis e também com a existência de dispositivos de troca rápida de ferramentas, a velocidade de máxima produção provavelmente resultará maior que a velocidade máxima da máquina. Assim, quando as restrições do sistema permitirem, uma velocidade segura e próxima da velocidade da máxima da máquina, poderá ser a considerada a de máxima produção. Para ser segura tal velocidade deve ser testada na prática do processo.

Entretanto, ainda existem situações em que o valor do tempo de troca combinado com os coeficientes da equação de Taylor, venha resultar em velocidades de corte de máxima produção inferiores à máxima da máquina.

A Equação 4 resume todos os custos envolvidos na fabricação de uma peça.

$$C_p = t_{pass} \cdot (S_h + S_m) + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} (S_h + S_m) + \left[ \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \right] \left( C_a + \frac{t_{ff}}{60} \cdot (S_h + S_m) \right) \quad (4)$$

onde:

$C_p$  = custo de fabricação por peça [R\$];

$S_h$  = salário homem mais encargos [R\$/h];

$S_m$  = salário máquina [R\$/h];

$C_a$  = custo da aresta de corte (insertos) – custo da ferramenta (inteiriça)

O valor de  $S_m$  é sugerido de ser calculado pela Equação 5. O Salário Máquina é um valor adotado pelas indústrias por procedimentos diferentes.

$$S_m = \frac{1}{H} \left[ \left( C_{ai} - C_{ai} \frac{I_{maq}}{T_{maq}} \right) \times j + \frac{C_{ai}}{T_{maq}} + C_{cm} + (E_{maq} \times C_{m3} \times j) + C_{div} \right] \quad (5)$$

onde:

$H$  = número de horas previstas de trabalho por ano;

$C_{ai}$  = custo inicial de aquisição da máquina [R\$];

$I_{maq}$  = Idade da máquina (ano fracionado em meses – ex: 2,3 = dois anos e três décimos de ano);

$T_{maq}$  = vida prevista da máquina [ano]

$j$  = taxa anual de juros

$C_{cm}$  = custo anual previsto ou custo médio projetado dos últimos três anos visando a conservação da máquina

$E_{maq}$  = Espaço ocupado pela máquina [m<sup>3</sup>]

$C_{m3}$  = Custo médio anual do metro cúbico [R\$/m<sup>3</sup>]

$C_{div}$  = Custo anual previsto ou custo médio projetado dos últimos três anos de ferramental inventariado e de outros produtos eventuais, tais como fluido de corte, energia elétrica, lubrificantes, materiais de limpeza, ferramentas inteiriças, suporte de ferramentas intercambiáveis e outros. Este custo deve ser rateado entre as máquinas de usinagem existentes. Alternativamente, este custo pode ser lançado em material de consumo e não ser alocado como custo referente ao

processo e às máquinas de usinagem. Esta é uma opção que deve ser tomada pelo setor de contabilidade da empresa.

O desenvolvimento de máquinas flexíveis e de dispositivos de troca rápida também influenciou o cálculo dos custos de fabricação por peça. Desta forma, segundo Baptista e Coppini, (2007), quando o tempo de troca da aresta de corte ou da ferramenta for muito pequeno pode-se definir o “custo limite de fabricação por peça” que é dado pela Equação 6.

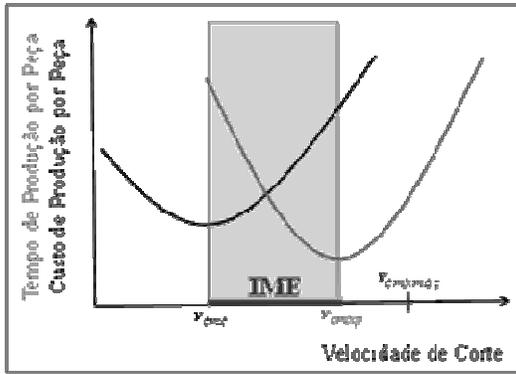
$$C_{p\min} = t_{pass} \cdot (S_h + S_m) + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} (S_h + S_m) + \left[ (C_a) \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \right] \quad (6)$$

As derivadas de Cp e de Cpmin resultam nas Equações 7 e 8. A primeira é a equação que calcula a velocidade de mínimo custo e a segunda é a que calcula a velocidade de mínimo custo limite. Esta é assim chamada por representar o maior valor da velocidade de corte de mínimo custo quando o tempo de troca da aresta tende a zero.

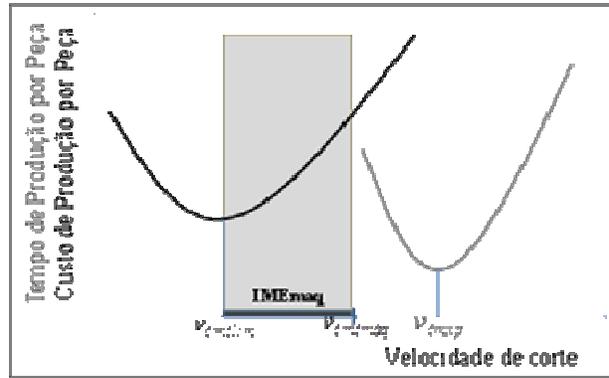
$$v_{cmc} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot \left( C_a + \frac{t_{ff}}{60} \cdot (S_h + S_m) \right)}} \quad (7)$$

$$v_{cmclim} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot C_a}} \quad (8)$$

Assim, quando o tempo de troca da aresta de corte da ferramenta for grande o suficiente para não poder ser considerado como sendo zero ou como sendo um valor desprezível, ocorrerão provavelmente valores da velocidade de máxima produção menores e que poderão ser menores que a velocidade máxima da máquina. Desta forma, existirá um intervalo entre estas duas velocidades que foi denominado de IME (Intervalo de Máxima Eficiência). Entretanto, quando o oposto ocorrer, o novo Intervalo de Máxima Eficiência será aquele entre a velocidade de mínimo custo limite e a velocidade máxima da máquina, que seja segura IMEmaq (Intervalo de Máxima Eficiência da Máquina). A Figura 34 e Figura 35 ilustram as afirmações acima.



**Figura 34 - IME – Intervalo de Máxima Eficiência.**



**Figura 35 - IME<sub>maq</sub> – Intervalo de Máxima Eficiência da Máquina.**

#### 4.2.6 FORÇA E POTÊNCIA INSTANTÂNEA DE CORTE NO FRESAMENTO

Segundo (Diniz et al., 2013), a força principal de corte  $F_c$  [N] em usinagem, de uma maneira geral, pode ser dada pela Equação 9.

$$F_c = K_{s1} \cdot b \cdot h^{(1-z)} \quad (9)$$

onde:

$K_{s1}$  e  $(1-z)$  são os coeficientes da equação do cálculo da força de corte em usinagem proposta por Kienzle, cujos valores devem ser determinados para as unidades de medidas das demais grandezas utilizadas nas equações;

$b$  = é largura de corte [mm];

$h$  = é a espessura de corte [mm].

Para o caso de fresamento cilíndrico tangencial com dentes retos, que é o caso pesquisado neste trabalho, a mesma equação pode ser escrita conforme a Equação 10.

$$F_{czi} = K_{s1} \cdot b \cdot (f_z \cdot \text{sen} \psi_i)^{(1-z)} \quad (10)$$

onde:

$F_{czi}$  = força de corte instantânea para o  $i$ -ésimo dente da fresa [N];

$b$  = profundidade de usinagem [mm];

$f_z$  = avanço por dente da fresa [mm];

$\psi_i$  = ângulo de posição do  $i$ -ésimo dente da fresa (Figura 30).

A força total instantânea de corte  $F_{ct}$  [N] pode assim, ser dada pela Equação 11, como segue:

$$F_{tc} = \sum_{i=1}^n (F_{czi}) = \sum_{i=1}^n (K_{s1} \cdot a_p \cdot (f_z \cdot \text{sen } \psi_i)^{(1-z)}) \quad (11)$$

onde

$n$  = é o número de dentes que estão simultaneamente em contato com a peça produzindo cavaco.

A potência total instantânea de corte  $P_{tc}$  [kW] fica dada pela Equação 12., conforme a seguir:

$$P_{tc} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(F_{czi} \cdot v_c)}{60 \cdot 10^3} \right] = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(K_{s1} \cdot a_p \cdot (f_z \cdot \text{sen } \psi_i)^{(1-z)} \cdot v_c)}{60 \cdot 10^3} \right] \quad (12)$$

onde:

$v_c$  = é a velocidade de corte [m/min].

#### 4.2.7 FORÇA E POTÊNCIA MÉDIA DE CORTE NO FRESAMENTO

Segundo (Diniz et al., 2013) e particularizando a base teórica para o fresamento tangencial analisado neste trabalho a força média de corte  $F_{cm}$  [N] pode ser calculada conforme a Equação 13.

$$F_{cm} = K_{sm} \cdot b \cdot h_m \quad (13)$$

onde:

$h_m$  = espessura de corte [mm];

$a_p$  = profundidade de usinagem [mm].

O valor de  $K_{sm}$  (“pressão específica de corte média”) é dado pela Equação 14.

$$K_{sm} = K_w \cdot h_m^{-w} = \frac{F_{cm}}{a_p \times f} \quad (14)$$

Este procedimento leva ao valor médio da força e da potência de corte no fresamento, e o valor de  $h_m$  representa a espessura média de cavaco removido por um dente durante o

fresamento.  $h_m$  pode ser calculado com base no teorema do valor médio que resulta na Equação 15.

$$h_m = \frac{1}{\psi_0} f_z (1 - \cos \psi_0) \quad (15)$$

Na Figura 30,  $\psi_0 = 2\pi$  é o ângulo de contato entre o dente da fresa e a peça. Então, finalmente  $h_m$  é dada pela Equação 16.

$$h_m = \frac{2 f_z}{\pi} \quad (16)$$

A Tabela 13 apresenta exemplos de valores de  $w$  e  $K_w$  para aços carbonos.

A potência média de corte por dente da fresa  $P_{cm}$  (kW), pode então ser calculada pela Equação 17.

$$P_{cm} = \frac{K_{sm} \cdot a_p \cdot a_e \cdot v_f}{60 \cdot 10^6} \quad (17)$$

onde:

$v_f$  = velocidade de avanço [mm/min].

**Tabela 13 - Exemplo dos valores de  $K_w$  e  $w$  para aços carbono (Coppini et al., 2013). Valores determinados para unidades [N e [mm].**

Material da Peça		$K_w$	$w$	Dureza Brinell (HB)
Aço (% Carbono)	0,10 a 0,25	1500	0,25	125
	0,25 a 0,55	1600		150
	0,55 a 0,80	1700		170
Fofa cinzento	Alta resistência	1100	0,28	245
	Baixa resistência	900	0,28	180

Entretanto, a potência média de corte, em (kW) por dente da fresa pode também ser calculada pela Equação 18:

$$P_{cm} = \frac{F_{cm} \cdot v_c}{60 \cdot 10^6} \quad (18)$$

onde:

$F_{cm}$  = força média em um dente da fresa [N];

$v_c$  = velocidade de corte da fresa [m/min].

A força média de corte  $F_{cm}$ , é calculada com base na Equação 13 e resulta na Equação 19.

$$F_{cm} = K_w \cdot a_p \cdot h_m^{1-w} \quad (19)$$

#### 4.2.8 RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIE FRESADA

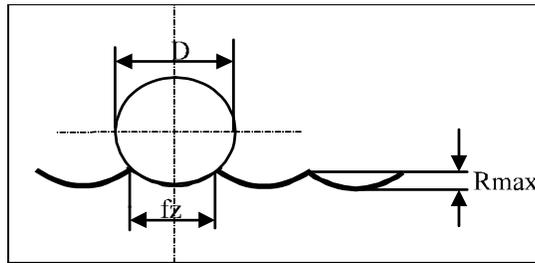
A Figura 36 ilustra como é gerada a superfície teórica fresada. A rugosidade máxima  $R_{max\text{teor}}$  medida em [ $\mu\text{m}$ ] é calculada pela Equação 20.

$$R_{\max\text{teor}} = \frac{f_z^2}{4D} \quad (20)$$

onde:

$f_z$  = é o avanço por dente [mm];

$D$  = é o diâmetro da fresa [mm].



**Figura 36 - Rugosidade máxima teórica gerada pela fresa cilíndrica (Diniz et al., 1999).**

A superfície máxima teórica é muito difícil de repetir na prática, pois, existe a influência de vários outros fatores comuns que podem ocorrer. Como exemplo pode-se citar vibrações do sistema máquina, ferramenta e peça, desgastes da ferramenta, etc. (Shaw, 1986).

### 4.3 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÍNIMO DE AMOSTRA

Algumas definições utilizadas em Estatística:

- **População** consiste em um conjunto de indivíduos que compartilham de pelo menos uma característica comum;
- **Amostra** é um pequeno grupo de indivíduos retirados da população, (LEVIN, 1987);
- **Amostragem** é resultado da escolha dos indivíduos que pertencerão a uma amostra;
- **Métodos de Amostragem Probabilísticos** são os que selecionam os indivíduos da população de forma que todos tenham as mesmas chances de participar da amostra. A amostra não representa perfeitamente uma população;
- **Erro Amostral** ocorre a partir do momento que se aceita utilizar uma amostra para representar uma população; o erro amostral ocorre quando se utiliza um instrumento com defeito, ou se elabora um questionário para pesquisa de campo tendencioso, etc.. Triola, (1999). Não é possível evitar que o erro amostral ocorra, mas pode-se limitar o seu valor selecionando uma amostra de tamanho adequado. Quanto maior o tamanho da amostra menor o erro amostral e vice-versa.
- **Estimativa da Média Populacional** é a média obtida a partir de um determinado número de indivíduos que compõem uma amostra.

O cálculo do tamanho da amostra para uma estimativa confiável da média populacional, segundo Levine, (2000) é dado pela Equação 21.

$$n = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{E} \right)^2 \quad (21)$$

onde:

$n$  = Número de indivíduos na amostra;

$Z_{\alpha/2}$  = Valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado (vide Tabela 14);

$\sigma$  = Desvio padrão populacional;

$E$  = Margem de erro ou erro máximo da estimativa. Identifica a diferença máxima entre a média amostral e a média populacional.

Na Equação 21 o desvio padrão utilizado foi o “amostral”. Este desvio padrão é utilizado quando se pretende uma estimativa da média para um determinado nível de confiança, tendo em

vista não ser adequado trabalhar-se com todos os indivíduos da população. Na versão do EXCEL (2007) é definido, além do desvio padrão populacional DESVPADP, o DESVPAD, que é definido como sendo o desvio padrão “amostral”.

**Tabela 14 - Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra.**

Grau de Confiança (%)	$\alpha$	Valor Crítico $Z_{\alpha/2}$
90	0,10	1,645
95	0,05	1,960
99	0,01	2.575



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS DESGASTES

Todos os parâmetros de corte e resultados das medidas dos desgastes de flanco VBmax das fresas utilizadas nos ensaios estão apresentados nos ANEXOS 1, 2 e 3. Nos dois primeiros ANEXOS também são apresentados os cálculos realizados a partir dos resultados dos ensaios de desgaste da fresa usinando as chapas de PRFC, a saber:

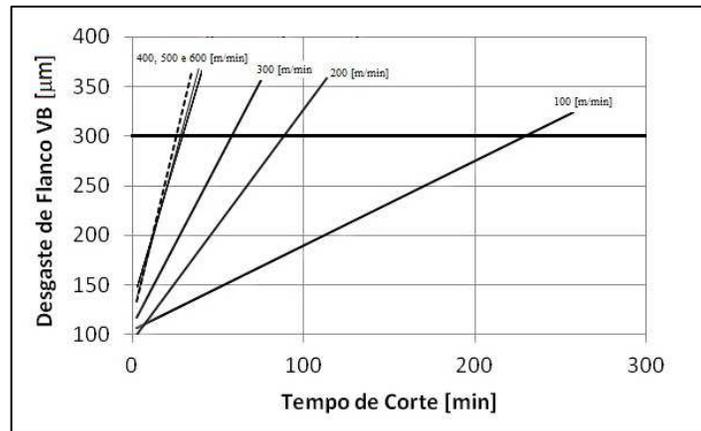
- valores médios das 6 medidas de desgastes para cada 8 cursos da fresa;
- desvio padrão amostral da média para cada 8 cursos da fresa;
- número mínimo de réplicas necessárias para uma probabilidade de 95% de confiança admitindo um erro de de 5 a 7  $\mu\text{m}$  para cada 8 cursos da fresa
- tempo de corte para cada 8 cursos da fresa;
- valor do diâmetro da fresa
- ferramenta numerada de acordo com o respectivo ensaio realizado;
- velocidades de corte utilizadas nos ensaios;
- avanços utilizados nos ensaios;
- rotações utilizadas em cada ensaio;
- velocidades de avanço utilizadas nos ensaios para garantir que o avanço fosse sempre constante.

No ANEXO 3 estão resumidos os resultados relativos às medidas da força de corte.

A Figura 37 revela, por meio de linhas de tendência, como variou o desgaste para as diversas velocidades de corte ensaiadas.

Observa-se que até a velocidade de corte de 400m/min, o comportamento dos desgastes ocorre de forma tradicional, ou seja, à medida que a velocidade de corte aumenta o desgaste também aumenta. Entretanto, para 500 e 600 m/min, observa-se que ocorreu um comportamento fora do tradicional, pois, para estas duas velocidades a evolução do desgaste atingiu um valor mínimo para 500 m/min e depois, teve um pequeno crescimento. Mais adiante este fato será discutido.

A Tabela 15 foi retirada da Figura 37 e constam dela os valores das intersecções das linhas de tendência dos desgastes com o critério de vida adotado em  $VB_{max} = 300 \mu m$ , representado na figura pela linha em destaque.



**Figura 37 - Evolução do Desgaste da Fresa com o Tempo de Corte.**

A partir destes valores foi construído o gráfico bilogarítmico da Figura 38, o qual representa a curva de vida conforme Equação 22, de acordo com o modelo para cálculo da vida de ferramentas proposta por Taylor.

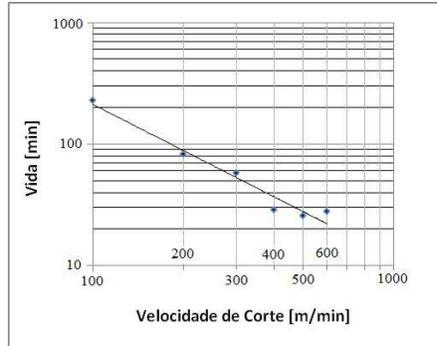
$$T \times v_c^{1,26} = 71.189 \quad (22)$$

A interpolação mostrada na Figura 38 considera todos os pontos conseguidos para todas as velocidades de corte testadas.

**Tabela 15 - Vida da fresa para cada velocidade de corte testada (Critério de Vida;  $VB_{max} = 300 \mu m$ ).**

Velocidades de corte [m/min]	100	200	300	400	500	600
Tempos de Corte [min]	228,93	82,42	57,64	29,13	25,76	27,91

Lembrando que a fresa quebrou para a velocidade de corte de 500 m/min quando o desgaste atingiu o valor de  $246,21 \mu m$  para um tempo de corte de 19,30 min (ANEXO 1), o critério de vida de  $300 \mu m$  obrigou a realização de uma extrapolação do resultado para o valor de 25,76 min (vide Tabela 15). Se for desconsiderada a velocidade de 500 m/min por causa deste aspecto, a nova equação de Taylor para o par fresa/PRFC fica de acordo com a Equação 23, com coeficientes  $x$  e  $K$  diferentes da Equação 22.



**Figura 38 - Curva de vida para o par fresa/PRFC.**

$$T \times v_c^{1,24} = 62.617 \quad (23)$$

A Tabela 16 apresenta dados técnicos e de custos do sistema máquina ferramenta utilizado nos ensaios com os quais fica possível calcular as velocidades de máxima produção e de mínimo custo.

**Tabela 16 - Dados para os cálculos das velocidades de mínimo custo e máxima produção.**

Tempo de troca da ferramenta $t_{f}$ (min.)	Custo do operador $S_h$ (R\$/h)	Custo máquina $S_m$ (R\$/h)	Preço da ferramenta $C_f$ (R\$)
2	25	40	100

De posse das Equações 22 e 23, e com os dados da Tabela 16, é possível calcular as velocidades de mínimo custo e de máxima produção, apresentadas primeiramente para a situação em que os dados referentes à velocidade de 500 m/min foram mantidos, conforme equações 24 e 25 respectivamente.

$$v_{cmax} = \sqrt[3]{\frac{K}{(x-1) \times t_{f}}} = \sqrt[3]{\frac{71.189}{0,26 \times 2}} = 11.926 \text{ m/min} \quad (24)$$

$$v_{cmc} = \sqrt[3]{\frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot \left(C_a + \frac{t_{f}}{60} \cdot (S_h + S_m)\right)}} = \sqrt[3]{\frac{71.180 \times 65}{60 \times 0,26 \times \left(100 + \frac{2 \times 65}{60}\right)}} = 560 \text{ m/min} \quad (25)$$

Em seguida, para a situação em que os dados para a velocidade de corte de 500 m/min foram desconsiderados. Os valores das velocidades de máxima produção e mínimo custo, neste caso, são apresentados pelas Equações 26 e 27.

$$v_{cmax} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \times t_{ff}}} = \sqrt[1,24]{\frac{62.617}{0,26 \times 2}} = 12.512 \text{ m/min} \quad (26)$$

$$v_{cmc} = \sqrt[x]{\frac{K \cdot (S_h + S_m)}{60 \cdot (x-1) \cdot \left( C_a + \frac{t_{ff}}{60} \cdot (S_h + S_m) \right)}} = \sqrt[1,24]{\frac{62.617 \times 65}{60 \times 0,24 \times \left( 100 + \frac{2 \times 65}{60} \right)}} = 559 \text{ m/min} \quad (27)$$

Observa-se que as diferenças encontradas não são significativas. Isto mostra que a extrapolação feita para o caso dos dados da velocidade de corte 500 m/min pode ser considerada sem comprometimento dos resultados finais referentes às velocidades de corte de máxima produção e mínimo custo. Este fato ocorreu porque os valores medidos dos desgastes, o foram pela realização de um número de réplicas suficiente para caracterizar uma confiança estatística adequada, conforme apresentado no Anexo 1 e 2.

O valor exorbitantemente alto que resultou para a velocidade de máxima produção é um fato normal. Isto sempre ocorre quando dois fatores se somam: o primeiro relacionado com o valor muito pequeno do coeficiente x de Taylor; o segundo porque o tempo de troca é relativamente pequeno, graças ao sistema flexível de troca da ferramenta que foi utilizado.

O valor pequeno do coeficiente x de Taylor pode ser explicado pelo fato da ferramenta apresentar uma evolução de desgastes muito pequena com a variação da velocidade de corte.

De fato, para o mesmo percurso de corte de 52800 mm (vide ANEXO 1), se for considerada a variação da velocidade de corte de 100 para 600 m/min tem-se um valor de 83,3% de variação. Entretanto, a variação dos desgastes foi de apenas 20%. Isto significa que a ferramenta tem um desempenho muito eficiente para fresamento do PRFC. Apenas para uma comparação, o valor de x de Taylor para aços em usinagem com ferramentas de metal duro é da ordem de 4, ou seja, aproximadamente 4 vezes maior que o caso do PRFC.

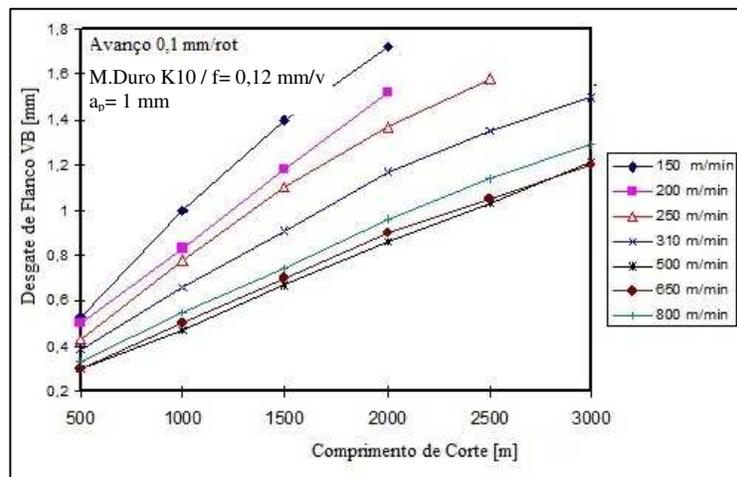
Quanto à velocidade de mínimo custo, pode-se dizer que também resultou um valor relativamente alto. Para os dados técnicos e econômicos considerados ela está dentro do intervalo que é o intervalo de validade de x e de K de Taylor, qual seja [100;600]. Como foi possível fresar com bom desempenho para a velocidade de corte de 600 m/min, a velocidade de mínimo custo

pode e deve ser a adotada. Além de o custo ser o menor possível, estaria sendo empregada a velocidade de corte que daria a maior produtividade possível, já que ela é consequência da maior rotação disponível na máquina.

É oportuno mencionar que, para valores de  $x$  e de  $K$  da ordem dos determinados neste trabalho a máquina não precisa ser sofisticada e nem apresentar um salário máquina elevado e operador com seu salário deve ser adequado a esta máquina mais simples. Caso estes salários sejam muito altos será observada velocidade de corte de mínimo custo muito alta, podendo inclusive ser maior que a maior velocidade de corte utilizada nos ensaios.

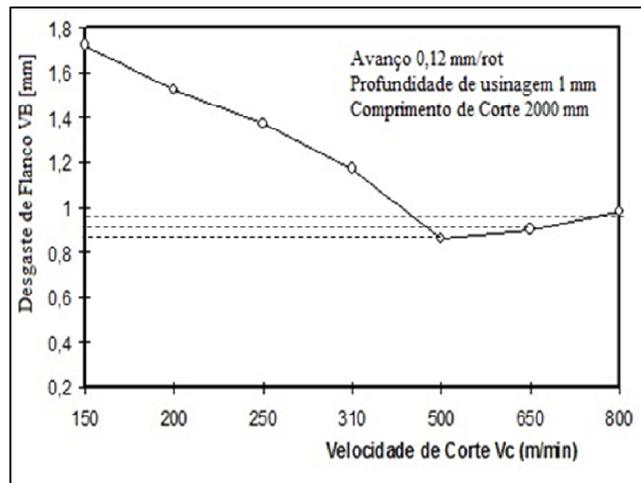
## 5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS DESGASTES

(Ferreira, 1999) publicou sua tese de doutorado sobre usinagem de materiais PRFC-PP, PRFC-PB e material compósito Carbono/Carbono, em operações de torneamento. Este pesquisador observou que, à medida que velocidade de corte diminuía o desgaste de flanco aumentava ao invés de diminuir como ocorre com outros materiais. Este fato está ilustrado na Figura 39.



**Figura 39 - Evolução do desgaste de flanco em função da velocidade de corte (Ferreira, 1999).**

A Figura 40 foi construída a partir da Figura 39 e os pontos que nela estão desenhados referem-se aos dados dos desgastes para um valor fixado de 2000 mm de comprimento de corte desenvolvido pela ferramenta durante o ensaio de torneamento.



**Figura 40 - Evolução do desgaste com a velocidade de corte para o comprimento de corte de 2000 mm (Ferreira, 1999) (Adaptada pelo autor).**

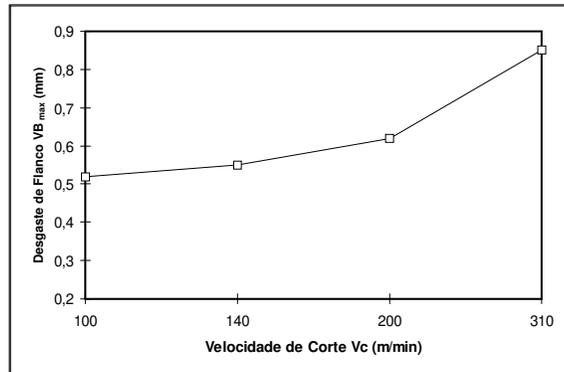
A explicação dada por Ferreira (1999) para o resultado não tradicional foi:

*(sic) o compósito Carbono/Carbono apresenta a propriedade de oxidar-se em atmosfera não controlada em temperaturas acima de 370 °C (Savage, 1993). Como no processo de usinagem do compósito as temperaturas de corte ultrapassam este valor (Santhanakrishnan et al. (b), 1993), pode-se constatar que ocorreu durante o corte um processo de oxidação do material da peça.*

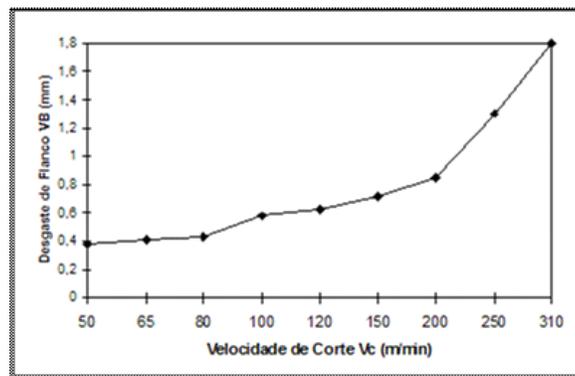
Em outro ponto de seu trabalho o autor continuou:

*(sic) A medida que a velocidade de corte cresce tem-se maior temperatura de corte e um maior processo de oxidação, que provoca uma diminuição da resistência da peça ao corte (Thomas, 1993), facilitando a usinagem e provocando menor desgaste à ferramenta. No entanto, em velocidades de corte altas ( $v_c > 500$  m/min) têm-se uma alteração deste fenômeno, pois o aumento do volume de oxidação na região de corte não acompanhou, na mesma proporção, a taxa de crescimento da velocidade de corte. Assim, acima da velocidade de corte de 500 m/min, tem-se uma inversão do comportamento do desgaste da ferramenta.*

Entretanto, o mesmo autor, torneando peças de PRFC-FP (Fibras Picadas) ou PRFC-FB (Fibras Bobinadas), concluiu que o comportamento dos desgastes foi o tradicional e similar ao que ocorre com outros materiais. Ou seja, na medida em que a velocidade de corte aumenta o



desgaste também aumenta. Este fato está registrado nas Figura 41 e Figura 42. Este comportamento do desgaste ocorreu dentro da faixa de velocidades 100 e 310 m/min.



**Figura 41 - Desgaste de flanco em relação à velocidade de corte para composto PRFC-FB. Avanço 0,12 mm/rot e profundidade de usinagem de 1 mm. (Ferreira 1999).**

**Figura 42 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte para o material PRFC-FP. Avanço 0,12 mm/rot e profundidade de usinagem de 1 mm. (Ferreira, 1999).**

A Figura 43 mostra o comportamento do desgaste de flanco medido nos ensaios de usinagem por fresamento desenvolvido neste trabalho. Observa-se da análise desta figura, que até a velocidade de corte de 400 m/min, os desgastes revelam um comportamento tradicional, ou seja, crescem sempre que a velocidade também cresce. Nota-se também, que existe uma semelhança significativa com os ensaios de torneamento. Entretanto, quando a velocidade supera o valor de 400 m/min, ocorre uma inversão no comportamento do desgaste. Este inicia um processo de decréscimo à medida que a velocidade de corte cresce.

O material composto utilizado durante o torneamento foi o PRFC-FB, o mesmo utilizado neste trabalho e a faixa de velocidades de corte foi estendida de 310 m/min (torneamento Figura 41) para 600 m/min (fresamento Figura 43). Assim, pode-se sugerir que quando as velocidades

de corte ficam maiores ocorrem os fenômenos de oxidação e ablação mais intensos que provocam a mudança de comportamento dos desgastes.

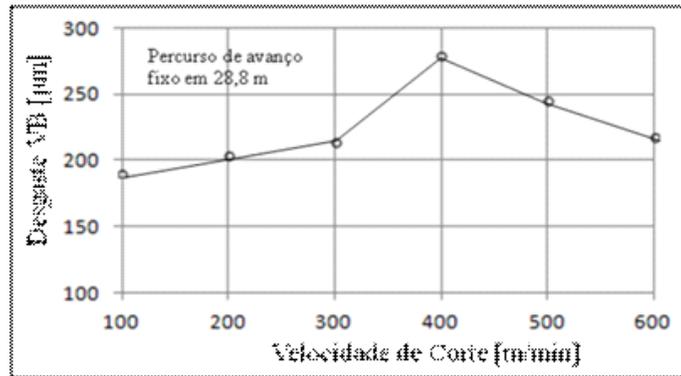


Figura 43 - Variação do desgaste com a velocidade de corte para o fresamento.

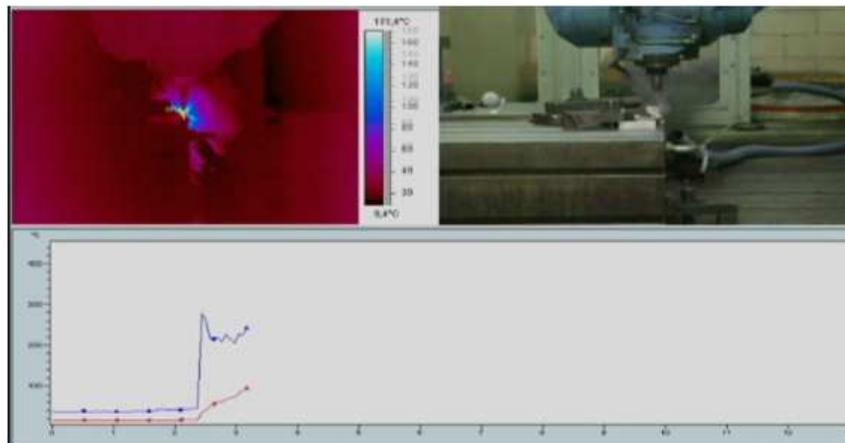
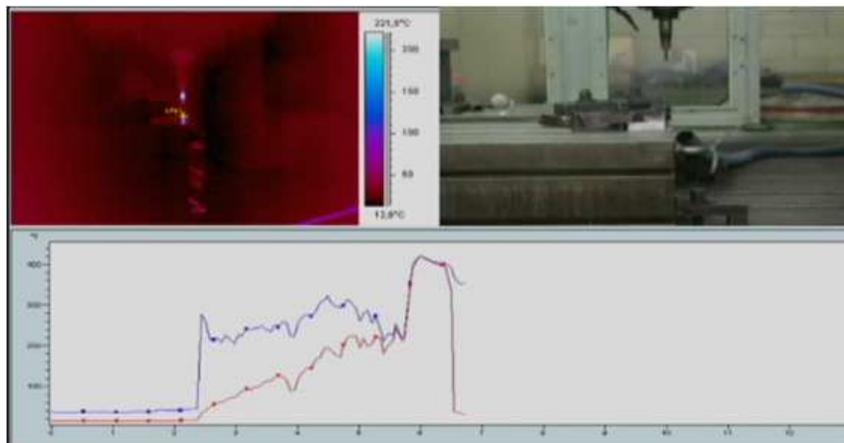


Figura 44 - Medida da temperatura de corte com a termocâmara no início da operação de fresamento.

Para procurar uma explicação mais contundente sobre o comportamento dos desgastes destes materiais compósitos, foram realizados os ensaios de medição da temperatura de corte durante o ensaio de fresamento. A Figura 44 e Figura 45, ilustram dois momentos do mesmo ensaio em que a termocâmara registrou a medida da temperatura. Na primeira, observa-se a nuvem de material compósito (cavaco) na fase inicial do fresamento, bem como o início do registro da temperatura expresso em cores e graficamente. Na segunda (Figura 45), o registro da temperatura já foi concluído e mostra a saída da ferramenta.



**Figura 45 - Medida da temperatura de corte no final do registro, momento em que a ferramenta se afasta da peça.**

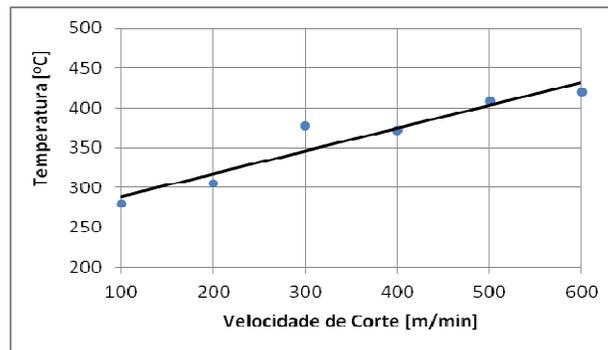
Acrescente-se neste ponto, a Figura 46 e Figura 47 que apresentam respectivamente um resumo dos valores máximos das temperaturas de corte em relação às velocidades de corte ensaiadas durante o fresamento e os gráficos dos registros destas temperaturas de corte realizados com o uso da termocâmara.

De posse destas informações é possível estabelecer as seguintes discussões:

- comparando os resultados obtidos por Ferreira, (1999) apenas para torneamento, é possível admitir que a presença apenas de Carbono, como ocorre no caso do material compósito Carbono/Carbono (Figura 40), provoca uma provável intensificação dos fenômenos de oxidação e ablação. A degradação do material compósito para velocidades e temperaturas mais baixas mascara o efeito de outros mecanismos de desgastes, como principalmente a abrasão mecânica e assim, enquanto este efeito persistir, os desgastes decrescerão até que o mecanismo de abrasão se imponha diante dos efeitos e degradação deste material. Ao comparar com o processo de fresamento

realizado neste trabalho, deve-se considerar a presença do polímero reforçado pelas fibras de carbono. Assim, a presença deste componente, caracteriza um comportamento do compósito bastante típico, até que a temperatura seja tão alta a ponto de transformar o polímero em carbono por queima deste nas proximidades do contato ferramenta peça. Isto é provável de ocorrer e as Figura 44 aFigura 47 são suficientes para sustentar tal hipótese. Desta forma, para velocidades de corte mais altas (acima de 400 m/min.), as temperaturas de corte também mais altas provocam no Carbono nascente os fenômenos de ablação e oxidação observados no compósito Carbono/Carbono. Entretanto, a presença conjunta do Carbono com a resina, tal como ela mesma, leva a transição destes fenômenos para valores de velocidades de corte mais altas.

- quando, no torneamento dos materiais compósitos, foi utilizada a resina reforçada com fibras de carbono, quer picada ou bobinada. O comportamento dos desgastes foi o mesmo que ocorre tradicionalmente com outros materiais. Entretanto, Ferreira (1999), pesquisou comportamento do desgaste até valores de velocidades de corte mais baixas do que as utilizadas durante o fresamento. Independente de diferenças que possam existir entre os dois processos de usinagem, fica novamente reforçada a hipótese de que realmente temperaturas mais altas provocam inversão importante no comportamento dos desgastes para estes materiais compósitos.



**Figura 46 - Evolução das temperaturas máximas atingidas durante o fresamento para as velocidades testadas(avanço = 0,075 mm/aresta).**

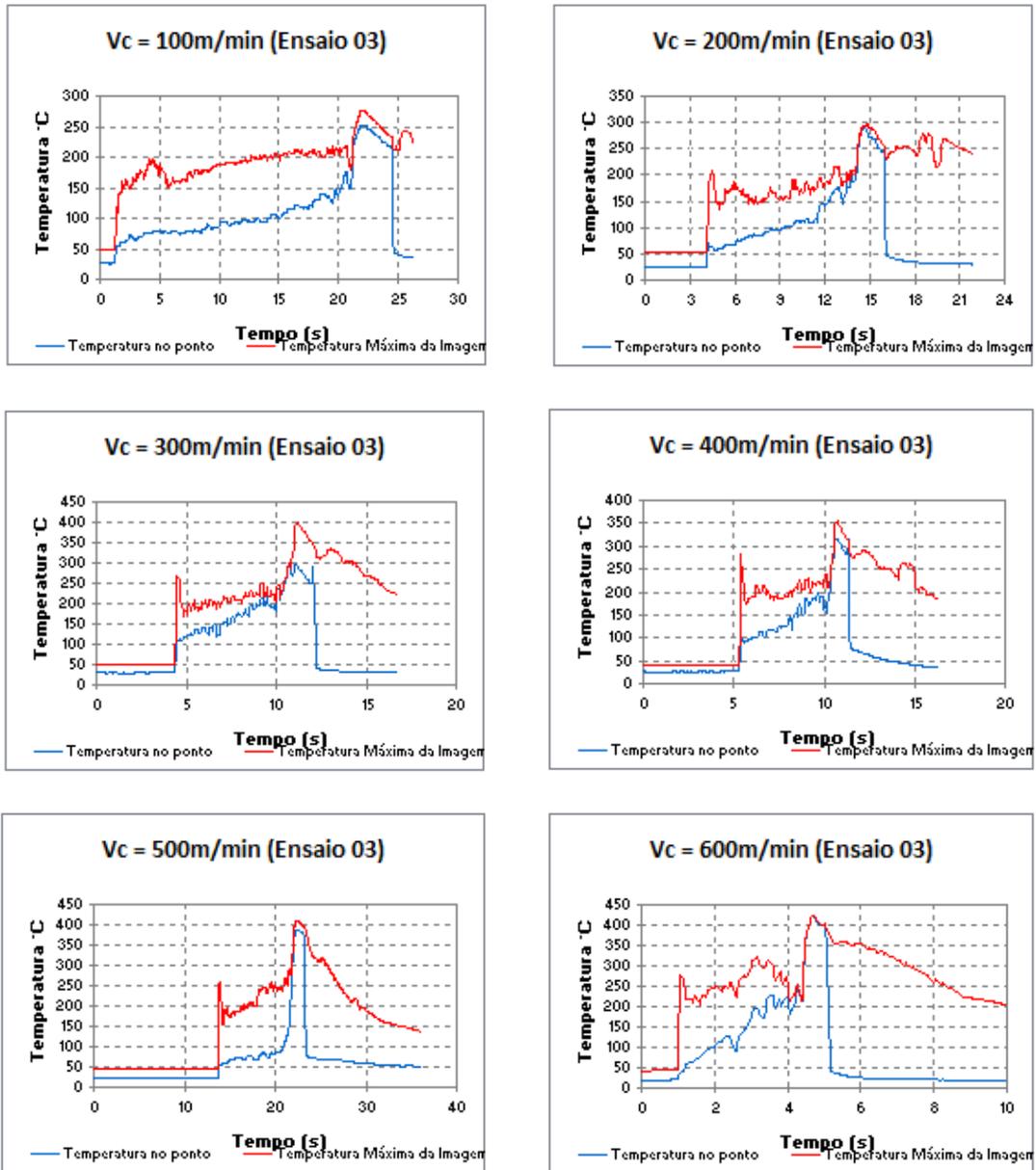


Figura 47 - Variação da temperatura de corte durante o fresamento para cada uma das velocidades de corte testadas ( $f_z = 0,075$  mm/aresta).

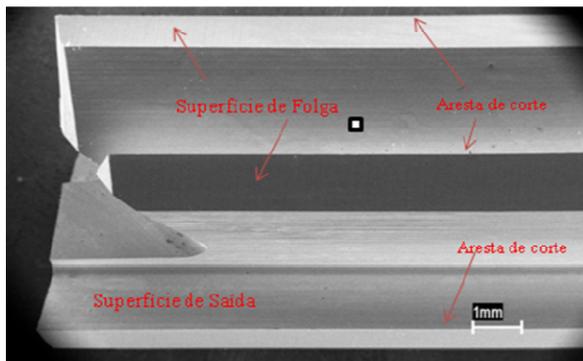
- assim, é possível sugerir que estes materiais compósitos preparados a partir de resina fenólica e fibras de carbono, apresentem um desgaste crescente e tradicional provocado por mecanismo de abrasão até determinado valor de velocidade de corte e temperatura. Para valores maiores destes parâmetros existe a hipótese de que ocorra a queima da resina. Então, a ablação e a oxidação passam a atuar de forma preponderante sobre o

mecanismo de abrasão. Este comportamento agride menos a ferramenta que, como consequência, apresenta desgastes menores do que aqueles que vinham ocorrendo, como mostra a Figura 43;

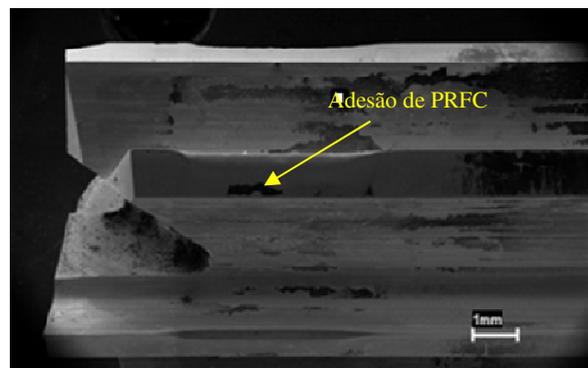
- As hipóteses formuladas anteriormente carecem de mais pesquisas para suas confirmações. Entretanto, tanto para fresamento quanto para torneamento destes materiais compósitos foram observados comportamentos não convencionais dos desgastes na prática destes processos. Esta constatação é muito forte porque vem da prática independente dos processos mencionados.

### 5.3 ANÁLISE DOS MECANISMOS DE DESGASTES

A Figura 48 é uma foto da fresa nova utilizada nos ensaios. Na foto são mostradas as três arestas de corte das 6 existentes. Também estão apresentadas as superfícies de saída e de folga. A Figura 49 é uma foto da mesma ferramenta depois de ter sido utilizada nas experiências e apresentar algum nível de desgaste. Na Figura 49 é possível observar a presença de regiões mais escuras que precisam ser analisadas.

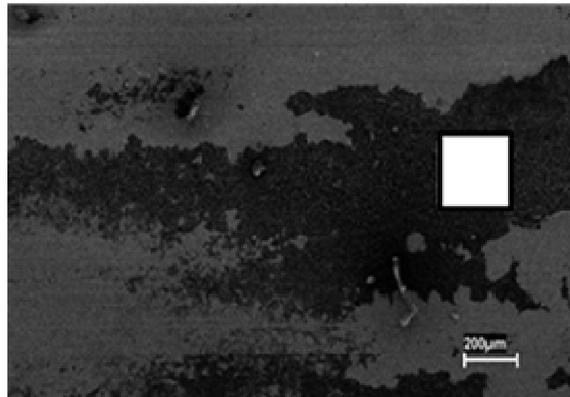


**Figura 48 - Foto da Ferramenta nova.**



**Figura 49 - Foto da mesma ferramenta da Figura 48, mostrando possível aderência do PRFC depois do fresamento.**

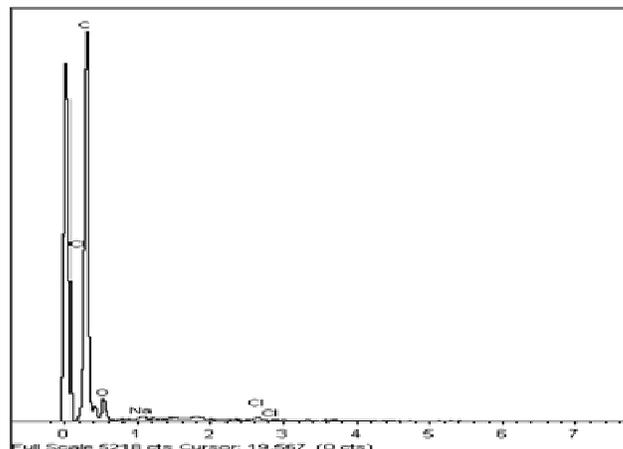
Para realizar tal análise foi destacada em cor branca uma pequena região conforme indicado na própria Figura 49 e apresentada na Figura 50. A Figura 51 é o resultado de uma análise EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) para detectar a composição química do material no ponto selecionado destacado em branco na Figura 50.

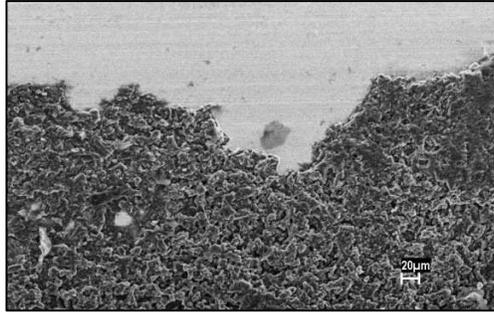


**Figura 50 - Destaque em branco da região demarcada sobre a superfície do canal de acomodação e saída do cavaco mostrada na Figura 49.**

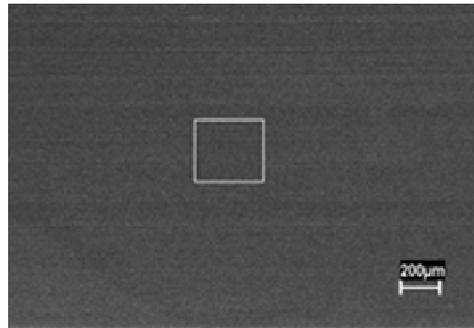
**Figura 51 - Análise EDS sobre a região da Figura 46.**

Na Figura 51 observa-se a presença de grande quantidade de Carbono, indicando que o material identificado faz parte do material compósito PRFC, ou seja, ocorreu aderência no canal de acomodação e saída do cavaco. O material compósito PRFC aderente no referido canal, cuja foto tirada no MEV encontra-se apresentada na Figura 52. Aparentemente está em relevo com relação à superfície em que está aderente. Assim sendo, ela não deverá ser responsável por mecanismos de desgastes, mas sim, na pior das hipóteses, ser prejudicial com relação à saída do cavaco.





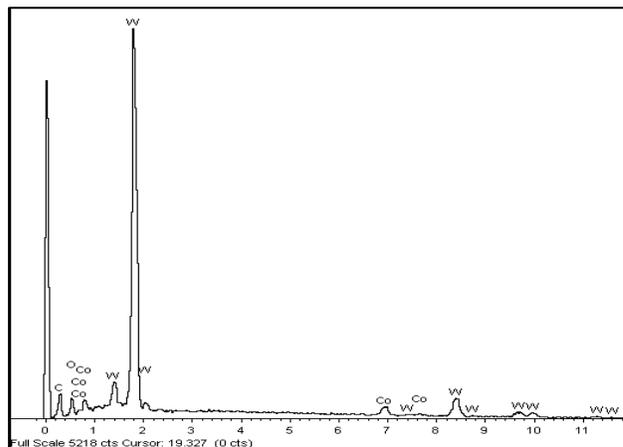
**Figura 52 - Foto do material composto PRFC tirada com o MEV que estava aderente à superfície do canal de acomodação e saída do cavaco.**



**Figura 53 - Destaque da superfície de folga da Ferramenta nova.**

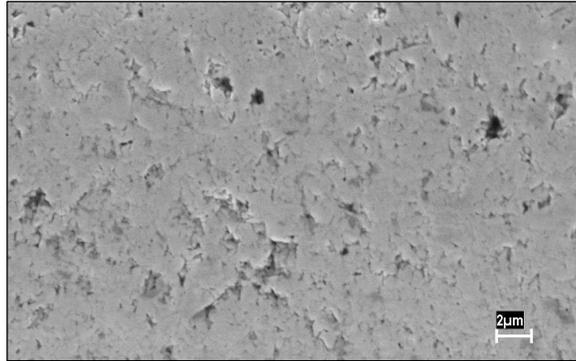
Ainda da observação da Figura 53, é possível afirmar que o desgaste de flanco ocorreu essencialmente por abrasão, pois, a superfície do desgaste remanescente na ferramenta mostra um polimento típico da remoção do material por este mecanismo.

A Figura 53 e Figura 54 foram criadas para mostrar que destacando um ponto da ferramenta nova e fazendo sobre o mesmo o ensaio de EDS, o resultado é a presença de Tungstênio e de Cobalto realmente existente na ferramenta de metal duro utilizada.



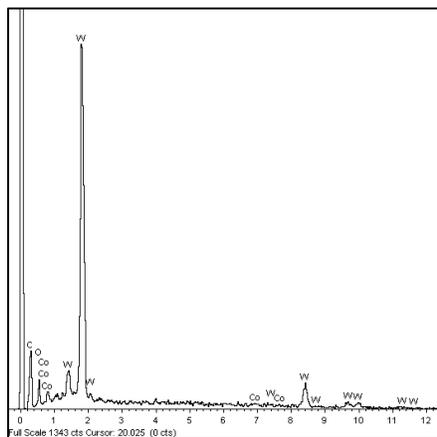
**Figura 54 - Análise EDS da região destacada na superfície de folga da ferramenta nova.**

Outro aspecto que foi analisado é o mostrado na Figura 55. A foto realizada no MEV permitiu verificar pequenos pontos pretos presentes na figura. Estes pontos estão exatamente sobre a aresta de corte da ferramenta onde ocorreu o desgaste de flanco. Neste caso foi constatado tratar-se de aderência na região do desgaste VB. O mecanismo de aderência que ocorreu nesta região realmente irá contribuir para intensificar a perda de material da ferramenta.



**Figura 55 - Foto realizada no MEV mostrando pontos escuros na aresta de corte depois do fresamento do PRFC.**

Observa-se pela Figura 56 que realmente os pontos pretos apresentam alguma porcentagem de Carbono proveniente do material compósito PRFC e alguma porcentagem maior do Tungstênio proveniente da ferramenta.



**Figura 56 - Resultados da análise por EDS de um dos pontos escuros da Figura 55 (18% de C e 78% de W).**

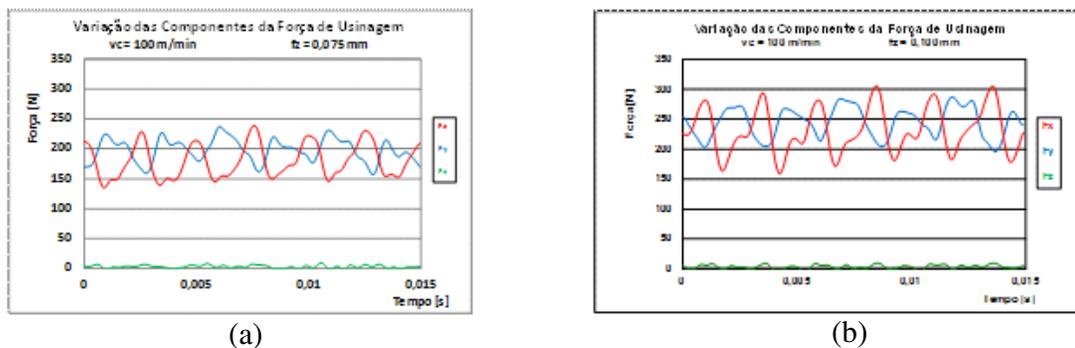
Isto ocorreu porque o ponto selecionado para análise que contém o material da peça é muito pequeno e pouco profundo. Por este motivo, a análise EDS acaba por medir o material da peça e

da ferramenta simultaneamente. De acordo com bibliografia consultada (Stachowiak, 2005), estes pontos podem ser partículas cristalizadas da resina que ficaram endurecidas e abrasivas criadas pela presença simultânea de atrito e temperatura durante o corte.

#### 5.4 FORÇA DE USINAGEM DO PRFC

O ANEXO 3 apresenta o cálculo do número mínimo de amostras para determinação do RMS das forças resultantes de usinagem  $F_x$  e  $F_Y$  para um erro estimado em 20 N com 95% de probabilidade para as médias determinadas a partir da experimentação de fresamento.

Apresenta também o registro típico para cada condição de velocidade de corte e avanço utilizados como uma amostra dos 24 ensaios realizados. Para a velocidade de corte de 100 m/min, o registro da resultante das forças de corte mostrou ser o mais comportado. Por este motivo o mesmo é repetido na Figura 57 apresentada a seguir:



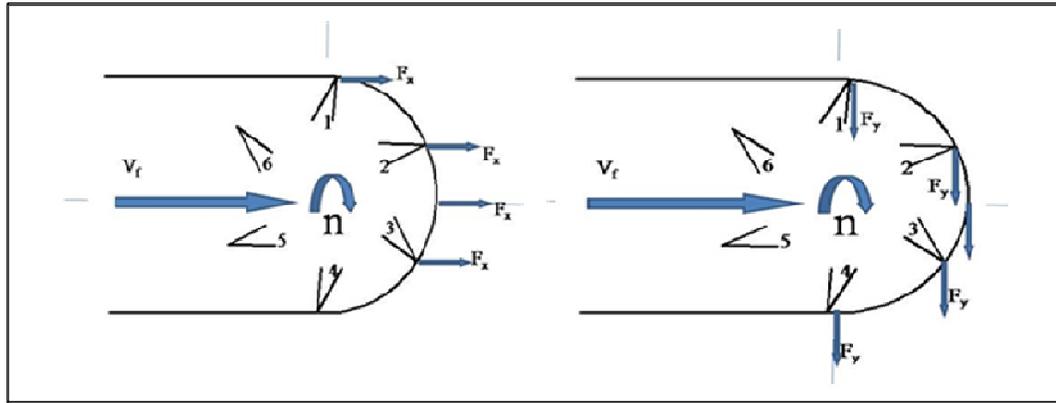
**Figura 57 - Registro da resultante dos esforços de corte para as condições de 100 m/min de velocidade de corte; 0,075 mm/rot (a) e 0,1 mm/rot de avanço (b) para uma volta completa da fresa.**

A Tabela 17 mostra o porquê do comportamento do esforço de corte mostrado na Figura 57. O número de arestas em contato com a peça sempre ficará oscilando entre dois e três, ocorrendo, desta forma um degrau de crescimento durante a evolução dos esforços na direção do eixo X. Na direção do eixo Y tal comportamento não é observado, pelo menos de maneira mais clara. A alternância entre as duas e as três arestas não fica claro, por causa da composição dos esforços, como mostra a Figura 58.

Para as demais velocidades de corte utilizadas, observa-se que tal comportamento não é tão nítido. Sugere-se que com o aumento da velocidade de corte, a alternância entre as duas e as três arestas fique mascarada devido à diminuição do tempo de entrada e saída das mesmas.

**Tabela 17 - Ilustra o número de dentes da fresa em contato com a peça, durante o processo.**

Aresta 1	Aresta 2	Aresta 3	Aresta 4	Arestas em contato	Posicionamento em graus com seis (06) aresta cortando
Graus	Graus	Graus	Graus		
5	-55			1	
15	-45			1	
25	-35			1	
35	-25			1	
45	-15			1	
55	-5			1	
65	5	-55		2	
75	15	-45		2	
85	25	-35		2	
95	35	-25		2	
105	45	-15		2	
115	55	-5		2	
125	65	5	-55	3	
135	75	15	-45	3	
145	85	25	-35	3	
155	95	35	-25	3	
165	105	45	-15	3	
175	115	55	-5	3	
185	125	65	5	2	
195	135	55	-5	2	



**Figura 58 - = Ilustração mostrando os sentidos das projeções dos esforços na direção do eixo X (a) e na direção do eixo Y (b) sempre considerando a rotação no sentido horário.**

**Analisando os resultados das resultantes das forças, conforme indicam a**

Tabela 18 e Tabela 19, é possível realizar as seguintes observações:

- a tendência dos esforços de corte resultantes é de crescimento com o avanço, exceto para a velocidade de corte de 200 m/min (Figura 40) que apresentou um decréscimo. Este resultado, por ser o único que ocorreu, pode ser desconsiderado por ser um valor que tenha, por exemplo, acumulado erros naturais de experimentos;

**Tabela 18 - Variação da Força Resultante com a velocidade de corte e com o avanço medida na direção do eixo do X.**

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	0,01 mm/dente/rot
	Força Resultante no eixo X(N)	
100	182,9	232,9
200	191,0	231,3
300	190,4	246,7

**Tabela 19 - Variação da Força Resultante com a velocidade de corte e com o avanço medida na direção do eixo do Y.**

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	0,01 mm/dente/rot
	Força Resultante no eixo Y(N)	
100	214,0	254,6
200	285,1	208,0

300	255,7	311,3
-----	-------	-------

fixados os avanços, foi possível observar que houve um crescimento dos esforços resultantes com o crescimento da velocidade de corte. Da Física sabe-se que velocidade e força são grandezas independentes, portanto, este resultado observado nas experiências de fresamento do material compósito deve ter sua origem com aspectos relacionados, por exemplo, com a variação do atrito ferramenta/peça, à medida que a velocidade aumenta. Observa-se também nas Tabela 17 e

- Tabela 18, que o crescimento das resultantes dos esforços de corte não é significativo, o que corrobora a explicação apresentada anteriormente.
- é relevante mencionar que para vários resultados obtidos com a medida das resultantes dos esforços de usinagem a amostragem ficou muito aquém do que seria o ideal para se ter uma confiança com probabilidade de 95% para um erro estimado da média de 20 N. Da mesma forma que ocorreu com a rugosidade, o fato da fresa ficar em balanço pode ter sido a causa para alguma aleatoriedade para alguma das condições operacionais adotadas.

**Observa-se nas Tabela 20 e**

Tabela 21, que as resultantes das forças na direção de X são menores que as resultantes das forças na direção de Y. O esquema mostrado na Figura 58 pode ser utilizado para explicar este fato, pois, na direção do eixo X ocorre sentido contrário entre os esforços nos diferentes momentos que os dentes da fresa estão em contato com a peça Figura 58 (a). Por outro lado, na direção do eixo Y ocorre sempre o mesmo sentido para todos os esforços nos diferentes momentos que os dentes da fresa estão em contato com a peça Figura 58 (b).

**Tabela 20 - Variação da Força Resultante com a velocidade de corte medida na direção do eixo do X, comparada com a medida no eixo Y, para o avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	
	Força Resultante no eixo X(N)	Força Resultante no eixo Y(N)
100	182,9	214,0
200	191,0	285,1

300	190,4	255,7
-----	-------	-------

**Tabela 21 - Variação da Força Resultante com a velocidade de corte medida na direção do eixo do X, comparada com a medida no eixo Y, para o avanço de 0,1 mm/dente/rot.**

Velocidades de corte m/min	0,01 mm/dente/rot	
	Força Resultante no eixo X(N)	Força Resultante no eixo Y(N)
100	232,9	254,6
200	231,3	208,0
300	246,7	311,3

#### 5.4.1 CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE KINZLE PARA FORÇA INSTANTÂNEA DE CORTE

Para calcular a força instantânea de corte, será utilizada a Equação 10 e os gráficos da Figura 57 (a) e (b). Com estas informações primeiramente pode-se calcular o valor dos coeficientes da Equação de Kinzle  $K_{s1}$  e  $(1-z)$ .

Das Figura 57 (a) e (b) são retirados os valores máximos dos esforços que ocorrem em um dente da fresa na direção do eixo X, lembrando que estes valores devem ser divididos por 3, porque são 3 dentes em ação simultânea. Ou seja:  $240/3 = 80$  N e  $290/3 = 96,7$  N.

Substituindo-se os valores na Equação 10, tem-se:

$$80 = K_{s1} \times 4 \times 0,075^{(1-z)} \quad (28)$$

para 0,075 mm/rot e

$$96,7 = K_{s1} \times 4 \times 0,1^{(1-z)} \quad (29)$$

para 0,1 mm/rot.

Resolvendo as duas equações com duas incógnitas dadas pelas Equações 28 e 29, têm-se os valores de  $K_{s1}$  e  $(1-z)$ :  $(1-z) = 0,34$  e  $K_{s1} = 110,53$ .

Os valores encontrados devem ser entendidos como aproximados. Os motivos são dois:

- foi utilizado um valor dos esforços retirados do gráfico e divididos pelo número de arestas em contato com a peça simultaneamente, ou seja 3;
- foram ensaiados apenas dois valores de avanços o que significa a necessidade de replicação em trabalhos futuros.

Sob estas considerações, o PRFC mostra ser um material muito fácil de cortar quando se considera o parâmetro força de corte em comparação com aços e ferros fundidos. Mesmo sem realizar cálculos é possível inferir que também a potência de corte será bastante menor na comparação que aqueles materiais.

Foram realizados os cálculos apenas para as resultantes das forças nas três arestas de corte na direção de X. Entretanto, é fácil inferir que na direção do eixo Y, o resultado será muito próximo ao encontrado para o eixo X.

No item seguinte, os cálculos considerando as forças médias de corte serão considerados para os dois eixos.

#### 5.4.2 CÁLCULO DA FORÇA MÉDIA DE CORTE

Para calcular a força média por dente da fresa, primeiramente deve-se calcular o valor da espessura média de cavaco  $h_m$ . Esta é dada pela Equação 9. Assim, tem-se o valor de  $h_m$  dado pela Equação 30 para avanço de 0,075 mm/rot e Equação 31 para o avanço de 0,1 mm/rot.

$$h_{m0,075} = \frac{2f_z}{\pi} = \frac{2 \times 0,075}{\pi} = 0,048 \text{ mm} \quad (30)$$

$$h_{m0,1} = \frac{2f_z}{\pi} = \frac{2 \times 0,1}{\pi} = 0,064 \text{ mm} \quad (31)$$

#### 5.4.3 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA MÉDIA PARA OS VALORES MÉDIOS POR DENTE, MEDIDOS NA DIREÇÃO DO EIXO X, PARA A VELOCIDADE DE CORTE DE 100 m/min..

As Equações 32 e 33 permitem calcular os respectivos valores da Pressão Específica Média de Corte [N/mm<sup>2</sup>] dada pela Equação 14 para ambos os avanços. Então, substituindo-se os valores da força resultante média por dente da fresa nesta equação, tem-se:

para o avanço de 0,075 mm/rot,

$$K_{smX} = \frac{F_{cmX}}{a_p \times f} = \frac{73,2}{4 \times 0,075} = 244,0 \quad (32)$$

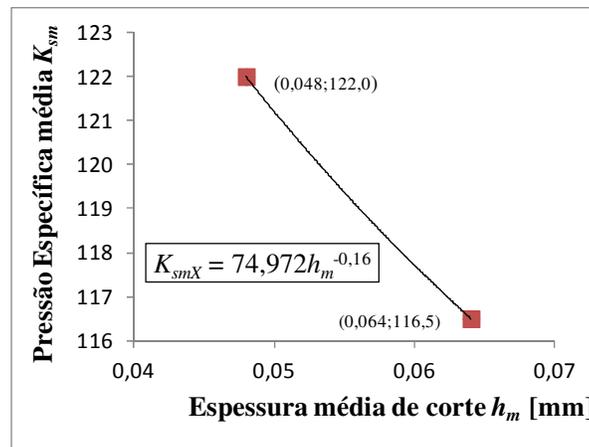
e, para o avanço de 0,1 mm/rot

$$K_{smX} = \frac{F_{cmX}}{a_p \times f} = \frac{93,2}{4 \times 0,1} = 233,0 \quad (33)$$

### Os valores de $F_{cmX}$ foram retirados da

Tabela 18, para velocidade de corte de 100 m/min dividindo-os por dois e meio, ou seja, o valor médio das arestas de corte em contato.

Com os valores dados pelas Equações 28 a 33 pode-se construir o gráfico da Figura 59.



**Figura 59 - Gráfico utilizado para determinação dos valores dos coeficientes  $K_w$  e  $w$  da equação que determina o valor de  $K_{smX}$ , com dados na direção do eixo X.**

As limitações em termos de material da peça impediram maior número de pontos para construção do gráfico da Figura 59. Por este motivo, este valor deve ser entendido como um valor aproximado dos parâmetros analisados.

**5.4.4 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA MÉDIA PARA OS VALORES MÉDIOS POR DENTE, MEDIDOS NA DIREÇÃO DO EIXO Y, PARA A VELOCIDADE DE CORTE DE 100 M/MIN.**

As Equações 34 e 35 permitem calcular os respectivos valores da Pressão Específica Média de Corte [N/mm<sup>2</sup>] dada pela Equação 14 para ambos os avanços. Então, substituindo-se os valores da força resultante média por dente da fresa nesta equação, tem-se:

para o avanço de 0,075 mm/rot,

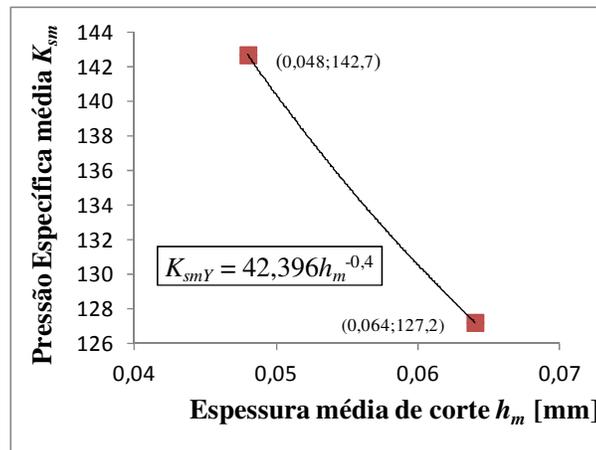
$$K_{smY} = \frac{F_{cmY}}{a_p \times f} = \frac{85,6}{4 \times 0,075} = 285,3 \quad (34)$$

e, para o avanço de 0,1 mm/rot

$$K_{smY} = \frac{F_{cmY}}{a_p \times f} = \frac{101,8}{4 \times 0,1} = 254,5 \quad (35)$$

Os valores de  $F_{cmY}$  foram retirados da Tabela 19, para velocidade de corte de 100 m/min dividindo-os por dois e meio, ou seja, o valor médio das arestas de corte em contato.

Com os valores dados pelas Equações 30, 31, 34 e 35, pode-se construir o gráfico da Figura



60.

**Figura 60 - Gráfico utilizado para determinação dos valores dos coeficientes  $K_w$  e  $w$  da equação que determina o valor de  $K_{smY}$ , com dados na direção do eixo Y.**

Como era de se esperar as equações com dados retirados na direção do eixo X apresenta valores diferentes de  $K_w$  e  $w$  dos dados retirados na direção do eixo Y. Desta forma, pode-se

escrever que as Equações 36 e 37 que fornecem os respectivos valores para os seus coeficientes  $K_{wx}$  e  $w_x$ , e  $K_{wy}$  e  $w_y$  ou seja:

$$K_{smX} = 75 \times h_m^{-0,16} \quad (36)$$

$$K_{smY} = 42,4 \times h_m^{-0,4} \quad (37)$$

E assim, tem-se que:

$$K_{wx} = 75; w_x = 0,16 \quad (38)$$

e

$$K_{wy} = 42,4; w_y = 0,4 \quad (39)$$

A Tabela 13 mostra os valores de  $K_w$  e  $w$  para alguns materiais (aços e fofo). Observa-se grande diferença entre os valores destes coeficientes para o PRFC. Para facilitar a análise, foi feita uma comparação dos esforços médios e da potência média do PRFC com fofo cinzento de baixa resistência. Adotando-se um valor de  $h_m = 0,5$  mm e  $a_p = 1$  mm e uma velocidade de corte de 100 m/min, tem-se a comparação apresentada na Tabela 22.

**Tabela 22 - Comparação dos esforços médios e da potência média de corte entre o material compósito PRFC e o fofo cinzento de baixa resistência.**

<b>Para o fofo:</b>	
$F_{cm} = 900.1.0,5^{0,72} = 549$ N	$P_{cm} = \frac{549.100}{60.10^3} = 0,92$ w
<b>Para PRFC na direção do eixo X:</b>	
$F_{cm} = 75.1.0,5^{0,84} = 42$ N	$P_{cm} = \frac{42.100}{60.10^3} = 0,07$ w
<b>Para PRFC na direção do eixo Y:</b>	
$F_{cm} = 42,4.1.0,5^{0,6} = 27,98$ N	$P_{cm} = \frac{27,98.100}{60.10^3} = 0,047$ w

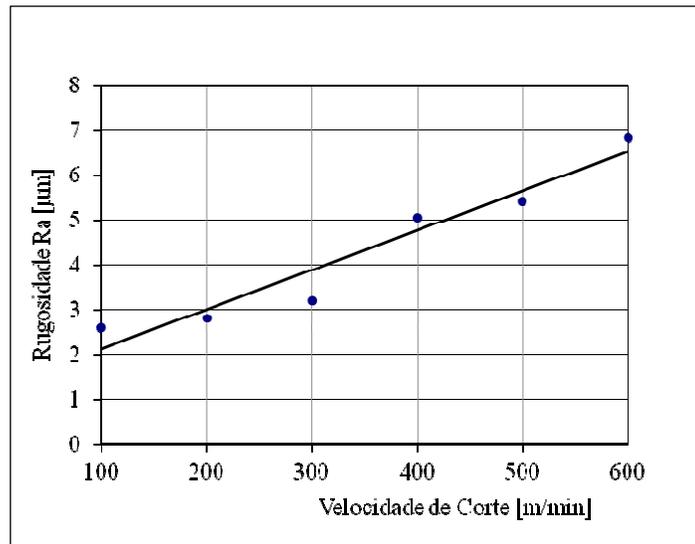
Assim, pode-se dizer que o PRFC é aproximadamente 15 vezes mais fácil de fresar que um fofo cinzento de baixa resistência.

## 5.5 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

A Figura 61 é um gráfico que mostra a tendência de variação da rugosidade  $Ra$  com a velocidade de corte. Observa-se novamente, que foi encontrado um comportamento que difere, por exemplo, da usinagem por torneamento de aços. Nestes, quanto maior a velocidade de corte, normalmente ocorre uma ligeira queda do valor da rugosidade  $Ra$  ou, pode ocorrer da variação ser praticamente desprezível (Diniz et al., 2013).

O comportamento diferenciado da rugosidade  $Ra$  com a velocidade de corte pode ter ocorrido devido à existência de vibrações provocada pelos seguintes fatores:

- operação de fresamento – entrada e saída de dentes. Observar o comportamento dos esforços de corte discutido no item anterior;
- fresa utilizada que tinha um diâmetro bastante pequeno de 8 mm usinando em balanço.



**Figura 61 - Tendência da variação da rugosidade Ra com a velocidade de corte.(avanço de 0,075mm/aresta**



## CONCLUSÕES

Depois de realizados os inúmeros ensaios durante a parte experimental deste trabalho, podem ser apresentados as seguintes considerações finais:

- a) o comportamento dos desgastes da fresa para o PRFC apresentou uma diferença significativa quando comparado com outros materiais. Até 400 m/min o desgastes teve um crescimento e para valores superiores o desgaste ficou praticamente constante. Aparentemente, este fato varia para materiais compósitos com diferentes composições químicas, porém, este fato precisaria ser mais bem pesquisado. Na literatura foram encontrados dois motivos para a ocorrência desta anomalia: fenômeno de oxidação e ablação que normalmente ocorre em materiais do tipo do PRFC, que são dependentes da temperatura utilizada durante a usinagem;
- b) os coeficientes  $x$  e  $K$  da equação devida a Taylor resultantes dos ensaios com o PRFC ficaram pequenos e muito menores que os valores encontrados para outros materiais. Isto significa que para este par ferramenta/material da peça, houve muita facilidade de usinagem. É por este motivo que a velocidade de mínimo custo ficou bastante alta, o que, também geralmente não é comum. A velocidade de máxima produção, entretanto, ficou exageradamente alta, mas este fato é compatível com o tempo de troca bastante baixo, devido à facilidade de troca da fresa;
- c) análises utilizando-se os recursos de microscópios óticos e MEV revelaram que ocorreram essencialmente dois mecanismos de desgastes: abrasão (principal) e aderência. Apesar de ter ocorrido o mecanismo de aderência, sua participação nos desgastes deve ter sido menor que por abrasão, o que seria normal, mas, além disso, a aderência ocorreu de forma muito pouco expressiva próximo da aresta de corte da fresa;
- d) as resultantes dos esforços de corte para todos os dentes da fresa apresentaram valores RMS com tendência crescente com o avanço. Como apenas dois avanços foram testados não é possível assegurar este comportamento. Entretanto é perfeitamente natural que esta tendência seja verdadeira. As resultantes também mostraram, em geral, tendência de um leve crescimento com as velocidades de corte. Deve ter ocorrido um crescimento das forças de atrito com o aumento da velocidade de corte, o que justificaria tal

comportamento. O mais natural seria que a resultante não variasse com a velocidade de corte;

- e) devido à distribuição das arestas em contato com a placa de PRFC os valores dos esforços médios de corte foram maiores na direção do eixo Y do que na direção do eixo X;
- f) numa comparação com um fofo cinzento de baixa resistência, o PRFC mostrou forças e potências médias da ordem de 10 vezes menor;
- g) quanto à rugosidade  $Ra$  observou-se um comportamento inesperado: houve um aumento do valor da rugosidade máxima com a velocidade de corte. Isto deve ter ocorrido por causa do trabalho em balanço da fresa com provável presença de vibrações também possivelmente advindas das entradas e saídas dos dentes da fresa;
- h) as condições operacionais utilizadas nesta pesquisa apontam para o uso de equipamentos que não precisam ter altos salários máquina e conseqüentemente não requerem alto salário homem. Devido à facilidade de usinagem, é possível trabalhar com velocidades de corte relativamente altas, em níveis que poderiam ser considerados de altíssimas velocidades de corte;
- i) observou-se um ótimo comportamento da ferramenta de metal duro K10 micro grão para fresamento deste PRFC;
- j) as temperaturas de usinagem acima de 400 m/min de velocidade de corte ficaram superiores a aproximadamente 400 °C. Este nível de temperatura pode ter sido responsável pela predominância do desgaste por abrasão provocado pela perda de resistência à quente do material da ferramenta;
- k) para ensaios de usinagem acima de 400 m/min ocorreu a presença de fumaça, oriunda da queima da resina durante o atrito ferramenta-material da peça;
- l) é de vital importância a coleta do pó e fumaça durante ensaios e prática da usinagem de materiais compósitos semelhantes ao PRFC, porque o pó (cavaco) destes produtos é extremamente nocivo à saúde do operador e pode comprometer o sistema eletrônico da máquina se não for aspirado durante a usinagem.

## 5.6 TRABALHOS FUTUROS

- a) é sugerido pesquisar de forma mais ampla e profunda o comportamento não tradicional dos materiais compósitos com base em resinas reforçadas por fibras de diversas características (vidro, kevlar, carbono, etc..) bem como do material compósito Carbono/Carbono, analisando desgastes e seus mecanismos, esforços de corte e rugosidade. O domínio destes aspectos pode resultar na usinagem mais econômica ou produtiva destes materiais;
- b) Idem item (a) com foco na análise da influência dos parâmetros de corte, velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem, além do comportamento destes materiais compósitos em outras operações de usinagem que não a de fresamento;
- c) Outro aspecto que merece ser pesquisado mais a fundo é o comportamento dos desgastes com relação à velocidade de corte em faixa mais ampla, visando mapear a evolução anômala dos desgastes quando comparado com outros materiais. Neste caso, o foco seria o de determinar se as inflexões apresentadas pelos desgastes com relação às velocidades de corte têm uma explicação mais fundamentada possível;



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB SANDVIK COROMANT, Metalcutting Technical Guide, Sweden, 2008.

AL-ZUBAIDY, HAIDER A.; ZHAO, Xiao-Ling and AL-MAHAIDI, Riadh. Experimental evaluation of the dynamic bond strength between CFRP sheets and steel under direct tensile loads. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 40, p. 89-102, 2013.

ANYNDIA G., KUANG C., LIU. Validity of random microstructures simulation in fiber-reinforced composite materials. **Composites**, 57, p. 56-70, USA, 2013

ARRAZOLA, P. J., OZEL T., D. UMBRELLO, M. DAVIES, I. S. JAVAHIR. Recent advances in modeling of metal machining processes. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 62, p. 695-718, Spain, 2013

ASPINWALL, D. KHAN, SOO A. L., SAGE C., HARDEN P., FLEMING N., **Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling**. Machining Research Group, School of Mechanical Engineering, University of Birmingham, Volume 1, Issue 1, 2012, Pages 283-288, Zurich; Switzerland, (2014).

ASPRONE, D., FERDINANDO AURICCHIO, CONSTANTINO MENNA,. Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb Structures. **Composite Structures**, 105, p. 240-255, Italy, 2013

AYRILMIS, N., ALPEREN KAYMAKEI, TURGAY AKBULUT, GULMUR MERTOGLUS. Mechanical performance of composites based on wastes of polyethylene aluminum and lignocellulosics. **Composites**, 47, p.150-154, Turkey, (2013).

AZEEZ, A.A.; KYONG, Y.; RHEE, K.Y.; PARK, S.J.; HUI, D. Epoxy clay nano composites – processing, properties and applications: A review. **Composites**, v.45, p.308-320, 2013.

AZMI, A.I. Design of fuzzy logic model for the prediction of tool performance during machining of composite materials. **Procedia Engineering**, v.38, p.208-217, 2012.

BANSAL, PUNNET.; LOKESH UPADHYAY. Experimental Investigations to Study Tool Wear during Turning of Alumina Reinforced Aluminium Composite. **Procedia Engineering**. v.51, p.818-827, 2012.

BAPTISTA, Elesandro Antonio e Coppini, Nivaldo Lemos. Otimização de processos de usinagem: uma abordagem para sistemas de Fabricação flexíveis que foi implementada em um sistema baseado na WEB, **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção – IV COBEF**. Estância São Pedro, SP, pp 1-10, 2007.

BELINGARDI, G., DAVIDE S. PAOLINO, ERMICS G. KORICHO., . Investigation of influence of tab types on tensile strength of E-glass/epoxy fiber reinforced composite materials. **Procedia Engineering**, 10, ICM11, p. 3279-3284, Italy, 2011

BHATNACAR, N.; RAMAKRISHNAN, N.; NAIK, N.K.; KOMANDURI, R. On The Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates. **International Journal of Machine Tools Manufacturing**. v. 35, n.5. p.701-716, 1995.

BHATNAGAR A K., G. VENU GOPALA RAO, P. MAHAJAN. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis. **Composite Science and Technology**, 67, p.579-593, India (2014).

BORTZ, D.R.; Merino, C.; Ignacio MARTIN-GULLON, I. Augmented fatigue performance and constant life diagrams of hierarchical carbon fiber/nano fiber epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.72, p.446–452, 2012

BRINKSMEIER, E.; FANGMANN, S.R.R. Drilling of composites and resulting surface integrity. *CIRP Annals*. **Manufacturing Technology** v.60, p.57–60, 2011.

BUCKLEY, D.A.H. Dimensioning and performance of an AO system for SALT, **Proceedings of SPIE\_-The International Society for Optical Engineering, Adaptive Optics Systems III**. Netherlands Volume 8447, Article number 84473, Amsterdam, (2012).

BUCKLEY, J. D. Carbon-carbon, an overview .**Ceramic Bulletin**. n2, v67, p. 364-368, 1988, Fiber and Wisker Reinforced Ceramics for Structural Applications, Marcel Dekker, NY, p. 49, 1993

BUDINSKI, K. G. **Surface Engineering for Wear Resistance**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

CHAWLA R. et al.. Experimental validation of 3D reconstructed pin-power distributions in full-scale BWR fuel assemblies with partial length rods. **International Conference on the Physics of Reactors**. Vol. 1, p. 105-118, USA, 2012

CHOUDHURY, I.A.; CHUAN, P.C. Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite, **Optics & Lasers**. v.51, p.1125-1132, 2013

DEFU, L.; YONGJUN, T.; CONG, W.L. Review of mechanical drilling for composite laminates. **Composite Structures**. v.94, p.1265–1279, 2012.

DINIZ, Anselmo Diniz, MARCONDES, Francisco Carlos e COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Artliber Editora Ltda, 8ª.Edição, São Paulo, 2013.

EL-HOFY, M.H.; SOO, S.L.; ASPINWALL, D.K.; SIM, W.M.; PEARSON, D. and HARDEN, P. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. **Procedia Engineering**. v.19, p.94–99, 2011.

FEITO M.J.. Numerical prediction of delamination in PRFC drilling. **Composites Structures**, 108, p. 677-683, Spain, (2013).

FERREIRA, João Roberto. **Torneamento de Materiais Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono**. 1999, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas, São Paulo, Brasil. pp. 1-196, 1999.

GANG, S., DU DE JI, SUI GANG, DING YING QI. Computer Aided Modelling of a Marine Diesel Engine Propulsion Plant. **Modelling simulation & Control**. Volume 8, Issue 1, p.19-48, 1987.

GHIDOSSI, Patrick; EL MANSORI, Mohamed and PIERRON, Fabrice. Influence of specimen preparation by machining on the failure of polymer matrix off-axis tensile coupons, **Composites Science and Technology**, 66, p. 1857-1862, 2006.

GIANCANE, S.; PANELLA, F.W.; NOBILE, R.; DATTOMA, V. Fatigue damage evolution of fiber reinforced composites with digital image correlation analysis. **Procedia Engineering**. V.2, p.1307- 1315, 2010.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002, 175p. ISBN 85-224-3169-8.

GONÇALVES, A.; ALVES, L.M.and ALVES L.M. Tube joining by asymmetric plastic instability. IDMEC, **Instituto Superior Técnico, University of Lisbon**. Volume 214, Issue 1, p.132-140, 2014.

HANAFI, ISSAN; KHAMLIHI, ABDELLATIF. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools. **Journal of Cleaner Production**, Volume 33, p. 1-9, 2012.

HAPKE, J.; GEHRIG, F.; Huber, N.; SCHULTE, K.; LILLEODDEN, E.T. Compressive failure of UD-CFRP containing void defects: In situ SEM microanalysis. **Composites Science and Technology**, v.71, p.1242-1249, 2011.

HARTMANN, J. M., D. WOLFGANG HINTZE. Modeling of delamination during milling of unidirectional CFRP. **Procedia CIRP**, 8, p.444-449, 2013.

HASEGAWA, T., TAKAMI HINO, HIROFUMI TANAKA. Influence of atmosphere on photo-assisted atomic switch operations. **4th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering**, Japan, 2014, Code101904, Volume 596, p.116-120, 2012.

HANAFI, ISSAM; KHAMLIHI, ABDELLATIF; CABRERA, FRANCISCO MATA; NUÑEZ LÓPEZ PEDRO J. AND ABDALLAH JABBOURI. Fuzzy rule based predictive model for cutting force in turning of reinforced PEEK composite. **Measurement**, Volume 45, Issue 6, p 1424–1435, 2012.

HINTZE, U., DIRK HARTMANN, CHRISTOPH SCHUTTE. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. **Composite Science and Technology**, 71, p.1719-1726, 2011.

HONGSHUAI, YANG, WANG HUI, LIU JIAHUI, LIU JIN, LIU ZHIGANG. Effect of simultaneous variation in temperature and ammonia concentration on percent fertilization and hatching in *Crassostrea ariakensis*. **Journal of Thermal Biology**, 41, p.43-49, 2014.

HU N.S., ZHANG, L.C. A study on the grindability of multidirectional carbon fiber reinforced plastics. **Journal of Materials Processing Technology**, v.140, p.152–156, 2003.

HU, N.S.; ZHANG, L.C. Some observations in grinding unidirectional carbon fiber reinforced plastics. **Journal of Materials Processing Technology**, v.152, p.333–338, 2004.

ILIESCU, M., VLADARCANU, L., SPANU P. Modeling and tool wear in drilling of PRFC, **International Journal of Machine Tools**, 50, p. 204-213, 2010.

IQBAL, A.K.M.; ARAI, Y.; ARAKI, W. Effect of hybrid reinforcement on crack initiation and early propagation mechanisms in cast metal matrix composites during low cycle fatigue. **Materials and Design**, v.45, p.241-252, 2013.

J. WITULSKI, J.; TROMPETER, M.; TEKKAYA, A.E.; KLEINER, M. High wear resistant deep drawing tools made of coated polymers, **CIRP- Manufacturing Technology**.V.60, p.311-314, 2011.

KALLA DEVI S. L, JAMAL SHEIK-AHMAD, JANET TWOMEY. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**.v. 50 , p. 882-891, 2010.

KARPAT Y., YIGIT KARPAT, ONUR BAKTIYAR, BURAK DEGER. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 56, p. 79-93, 2012

KELLY A., W. A. WALBRAN, B. VELEYE, S. BICKERTON, P. A. KELLY. Prediction and experimental verification of normal stress distributions on mould tools during Liquid Composite Moulding. **Composites**, 43, p. 138-149, 2012.

KIM, H. S., P. JENEI, E. Y. YOON, J. GUBICZA, J. L. LABARI, T. UNGAN. Microstructure and hardness of copper-carbon nano tube composites consolidated by High Pressure Torsion. **Materials Science**, V. 528, Issue 13-14, p. 4690-4695, 2011.

KIM, K.S.; LEE, D.G.; KWAK, Y.K.; NAMGUNG, S. Machinability of carbon fiber epoxy composite materials in turning. **Journal of Materials Processing Technology**, v.32, p. 553-570, 1992.

KLINKOVA, OLGA; RECH JOEL; DRAPIER, SYLVAIN AND BERGHEAU, JEAN-MICHEL. Characterization of friction properties at the work material cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tool under dry conditions. **Tribology International**, V. 44, p.2050–2058, 2011.

KLOCKE, FRITZ, DIETER LUNG, PULS H. **FEM modelling of the thermal workpiece deformation in dry turning**, 14<sup>th</sup> CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, v. 8, p. 240-245, Code 98195, 2013.

KOMANDURI, R. Nano manufacturing systems: Opportunities for industrial engineers. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**. V. 44, Issue 7, p.492-495, 2012.

KRISHNAMOORTHY, K.; BOOPATHY, S.R.; PALANIKUMAR, K. and DAVIM, J.P. Application of grey fuzzy logic for the optimization of drilling parameters for CFRP composites with multiple performance characteristics, **Measurement**, v.45, p.1286-1296, 2013.

LASRI T., HADDADI K. Interferometric technique for scanning near field microwave microscopy applications. **IEEE Instrumentation and Measurement for Life**. Article number 6555703, p.1694-1698, 2011.

LAURENZI, S., A. GRILLI, M. PNNIA, F. NICOLA, G. CATTANEO, M. MARCHETTI. Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding. **Composite**, v. 57, p.47-55, 2013.

LEI, H.; WANG, Z.; TONG, L.; ZHOU, B. and FUD, J. Experimental and numerical investigation on the macroscopic mechanical behavior of shape memory alloy hybrid composite with weak interface. **Composite Structures**. v.101 p.301-312, 2013.

LEVIN, Jack. **Estatística Aplicada a Ciências Humanas**. 2a. Edição, São Paulo: Editora Harbra Ltda, 1987.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L. and STEPHAN, David. **Estatística: Teoria e Aplicações usando Microsoft Excel (em Português)**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

LIN, S.L., CHEN, I.K. Drilling carbon fiber reinforced composite material at high speed. **Wear**, v.194, p.156-162, 1996.

LINBO, Z.; LIJIANG, W., XIN, W. Study on vibration drilling of fiber reinforced plastics with hybrid variation parameters method. **Composites: Part A**, v.34, p.237–244, 2003.

LOPEZ-ARRAIZA, A., GERMAN CASTILLO, HOM N. DHAKAL, RAUL ALBERDI. High performance composite nozzle for the improvement of cooling in grinding machine tools, **Composites**, 54, p. 313-318, 2013.

MARCONI, M. A., LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 1999, 260p. ISBN 85-224-2267-2.

MARINUCCI, G., D. A. NISHITSUJI, M. C. EVORA, L. G. A. SILVA. Cationic concentration effects on electron beam cured of carbon-epoxy composites, **Institute of Advanced Studies, CTA**, V. 79, Issue 3, p. 306-309,2010

MARQUES, F. M. B., REDDY A. A., PASCUAL M. J., SANTOS . Delamination analysis of carbon fiber reinforced laminates: Evaluation of a special step drill. **Composites Science and Technology**, v. 69, p.2376-2382, 2014.

NEUBAUER, R. AME FALLISCH, DAVID STUWE, DIRK WAGENMANN. Inkjet structured EWT silicon solar cells with evaporated aluminum metallization and laser-fired contacts. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Article number 5614481, p.3125-3130, 2010.

NORKHAIRUSSHIMA, M.K.; CHEHASSAN M.K.;C.H.; JAHARAH, A.G.; AMIM, A.K.M.AND MDIDRISS, A.N. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fiber reinforced plastic. **Wear**, v.302, p.1113–1123, 2013.

NIEMINEM, I.; PARO, J. KAUPPINEN, V. High-Speed Milling of Advanced Materials. **Journal of Materials Processing Technology**, v.56, p.24-36, 2012.

OKAYASU M, TOMOHURO YAMAZAKI, KOHEI OTA, KEIJI OGI. . Mechanical properties and failure characteristics of a recycled PRFC under tensile and cyclic loading. **International Journal of Fatigue**, v.55, p.257-267 2013.

OWEN, J.M, ROY TEUBER, YAN SHENG, JOHN MALTSON, GARY D. LOCK. Computational extrapolation of turbine sealing effectiveness from test rig to engine conditions, **ASME Turbo Expo 2012 - Turbine Technical Conference and Exposition**, Volume 4, p.1971-1982, Denmark, 2012.

QUINTERO, F.; RIVEIRO, A.; LUSQUIÑOSA, F.; COMESAÑA, R., POUA, J. CO2 laser cutting of phenolic resin boards, **Journal of Materials Processing Technolog**, v. 211, p.1710-1718, 2011.

RUSINEK, RAFAL. Cutting process of composite materials: An experimental study. **International Journal of Non-Linear Mechanics**. V.45, p.458–462, 2010.

RAJAN, H.B.M.; RAMABALAN, S.; DINAHARAN, I., VIJAY, S.J. Effect of TiB2 content and temperature on sliding wear behavior of AA7075/TiB2 in situ aluminum cast composites. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. Article in Press, p.1-7, 2013.

RAMULU M., MILLER J., ENEYEW. E. D. Machining and drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites, **Boeing Company**, v. 49, Issue 2, p.36-46, 2013.

RAWAT, B. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fiber composites. **Wear**, v.267, p.1022–1030, 2009.

RAWLINGS, R. D., ATIQ S., BOCCACCINI A. R.. Behavior of a commercial wired glass under low energy ballistic impact, **Glass Science Technol.** V. 77, p. 31-35, 2004.

REZENDE, M.C. Nano structured composites based on carbon nano tubes and epoxy resin for use as radar absorbing materials, **Materials Division, Institute of Aeronautics and Space.** V. 16, Issue 6, p.1299-1308, 2013.

RUSINEK, A. Method for determination of the dynamic elastic modulus for composite materials. **National Engineering School of Metz ENIM, Laboratory of Mechanics,** V. 61, Issue 4, p.301-315, 2013.

SAHOO, A.K.; PRADHAN, S., ROUT, A.K. Development and Machinability assessment in turning Al/SiCp-metal matrix composite with multilayer coated carbide insert using Taguchi and statistical techniques. **Archives of civil and Mechanical Engineering,** v.13, p.27-35, 2013.

SANDVIK COROMANT. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant>. Acesso em 11/2013.

SANTHANAKRISHNAN, G.; KRISHNAMURTHY, R., MALHOTRA, S. K. Preliminary investigations on machining of advanced fibrous composites. **Advanced Materials: Performance Through Technology Insertion.** v.38.II, p.1700-1709, 1993.

SANTIUSTE C., XAVIER SOLDANI, MARIA HENAR MIGUELEZ. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. **Composites Structures.** V. 92, p.691-698, 2010.

SAVAGE, Gary. **Carbon/carbon composites.** London: Chapman & Hall, 1993, 389p.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles.** Oxford University Press, New York, USA, 1986.

SHERMAN, D., SHAY HAMER, HERMAN LEIBORICH, ANTHONY GREEN, RON AVRAHAMI. Mode I, Mode II and fracture energy of MWCNT reinforced nanofibrilmats interleaved carbon/ epoxy laminates. **Department of Materials Science and Engineering,** v.90, p.48-5, 2014.

SHERMAN, M.M. Entry Thermal Protection. **NASA SP 8014. Monography, Langley,** p.1-33, 1968.

SHULZE, M.E. et al. Characterization of the proton beam from the 6.7 MeV LEDA RFQ. **Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference.** Chicago, IL, Category number 01, code 37268, Code 59085, General Atomics, 2001.

SMITH, C. S., SINCHENKO E., STODDART P. R. Distributed fluorescence sensing using exposed core micro structured optical fiber. **IEEE Photonics Technology Letters.** Centre of Expertise in Photonics, Institute of Photonics and Advanced Sensing, V. 22, Issue 18. Article number 5512585, p.1385-1387 2010.

SEIN LEUNG SOO, ISLAM S. SHYHAI, TOM BARNET, DAVID K. ASPINWAL, WEI-MING SIM. Grinding performance and workpiece integrity when superabrasive edge routing carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.61, p.295–298, 2012.

STACHOWIAK, G.W., PAWEL PODSIADLO. Directional multiscale analysis and optimization for surface textures. **Tribology Laboratory. School of Mechanical and Chemical Engineering**. V. 49, Issue 1, p.179-191, 2013.

SUI, GANG.; SUN, FENGJIE.; YANG, XIAOPING; JI, JIANYING and ZHONG, WEIHONG. Highly aligned polyacrylonitrile based nano scale carbon fibers with homogeneous structure and desirable properties. **Composite Science Technology**. v.87, p.77-85, 2013.

SUTTON M., et al., A multidisciplinary design environment for composite rotor blades, 53<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Code 98132, United States, (2012).

SUTTON, George W., ROHL P. J., DORMAN P., KUMAR D., CESNIK C S. E. Ablation of Reinforced Plastics in Supersonic Flow. **Journal of the Aerospace Sciences**. V. 27, Issue. 5, p.377-385, 1960.

SCHULZE, V.; BECKE, C., PABST, R. Specific machining forces and resultant force vectors for machining of reinforced plastics. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v.60, p.69–72, 2011.

TAKESHITA, H.T., KOJI TANAKA, KOSUKE KURUMATANI, HIROSHI MIYAMURA. The effect of initial structures of Mg/Cu super-laminates on hydrogen absorption/desorption properties, **Composites**, v. 580, Issue.1, p.222-225 2013

TANG T., FELICELLI, S.D. A multiscale model for electro thermo elastoplastic piezoelectric metal matrix multifunctional composites, **International Journal of Engineering Science**, v.73, P.1-9, 2013.

TASKESEN A., KÜTÜKDE, K. Experimental investigation and multi-objective analysis on drilling of boron carbide reinforced metal matrix composites using grey relational analysis, **Measurements**. v.47, p.321-330, 2013.

TETI, R. Machining of Composite Materials. **CIRP Annals—Manufacturing Technology**, v.51, p.611–634, 2002.

THOMAS, C. R. Essentials of carbon/carbon composites. **Cambridge: The Royal Society Chemistry**. pp 233, 1993.

TAYLOR, FREDERICK WINSLOW. **The Principles of Scientific Management and Testimony Before the Special House Committee**. Harper & Row, 1911

TANG, YOUHONG; YE, LIN; ZHANG, Zhong, and FRIEDRICH, Klaus. Inter laminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nano particles – A review. **Composite Science and Technology**. 86, p.26-37, Germany (2013).

TORRES-TREVIÑO, L.M.; ESCAMILLA-SALAZAR I. G., GONZÁLEZ-ORTIZ B., PRAGA-ALEJO, R. An expert system for setting parameters in machining processes. **Expert Systems with Applications**, v 40, p.6877-6884, 2013.

TRIOLA, MÁRIO F. **Introdução à Estatística**. 7a. Edição, Rio de Janeiro, LTC Editora, 1999.

WANG, X.; KWON, P.Y.; STURTEVANT, C.; KIM, D.D.W.and LANTRIP, J. Tool wear of coated drills in drilling CFRP. **Journal of Manufacturing Processes**, v.15, p.127–135, 2013.

WOLFGANG HINTZE, DIRK HARTMANN, CHRISTOPH SCHUTTE. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study. **Composites Science and Technology**. 71, p.1719-1726, 2011.

YASHIRO, T.; OGAWA, T.; SASAHARA, H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.70, p.63–69, 2013.

ZAGHBANI, I.; CHATELAIN, J.F.; Victor SONGMENE, V.; BÉRUBÉ, S.; ATARSIA, A. A comprehensive analysis of cutting forces during routing of multilayer carbon fiber reinforced polymer laminates. **Journal of Composite Materials**, v.46, p.1955–1971, 2012.

ZWEBEN, S.J et al. Comparison of edge turbulence imaging at two different poloidal locations in the scrape-off layer of Alcator. **Physics of Plasma**. V.20, pasta 7, 2013.



## ANEXO 1

Parâmetros de Corte e Resultados das Medidas do Desgaste VBmax da Fresa em [ $\mu_m$ ]. O cálculo do Desvio Padrão Amostral foi realizado utilizando o EXCEL 2007 e do número mínimo de amostra foi calculado pela Equação 12

**Velocidade de corte 100 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128
$l_f$ [mm]	4,800	9,600	14,400	19,200	24,000	28,800	33,600	38,400	43,200	48,000	52,800	57,600	62,400	67,200	72,000	76,800
<b>Ferramenta 4</b> <b>D = 8 [mm]</b> $v_c = 100$ [m/min] $f_z = 0,075$ [mm/dente/rot] $v_f = 298,41$ [mm/min] <b>Rotação = 3978,86 [rpm]</b>	104,17	135,42	145,83	177,08	187,50	197,92	208,33	218,75	229,17	239,58	260,42	270,83	302,08	302,80	302,80	322,92
	104,17	125,00	145,83	177,08	177,08	187,50	197,92	208,33	218,75	239,58	260,42	260,42	281,25	302,80	312,50	312,50
	104,17	125,00	145,83	156,25	187,50	187,50	208,33	218,75	218,75	239,58	260,42	260,42	281,25	302,80	312,50	322,92
	114,58	135,42	135,42	145,83	187,50	187,50	197,92	208,33	218,75	250,00	260,42	270,83	270,83	291,67	302,80	322,92
	114,58	125,00	145,83	177,08	177,08	187,50	197,92	208,33	218,75	250,00	239,58	270,83	281,25	291,67	312,50	312,50
	104,15	125,00	145,83	166,67	187,50	197,92	197,92	218,75	229,17	239,58	250,00	270,83	302,08	302,80	312,50	322,92
<b>Média</b>	<b>107,63</b>	<b>128,47</b>	<b>144,09</b>	<b>166,66</b>	<b>184,03</b>	<b>190,97</b>	<b>201,39</b>	<b>213,54</b>	<b>222,22</b>	<b>243,05</b>	<b>255,21</b>	<b>267,36</b>	<b>286,46</b>	<b>299,09</b>	<b>309,27</b>	<b>319,45</b>
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>4,25</b>	<b>13,18</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>5,71</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>8,72</b>	<b>5,38</b>	<b>12,76</b>	<b>5,75</b>	<b>5,01</b>	<b>5,38</b>
<b>Número de réplicas <sup>(*)</sup></b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>16,08</b>	<b>32,17</b>	<b>48,25</b>	<b>64,34</b>	<b>80,42</b>	<b>96,51</b>	<b>112,59</b>	<b>128,68</b>	<b>144,76</b>	<b>160,85</b>	<b>176,93</b>	<b>193,02</b>	<b>209,10</b>	<b>225,19</b>	<b>241,27</b>	<b>257,36</b>

<sup>(\*)</sup> Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 5µm na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis.

**Velocidade de corte 200 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88				
<b><math>l_f</math> [mm]</b>	<b>4,800</b>	<b>9,600</b>	<b>14,400</b>	<b>19,200</b>	<b>24,000</b>	<b>28,800</b>	<b>33,600</b>	<b>38,400</b>	<b>43,200</b>	<b>48,000</b>	<b>52,800</b>				
<b>Ferramenta 5</b> <b>D = 8 [mm]</b> $v_c = 200$ [m/min] $f_z = 0,075$ [mm/dente/rot] $v_f = 596,83$ [mm/min] <b>Rotação = 7957,73 [rpm]</b>	114,58	135,42	156,25	166,67	187,50	197,92	218,75	239,58	260,42	291,67	291,67				
	104,17	135,42	156,25	177,08	197,92	208,33	208,33	250,00	270,83	281,25	291,67				
	104,17	135,42	156,25	166,67	197,92	208,33	218,75	250,00	270,83	281,25	291,67				
	114,58	125,00	156,25	177,08	187,50	197,92	218,75	250,00	260,42	281,25	302,80				
	104,17	125,00	156,25	177,08	187,50	208,33	208,33	239,58	270,83	281,25	302,80				
	104,17	125,00	156,25	177,08	166,67	208,33	218,75	239,58	281,25	281,25	302,80				
<b>Média</b>	<b>107,64</b>	<b>130,21</b>	<b>156,25</b>	<b>173,61</b>	<b>187,50</b>	<b>204,86</b>	<b>215,28</b>	<b>244,79</b>	<b>269,10</b>	<b>282,10</b>	<b>297,23</b>				
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>5,38</b>	<b>5,21</b>	<b>0</b>	<b>4,91</b>	<b>10,42</b>	<b>4,91</b>	<b>4,91</b>	<b>5,21</b>	<b>7,16</b>	<b>3,88</b>	<b>5,57</b>				
<b>Número de Réplicas <sup>(*)</sup></b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>5</b>				
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>8,04</b>	<b>16,08</b>	<b>24,13</b>	<b>32,17</b>	<b>40,21</b>	<b>48,25</b>	<b>56,30</b>	<b>64,34</b>	<b>72,38</b>	<b>80,42</b>	<b>88,47</b>				

<sup>(\*)</sup> Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 5 $\mu$ m na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis.

**Velocidade de corte 300 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88				
<b><math>l_f</math> [mm]</b>	<b>4,800</b>	<b>9,600</b>	<b>14,400</b>	<b>19,200</b>	<b>24,000</b>	<b>28,800</b>	<b>33,600</b>	<b>38,400</b>	<b>43,200</b>	<b>48,000</b>	<b>52,800</b>				
<b>Ferramenta 2</b> <b>D = 8 [mm]</b> <b>Vc = 300 [m/min]</b> <b>fz = 0,075 [mm/dente/rot]</b> <b><math>v_f</math> = 895,24 [mm/min]</b> <b>Rotação = 11936,59 [rpm]</b>	114,58	145,83	166,67	187,5	197,92	218,75	229,17	250,00	250,00	291,67	302,00				
	114,58	156,25	177,08	187,5	208,33	208,33	229,17	239,58	270,83	281,25	302,80				
	114,58	145,83	166,67	197,92	208,33	218,75	229,17	239,58	270,83	281,25	312,50				
	114,58	145,83	166,67	177,08	197,92	218,75	229,17	250,00	281,25	281,25	312,50				
	114,58	145,83	166,67	187,50	187,50	218,75	229,17	239,58	250,00	281,25	312,50				
	114,58	145,83	166,67	177,08	208,33	208,33	229,17	250,00	270,00	281,25	302,80				
<b>Média</b>	<b>114,58</b>	<b>147,57</b>	<b>168,40</b>	<b>185,76</b>	<b>201,39</b>	<b>215,28</b>	<b>229,17</b>	<b>244,79</b>	<b>265,48</b>	<b>282,99</b>	<b>307,52</b>				
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>0,00</b>	<b>4,25</b>	<b>4,25</b>	<b>7,84</b>	<b>8,50</b>	<b>5,38</b>	<b>0,00</b>	<b>5,71</b>	<b>12,69</b>	<b>4,25</b>	<b>5,47</b>				
<b>Número de Réplicas <sup>(*)</sup></b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>3</b>	<b>5</b>				
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>5,36</b>	<b>10,72</b>	<b>16,08</b>	<b>21,45</b>	<b>26,81</b>	<b>32,17</b>	<b>37,53</b>	<b>42,89</b>	<b>48,25</b>	<b>53,62</b>	<b>58,98</b>				

<sup>(\*)</sup> Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 5  $\mu$ m na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis.

**Velocidade de corte 400 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64								
<b><math>I_f</math> [mm]</b>	<b>4,800</b>	<b>9,600</b>	<b>14,400</b>	<b>19,200</b>	<b>24,000</b>	<b>28,800</b>	<b>33,600</b>	<b>38,400</b>								
<b>Ferramenta 6</b> <b>D = 8 [mm]</b> <b><math>v_c = 400</math> [m/min]</b> <b><math>f_z = 0,075</math> [mm/dente/rot]</b> <b><math>v_f = 1193,66</math> [mm/min]</b> <b>Rotação = 15915,46 [rpm]</b>	135,42	177,08	208,33	229,17	250,00	<b>291,67</b>	<b>302,80</b>	312,50								
	135,42	187,50	<b>218,75</b>	239,58	260,42	281,25	281,25	302,80								
	145,83	187,50	<b>218,75</b>	239,58	250,00	281,25	291,67	302,80								
	145,83	177,08	208,33	229,17	250,00	270,83	291,67	312,50								
	135,42	177,08	197,92	239,58	239,58	270,83	291,67	302,80								
	135,42	177,08	208,33	239,58	239,58	281,25	291,67	302,80								
<b>Média</b>	<b>138,89</b>	<b>180,55</b>	<b>210,07</b>	<b>236,11</b>	<b>248,26</b>	<b>279,51</b>	<b>291,79</b>	<b>306,03</b>								
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>7,84</b>	<b>5,38</b>	<b>7,84</b>	<b>7,85</b>	<b>6,82</b>	<b>5,01</b>								
<b>Número de Réplicas <sup>(*)</sup></b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>2</b>								
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>4,02</b>	<b>8,04</b>	<b>12,06</b>	<b>16,08</b>	<b>20,11</b>	<b>24,13</b>	<b>28,15</b>	<b>32,17</b>								

<sup>(\*)</sup> Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 7  $\mu$ m na medida do desgaste. Os valores foram mais aleatórios que os outros ensaios e, neste caso foi admitido um erro um pouco maior, mas ainda dentro de um valor aceitável.

**Velocidade de corte 500 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48										
<b><math>I_f</math> [mm]</b>	<b>4,800</b>	<b>9,600</b>	<b>14,400</b>	<b>19,200</b>	<b>24,000</b>	<b>28,800</b>										
<b>Ferramenta 7</b> <b>D = 8 [mm]</b> $v_c = 500$ [m/min] $f_z = 0,075$ [mm/dente/rot] $v_f = 1492,07$ [mm/min] <b>Rotação = 19894,32 [rpm]</b>	125,00	145,83	187,50	208,33	218,75	250,00										
	125,00	145,83	187,50	208,33	239,58	260,42	<b>Quebrou com 50 PASSES</b>									
	125,00	166,67	187,50	208,33	239,58	260,42										
	145,83	166,67	187,50	218,75	239,58	206,42										
	135,42	177,08	187,50	218,75	229,17	250,00										
	135,42	177,08	177,08	208,33	239,58	250,00										
<b>Média</b>	<b>131,94</b>	<b>163,19</b>	<b>185,76</b>	<b>211,80</b>	<b>234,37</b>	<b>246,21</b>										
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>8,50</b>	<b>14,23</b>	<b>4,25</b>	<b>5,38</b>	<b>8,71</b>	<b>20,15</b>										
<b>Número de Réplicas (*)</b>	<b>6</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>32</b>										
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>3,22</b>	<b>6,43</b>	<b>9,65</b>	<b>12,87</b>	<b>16,08</b>	<b>19,30</b>										

(\*) Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 7  $\mu$ m na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis. Neste caso, também um erro maior foi admitido.

**Velocidade de corte 600 m/min e Avanço de 0,075 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88					
$l_f$ [mm]	4,800	9,600	14,400	19,200	24,000	28,800	33,600	38,400	43,200	48,000	52,800					
<b>Ferramenta 8</b> <b>D = 8 [mm]</b> $v_c = 600$ [m/min] $f_z = 0,075$ [mm/dente/rot] $v_f = 1790,49$ [mm/min] Rotação = 23873,19 [rpm]	125,00	145,83	177,08	187,50	218,75	218,75	229,17	239,58	270,83	281,25	312,50					
	145,83	156,25	177,08	197,92	208,33	218,75	239,58	250,00	270,83	291,67	322,92					
	145,83	156,25	187,5	197,92	208,33	218,75	239,58	260,42	281,25	291,67	322,92					
	135,42	156,25	177,08	208,33	208,33	229,17	229,17	260,42	281,25	291,67	312,5					
	135,42	145,83	177,08	197,92	208,33	218,75	239,58	250,00	270,83	291,67	322,92					
	125,00	156,25	187,50	197,92	208,33	208,33	239,58	260,42	281,25	281,25	322,92					
<b>Média</b>	<b>135,417</b>	<b>152,78</b>	<b>180,55</b>	<b>197,92</b>	<b>210,07</b>	<b>218,75</b>	<b>236,11</b>	<b>253,47</b>	<b>276,04</b>	<b>288,20</b>	<b>319,45</b>					
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	<b>9,32</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>	<b>6,59</b>	<b>4,25</b>	<b>6,59</b>	<b>5,38</b>	<b>8,51</b>	<b>5,71</b>	<b>5,38</b>	<b>5,38</b>					
<b>Número de Réplicas (*)</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>					
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	<b>2,68</b>	<b>5,36</b>	<b>8,04</b>	<b>10,72</b>	<b>13,40</b>	<b>16,08</b>	<b>18,77</b>	<b>21,45</b>	<b>24,13</b>	<b>26,81</b>	<b>29,49</b>					

(\*) Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 6  $\mu$ m na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis. Neste caso, também um erro maior foi admitido.



## ANEXO 2

Parâmetros de Corte e Resultados das Medidas do Desgaste VBmax da  
Fresa Fresa em [ $\mu\text{m}$ ]

**Velocidade de corte 100 m/min e fz de 0,1 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128
If [mm]	4,800	9,600	14,400	19,200	24,000	28,800	33,600	38,400	43,200	48,000	52,800	57,600	62,400	67,200	72,000	76,800
<b>Ferramenta 3</b> <b>d = 8 [mm]</b> <b>vc = 100[m/min]</b> <b>fz = 0,1 [mm/dente/rot]</b> <b>vf = 397,89 [mm/min]</b> <b>Rotação = 3978,86 [rpm]</b>	114,58	114,58	145,83	166,67	187,50	187,50	208,33	208,33	218,75	229,17	250,00	260,42	270,83	302,80	312,50	312,50
	104,17	125,00	145,83	177,08	187,50	197,92	208,33	218,75	229,17	239,58	250,00	260,42	281,25	291,67	312,50	322,92
	104,17	135,42	145,83	177,08	187,50	197,92	208,33	218,75	239,58	239,58	250,00	270,83	281,25	291,67	312,50	333,33
	114,58	125,00	145,83	166,67	177,08	208,33	208,33	218,75	229,17	250,00	250,00	260,42	291,67	302,80	312,50	333,33
	114,58	125,00	156,25	166,67	187,50	208,33	208,33	218,75	229,17	239,58	260,42	270,83	281,25	291,67	312,50	322,92
	114,58	135,42	145,83	166,67	177,08	197,92	208,33	218,75	218,75	239,58	260,42	270,83	281,25	302,80	312,50	322,92
<b>Média</b>	111,11	126,74	147,57	170,14	184,03	199,65	208,33	217,01	227,43	239,58	253,47	265,62	281,25	297,23	312,	324,65
<b>Desvio Padrão Amostral</b>	5,38	7,84	4,25	5,38	5,38	7,84	0,00	4,25	7,84	6,59	5,38	5,70	6,59	6,10	0,00	7,84
<b>Número de Réplicas (*)</b>	2	5	1	2	2	5	0	1	5	3	2	3	3	3	0	5
<b>Tempo de Corte (vida)</b>	12,06	24,13	36,19	48,25	60,32	72,38	84,45	96,51	108,57	120,64	132,70	144,76	156,83	168,89	180,96	193,02

(\*) Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 7 µm na medida do desgaste. Neste caso foi usado um erro maior também.

**Velocidade de corte 300 m/min e fz de 0,1 mm/dente/rot.**

No. de passes	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88					
If [mm]	4,800	9,600	14,400	19,200	24,000	28,800	33,600	38,400	43,200	48,000	52,800					
<b>Ferramenta 1</b> <b>d = 8 [mm]</b> <b>vc = 300 [m/min]</b> <b>fz = 0,1 [mm/dente/rot]</b> <b>vf = 1193,66 [mm/min]</b> <b>Rotação = 11936,59 [rpm]</b>	145,83	156,25	187,5	208,33	218,75	229,17	239,58	250,00	270,83	270,83	291,97					
	135,42	166,67	187,5	197,92	218,75	229,17	239,58	250,00	260,42	291,67	302,80					
	135,42	166,67	166,67	197,92	218,75	218,75	239,58	250,00	260,42	281,25	302,80					
	145,83	156,25	187,5	197,92	218,75	218,75	239,58	239,58	270,83	281,25	302,80					
	135,42	156,25	166,67	197,92	197,92	229,75	239,58	260,42	270,83	281,25	291,97					
	135,42	166,67	187,5	197,92	208,33	229,75	229,17	250,00	270,83	291,97	302,80					
Média	138,89	161,46	180,56	199,66	213,54	225,89	237,84	250,00	267,36	283,04	299,19					
Desvio Padrão Amostral	5,38	5,71	10,76	4,25	8,71	5,54	4,25	6,59	5,38	7,91	5,59					
Número de Réplicas (*)	4	5	18	3	12	5	3	7	4	10	5					
Tempo de Corte (vida)	4,02	8,04	12,06	16,08	20,11	24,13	28,15	32,17	36,19	40,21	44,23					

(\*) Número mínimo de réplicas para 95% de probabilidade e um erro de 5 µm na medida do desgaste. Nas células claras o número de réplicas foi insuficiente. Poderiam ser descartados, porém foram mantidos diante do grande número de resultados confiáveis.



### **ANEXO 3**

Cálculo do número mínimo de amostras para determinação do RMS das forças  $F_x$  e  $F_y$  para um erro estimado em 20 N com 95% de probabilidade. Apresentação de registro típico para cada condição de velocidade de corte e avanço. Foram realizadas 4 replicações para cada condição.

Velocidade de Corte 100 m/min/ Avanço 0.075 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
<b>cdp1</b>	181,4	199,6	26,8	18,2
<b>cdp2</b>	183,7	210,3	31,2	18,6
<b>cdp3</b>	182,9	217,4	29,8	18,8
<b>cdp4</b>	183,3	228,8	32,6	18,7
<b>Médias</b>	182,9	<b>214,0</b>	<b>30,1</b>	<b>18,6</b>

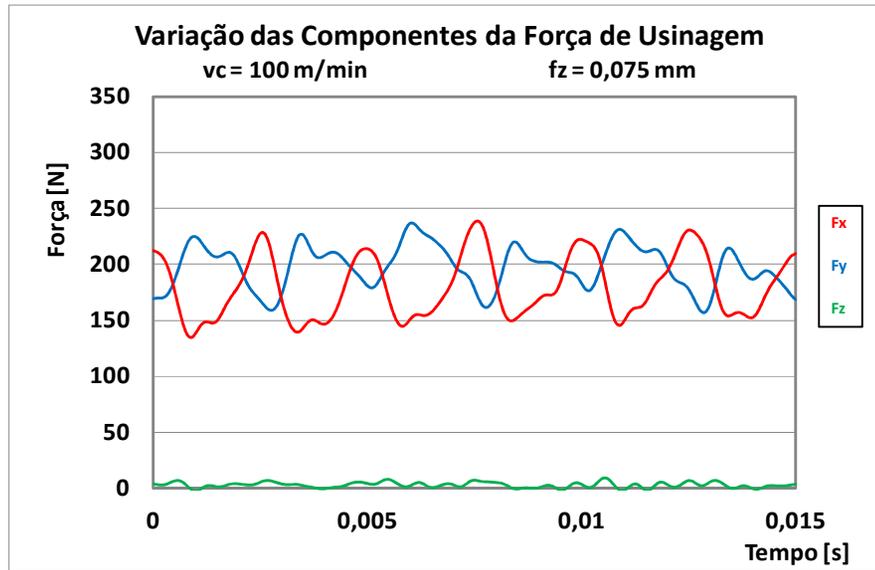
$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 30,1}{20} \right)^2 = 8,7$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 18,6}{20} \right)^2 = 3,3$$

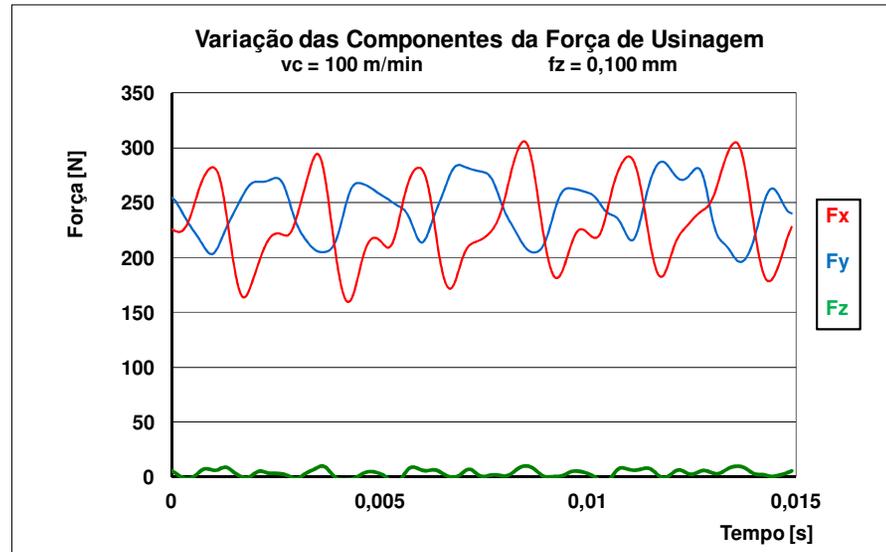
Velocidade de Corte 100 m/min/ Avanço 0.1 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
<b>cdp1</b>	235,2	245,5	37,3	21,0
<b>cdp2</b>	232,2	252,9	38,1	20,1
<b>cdp3</b>	230,3	253,7	36,7	20,6
<b>cdp4</b>	231,8	266,1	37,7	19,5
<b>Médias</b>	<b>232,4</b>	<b>254,6</b>	<b>37,4</b>	<b>20,3</b>

$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 37,4}{20} \right)^2 = 13,4$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 20,3}{20} \right)^2 = 4,0$$



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 100$  m/min é de 0,0152 s.



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 100$  m/min é de 0,0152 s.

Velocidade de Corte 200 m/min/ Avanço 0.075 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
cdp1	190,4	279,2	45,3	23,3
cdp2	193,8	282,7	43,5	24,9
cdp3	186,7	282,8	31,5	23,6
cdp4	193,1	295,5	40,8	24,0
<b>Médias</b>	<b>191,0</b>	<b>285,1</b>	<b>40,3</b>	<b>23,9</b>

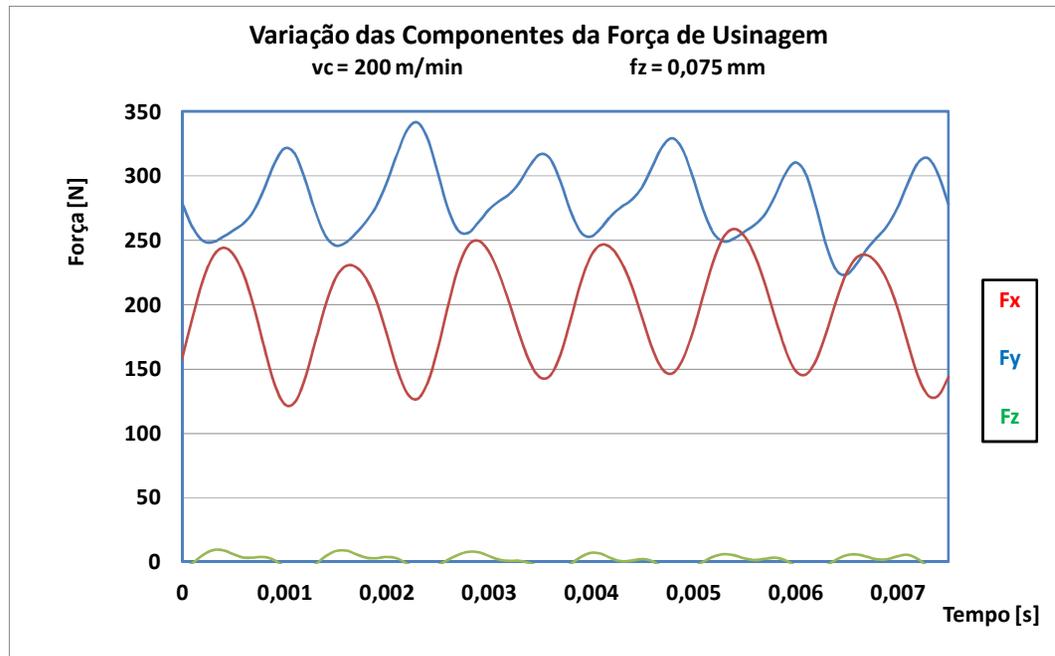
$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 40,3}{20} \right)^2 = 15,6$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 23,9}{20} \right)^2 = 5,5$$

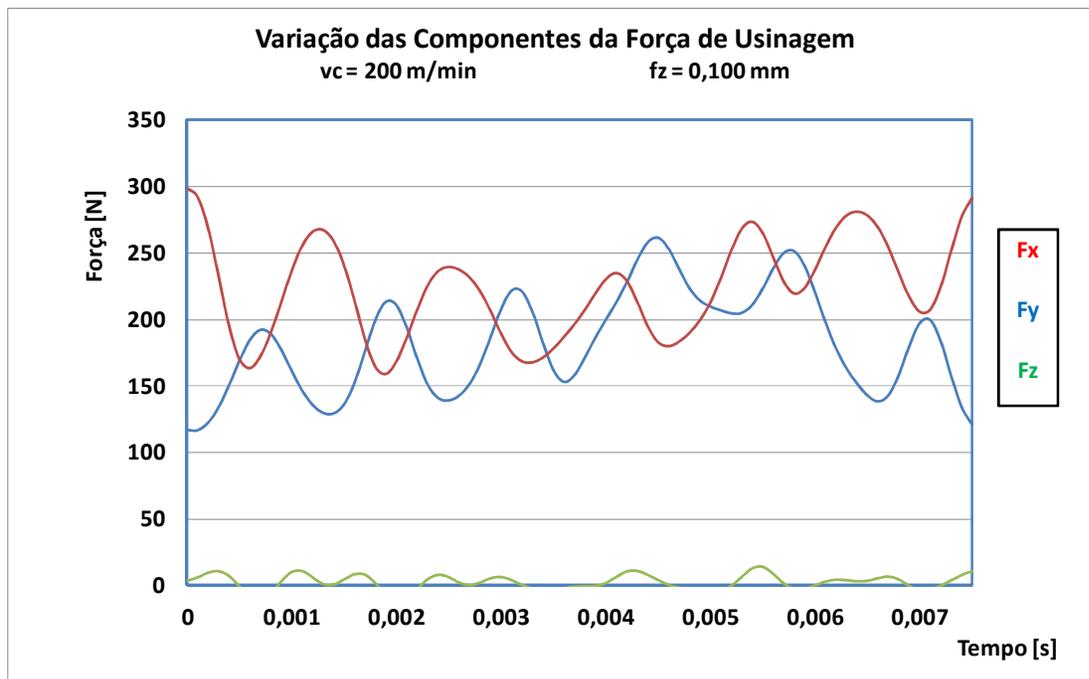
Velocidade de Corte 200 m/min/ Avanço 0.1 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
<b>cdp1</b>	188,1	225,6	36,0	37,0
<b>cdp2</b>	202,2	230,5	41,0	35,5
<b>cdp3</b>	211,7	232,3	41,6	32,9
<b>cdp4</b>	229,9	236,7	51,1	30,3
<b>Médias</b>	<b>208,0</b>	<b>231,3</b>	<b>42,4</b>	<b>33,9</b>

$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 42,4}{20} \right)^2 = 17,3$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 33,9}{20} \right)^2 = 11,0$$



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 200$  m/min é de 0,00754 s.



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 200$  m/min é de 0,00754 s.

Velocidade de Corte 300 m/min/ Avanço 0.075 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
<b>cdp1</b>	185,4	241,2	16,0	19,8
<b>cdp2</b>	190,4	252,2	16,5	19,5
<b>cdp3</b>	190,1	257,1	16,8	19,5
<b>cdp4</b>	195,8	272,2	16,9	21,5
<b>Médias</b>	<b>190,4</b>	<b>255,7</b>	<b>16,5</b>	<b>20,1</b>

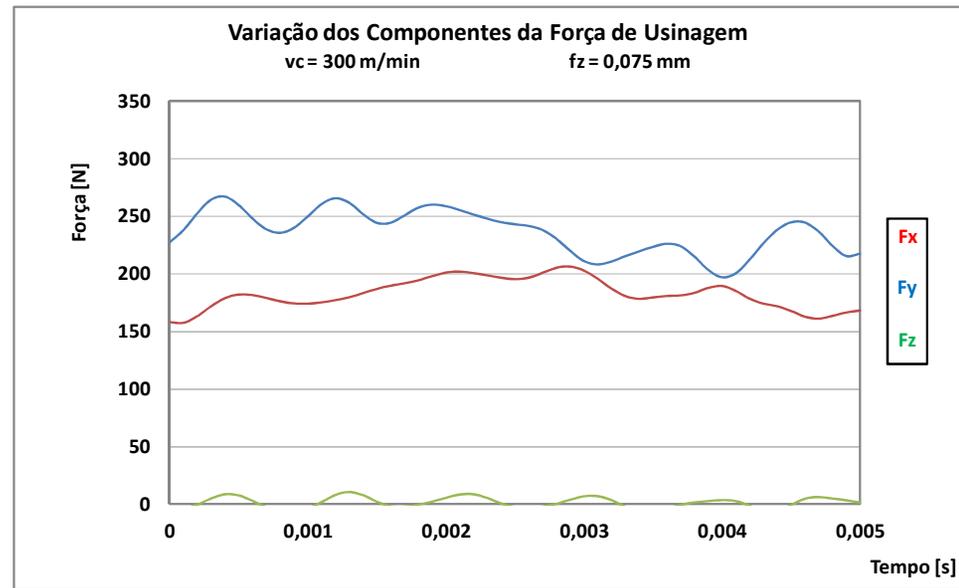
$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 16,5}{20} \right)^2 = 2,6$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 20,1}{20} \right)^2 = 3,9$$

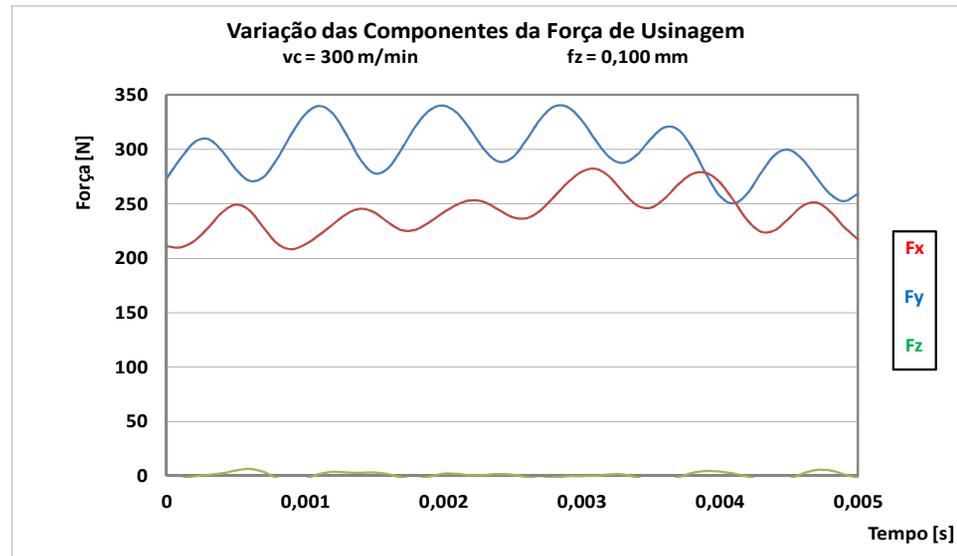
Velocidade de Corte 300 m/min/ Avanço 0.1 mm/dente/rot				
	RMS Fx	RMS Fy	DesPad Fx	DesPad Fy
<b>cdp1</b>	242,6	299,5	20,0	24,0
<b>cdp2</b>	246,0	308,1	20,6	26,5
<b>cdp3</b>	247,6	312,1	21,0	24,6
<b>cdp4</b>	250,6	325,7	22,1	21,6
<b>Médias</b>	<b>246,7</b>	<b>311,3</b>	<b>20,9</b>	<b>24,2</b>

$$n_x = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 20,9}{20} \right)^2 = 4,2$$

$$n_y = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \times \sigma}{ERRO} \right)^2 = \left( \frac{1,96 \times 24,2}{20} \right)^2 = 5,6$$



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 300$  m/min é de 0,00503 s.



Observação: Uma volta completa da fresa para  $vc = 300$  m/min é de 0,00503 s.

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	0,01 mm/dente/rot
	Força Resultante no eixo X	
100	182,9	232,9
200	191,0	231,3
300	190,4	246,7

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	0,01 mm/dente/rot
	Força Resultante no eixo Y	
100	214,0	254,6
200	285,1	208,0
300	255,7	311,3

Velocidades de corte m/min	0,075 mm/dente/rot	
	Força Resultante no eixo X	Força Resultante no eixo Y
100	182,9	214,0
200	191,0	285,1
300	190,4	255,7

Velocidades de corte m/min	0,01 mm/dente/rot	
	Força Resultante no eixo X	Força Resultante no eixo Y
100	232,9	254,6
200	231,3	208,0
300	246,7	311,3