

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR FRANCISCO ROMEO MARTINS
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 29/JUNHO/2000

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Uma Contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono

Autor: **Francisco Romeo Martins**
Orientador: **Prof. Dr. Nivaldo L. Coppini**

084/2000

i

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

129510000

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

Uma Contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono

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

Curso: Engenharia Mecânica
Área de concentração: Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000
S.P. - Brasil



UNIDADE BC

N.º CHAMADA:
T/Unicomp
M366c

V. Ex.

TOMBO BC/ 43357

PROC. 278/2000

C D

PREÇO R\$ 11,00

DATA 03/01/2001

N.º CPD

CM-00154342-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M366c Martins, Francisco Romeo
Uma contribuição à usinagem do compósito carbono reforçado com fibras de carbono / Francisco Romeo Martins. -- Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Nivaldo L. Coppini.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

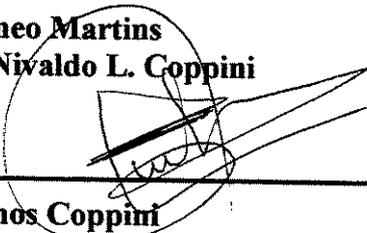
1. Usinagem. 2. Compósitos poliméricos. 3. Carbono. 4. Ferramentas para cortar metais. 5. Oxidação. I. Coppini, Nivaldo L. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**

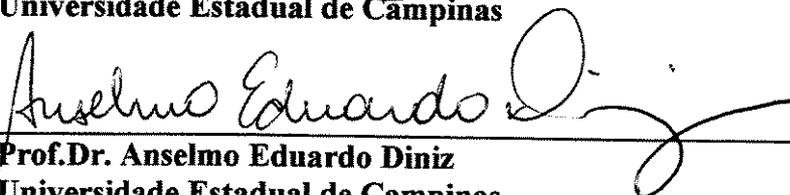
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Uma Contribuição à Usinagem do Compósito
Carbono Reforçado com Fibras de Carbono**

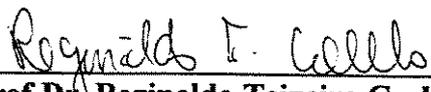
Autor: Francisco Romeo Martins
Orientador: Prof. Dr. Nivaldo L. Coppini



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho
Escola de Engenharia de São Carlos

Campinas, 29 de junho de 2000

Dedicatória :

Dedico esse trabalho à todos aqueles que lutam, trabalham e se esforçam para o bem de nosso país.

Dedico ao meu pai, que enquanto viveu não mediu esforços pelo apoio, incentivo e educação, e agora tenho-o comigo nos momentos de hesitação ou falhas, simbolizando a luta e perseverança.

Dedico à minha querida mãe pelas palavras de carinho, pela minha existência, por suas preces constantes e batalhadora incansável pelo bem estar dos filhos.

Aos meus três motivos mais fortes para o êxito desta jornada., meus filhos; Rafael, Filipe e Camila

À minha querida esposa e companheira incansável, que compartilhou este trabalho em todos os momentos, pela sua paciência e dedicação, pelo estímulo constante e pela abnegação das horas de lazer.

À todas as pessoas, que de forma incondicional me incentivaram com seu carinho e compreensão.

Agradecimentos

À Deus pela presença constante, e por ter me proporcionado 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. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, meu orientador, pela confiança, incentivo e pela sua ajuda nos momentos de decisão, e acima de tudo pela amizade e simplicidade. Pela sua atuação como pesquisador e inspirador de inúmeros outros trabalhos.

Ao Prof. Dr. João Roberto Ferreira, meu co-orientador e amigo, pela dedicação, paciência, e parceiro constante em todos os momentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu chefe de divisão (AME) Eng.º Sílvio Roberto Macera, pelo incentivo, apoio e estímulo durante todo o desenvolvimento do trabalho.

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

Aos meus amigos da divisão de mecânica(AME), pelo apoio e incentivo durante todo o desenvolvimento do trabalho, especialmente à Subdivisão de Métodos e Processos pela compreensão, quando ausentei-me das atividades diárias da subdivisão .

Ao Eng.º Homero e integrantes da (AME-C),pela compreensão e paciência e pelas instalações e equipamentos gentilmente cedidos.

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

Ao chefe da Divisão de Materiais (AMR) Cel. Cosme Roberto Moreira da Silva, apoiando no decorrer dos trabalhos com recursos laboratoriais em microscopia ótica e de varredura, especialmente à amiga pesquisadora Mirabel, pelas suas palavras de incentivo e apoio.

À Divisão de Projetos (ASE), apoiando no decorrer dos trabalhos com recursos em informática para simulações estruturais em elementos finitos, através do pesquisador Jimes e as sugestões oportunas do Eng.º Abranches.

Às empresas Cemef Engenharia, Fautec e Mecânica Abril pelo apoio no desenvolvimento das ferramentas.

A todos os professores, funcionários e colegas da FEM/UNICAMP, que colaboraram de forma direta e indireta no decorrer deste trabalho, especialmente aos pesquisadores Durval Uchôa e Gilberto Arena pela amizade e o incentivo .

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

“Onde há uma vontade há um caminho, onde há boa vontade há vários caminhos....”

S. A. Baldacin

Índice

1 - Introdução	1
2 - Compósitos Carbono Reforçado com Fibra de Carbono (CFRC)	4
2.1 Generalidades	4
2.2 Pré-formas de FC	6
2.2.1 Substratos de fibras de carbono	7
2.2.2 Pré-formas multidirecionais obtidas por fibras descontínuas	9
2.3 Obtenção	10
2.4 Propriedades e aplicações	14
2.4.1 Aplicações aeroespaciais	16
2.4.2 Aplicações industriais	16
2.5 Blocos de carbono/carbono para tubeiras	19
2.5.1 Fase de tecelagem	20
2.5.2 Entrelaçamento	20
3 - Usinagem dos Compósitos PRFC/CRFC	23
3.1 Usinagem dos Compósitos PRFC/CRFC	23
3.2 Delaminações	24
3.3 Formação do Cavaco	24
3.4 Desgaste da Ferramenta de Corte	33
3.4.1 Características de Desgaste do Metal Duro (tipo P, tipo K)	38
3.5 Esforços de Corte	41
3.5.1 Alterações dos Esforços em Relação Direção do Corte/Fibra	41
3.5.2 Avaliação da Pressão Específica de Corte	42
3.6 Medida de Forças de Corte	43
3.7 Aspectos de Segurança e Considerações Parciais	45
3.8 Tipos de Ferramentas de Corte	47
3.8.1 Metal Duro	47
3.8.2 Ferramentas Cerâmicas	49
3.8.3 Cerâmica Pura ou Branca	50
3.8.4 Cerâmica Mista	50
3.8.5 Cerâmica Reforçada com Whiskers de SiC	51
3.8.6 Cerâmica a Base de Nitreto de Silício	51

3.8.7 diamante Policristalino Sintético (PCD)	53
3.8.8 Ferramentas de Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN)	54
4 - Trabalho Experimental	56
4.1 Material Compósito CRFC	56
4.2 Ferramentas e Dispositivos	58
4.3 Equipamentos e Instrumentos	60
4.3.1 Máquina ferramenta	60
4.3.2 Dinamômetro	61
4.3.3 Microscópio	62
4.3.4 Sistema de Aspiração e Proteção	62
4.3.5 Sistema de Aquisição de Dados	62
4.3.6 Filmagem com Câmera de Alta Velocidade	65
4.4 Metodologia Experimental	65
4.4.1 Torneamento do Compósito CRFC com Várias Ferramentas de Corte	65
4.4.2 Comportamento do Desgaste das Ferramentas x Condições de Corte	66
5 - Resultados e Discussões	71
5.1 Introdução	71
5.2 Mecanismo de Formação do Cavaco	71
5.3 Comportamento do Desgaste das Ferramentas	74
5.4 Avaliação do Comportamento das Ferramentas de Corte Ensaçadas	77
5.5 Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta	80
5.6 Esforços de Corte	82
5.7 Avanço e Profundidade de Corte	84
5.8 Avaliação da Influência da Temperatura	89
5.9 Ensaio para Verificação do Processo Oxidativo do Compósito CRFC	91
5.9.1 Atmosfera Protetora com Injeção de Gás Argônio	91
5.9.2 Injeção de Mínimo Volume	91
5.9.3 Inundação por Óleo Solúvel - Cerâmica CC650/CC670	91
5.9.4 Inundação por Óleo Solúvel – Metal Duro K10	94
6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	99
Referências Bibliográficas	102
Anexo	113
A - Desenvolvimento de Dinamômetro para Monitoramento dos Esforços de Usinagem em Compósitos CRFC.	113
A.1 Introdução	113
A.2 Requisitos que Devem Satisfazer os Dinamômetros	116
A.3 Considerações para Definição da Geometria do Dinamômetro	116

A.4 Dimensionamento Estrutural do Dinamômetro	119
A.5 Estabelecimento das Condições Limites de Trabalho do Dinamômetro	119
A.6 Posicionamento dos Extensômetros	121
A.7 Análise Estrutural da Junta Flexível do Dinamômetro	122
A.8. Calibração Estática do Dinamômetro	124

Resumo

MARTINS, Francisco Romeo, Uma Contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000,. N.º 125. Dissertação (Mestrado)

Este trabalho inicialmente apresenta um histórico do desenvolvimento e obtenção do carbono reforçado com fibra de carbono, suas aplicações e suas propriedades mecânicas. Apresenta os resultados obtidos durante a usinagem, o comportamento do desgaste das ferramentas de corte aplicadas, tais como; metal duro K10, metal duro com cobertura, cerâmica mista, cerâmica reforçada com whiskers e diamante policristalino (PCD). Entre as ferramentas ensaiadas a que apresentou melhor resultado foi o diamante policristalino (PCD), mostrando ser adequada para aplicações em usinagens de acabamento. Optou-se pela aplicação da ferramenta de metal duro K10, devido à mesma apresentar nível de desgaste moderado e permitir uma melhor análise de comportamento. Foram medidos desgaste e avarias das ferramentas, forças de corte e avanço, e monitorando o comportamento da temperatura durante os testes. Para avaliação do mecanismo de formação do cavaco foi feita uma filmagem em alta velocidade. Utilizou-se durante a usinagem meios refrigerantes inibindo o aumento da temperatura procurando esclarecer o comportamento do desgaste da ferramenta frente a um possível processo de oxidação do compósito.

Palavras Chave

Usinagem, Compósitos, Carbono, Desgaste das Ferramentas, Forças de Usinagem, Oxidação.

Abstract

MARTINS, Francisco Romeo, Machining Contribution of the Carbon Fiber Reinforced Carbon Composite, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000,. N.º pag. 125. Dissertação (Mestrado)

Firstly, this work presents a history of the development and obtaining process of the carbon fiber reinforced carbon composite, its applications and its mechanical properties. It presents the results obtained during the machining, the behavior of the wear on the applied cutting tools such as cemented carbide grade K10, coated cemented carbide, mixed ceramic, ceramic reinforced with whiskers and diamond (PCD). Among the experimented tools the one that showed better result was the diamond (PCD), showing to be adapted for applications in finish machining. Selected for the tool application the tool of cemented carbide K10, due to the fact it presented a level of moderate wear and to allow a better analysis of behavior. It was measured during the experiments; wear and damage of the tools, cutting and feed forces, and monitoring the behavior of the temperature during the experiments. For evaluation of the mechanism of chip formation it was filmed high-speed. During the machining some cutting fluid was used in the posterior experiments, it means, to inhibit the increase of the temperature trying to explain the behavior of the wear of the tool in relation to a possible oxidizing process of the composite.

Keywords

Machining, Composites, Carbon, Wear Tool, Machining Forces, Oxidation.

Lista de Figuras

2 – Compósito Carbono Reforçado com Fibra de Carbono	pg.
2.1 Propriedades anisotrópicas do compósito CRFC	07
2.2 Tipos de pré-formas	08
2.3 Multifformas em fibras descontínuas	09
2.4 Fluxograma dos processamentos possíveis para a obtenção de CRFC	13
2.5 Variação da resistência à tração específica de alguns materiais	15
2.6 Bloco montado de tubeira em compósito CRFC – Hexagonal	18
2.7 Preparação e tecelagem do bloco para tubeiras	20
2.8 Ilustração mostrando entrelaçamento das fibras no bloco	21
2.9 Ilustração da montagem de bloco para tubeira com fibras direcionadas	22
3 - Usinagem dos Compósitos PRFC/CRFC	
3.1 Causas da deterioração da superfície na usinagem de PRFC	24
3.2 Corte de compósitos em várias orientações	27
3.3 Ruptura, deformação, e cisalhamento durante o corte de compósitos	28
3.4 Macrografia de cavacos de PRFC	29
3.5 Ruptura de fibras e matriz na usinagem do compósito PRFC	30
3.6 Formação do cavaco no torneamento de PRFC	31
3.7 Mecânica de contato ferramenta-peça no torneamento de compósito laminado	32
3.8 Relação entre a temperatura e a velocidade de corte	34

3.9	Ilustração dos desgastes da ferramenta	35
3.10	Desgaste na superfície de folga da ferramenta de metal duro K10	36
3.11	Fotos da superfície de folga do metal duro na usinagem de carbono	37
3.12	Efeito do tamanho do grão sobre o desgaste da ferramenta de metal duro	37
3.13	Efeito do conteúdo de cobalto no desgaste da ferramenta de metal duro	38
3.14	Padrões de desgaste das ferramentas tipo P	39
3.15	Padrões de desgaste das ferramentas tipo K	40
3.16	Comportamento da Pressão específica de corte, na usinagem de compósitos	42
3.17	Usinagem de compósitos PRFC, com ferramentas de metal duro Tipo P	44
3.18	Usinagem de compósitos PRFC, usando ferramentas de metal duro Tipo K	45
3.19	Dureza das ferramentas em função da temperatura	47

4 - Trabalho Experimental

4.1	Representação esquemática da pré-forma hexagonal de CRFC	56
4.2	Dimensões do corpo de prova de compósito CRFC	58
4.3	Cabeça indexável com ferramenta de corte	59
4.4	Ilustração esquemática de montagem do corpo de prova no dispositivo	60
4.5	Ilustração mostrando a fixação do corpo de prova na máquina	61
4.6	Vista completa do dinamômetro	62
4.7	Equipamentos para aquisição de dados durante os ensaios de usinagem	63
4.8	Ilustração esquemática para aquisição de dados durante a usinagem	64
4.9	Montagem do sistema na máquina durante a usinagem	65
4.10	Ilustração esquemática da montagem para injeção de argônio	68
4.11	Ilustração esquemática para inundação por óleo emulsivo (óleo solúvel)	69

5 – Resultados e Discussões

5.1	Superfície do compósito CRFC usinada com ferramentas de corte de cerâmica	73
5.2	Amostragem de cavacos obtidos em severas condições de usinagem	74

5.3	Posição das fibras do compósito em relação à aresta de corte da ferramenta	75
5.4	Aresta de corte apresentando desgaste por abrasão e degradação térmica	76
5.5	Aresta apresentando desgaste por fadiga térmica e mecânica (trincas)	76
5.6	Aresta de corte apresentando desgaste acentuado por abrasão	77
5.7	Desgaste das ferramentas X Comprimento de corte	78
5.8	Desgaste das ferramentas X Comprimento de corte	79
5.9	Desgaste de flanco x da variação da velocidade de corte	80
5.10	Comportamento do desgaste de flanco x da variação da velocidade de corte	81
5.11	Forças de corte x variação da velocidade de corte	82
5.12	Força de avanço x velocidade de corte	83
5.13	Comportamento dos esforços de corte/avanço x velocidade de corte	84
5.14	Comportamento do desgaste de flanco x avanço	85
5.15	Comportamento dos esforços de corte x avanço	86
5.16	Aresta da ferramenta de corte mostrando a formação do desgaste de cratera	87
5.17	Comportamento do desgaste de flanco x profundidade de corte	87
5.18	Comportamento dos esforços de corte x profundidade de corte	88
5.19	Comportamento da temperatura em função da velocidade de corte	90
5.20	Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte	92
5.21	Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte	93
5.22	Comportamento do desgaste de flanco x meios refrigerantes	94
5.23	Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte (c/ óleo)	95
5.24	Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte com inundação	96
5.25	Análise comparativa dos resultados	97

Anexo

Desenvolvimento de um Dinamômetro para monitoramento dos esforços da usinagem em compósitos – CRFC

I.1	Ilustração mostrando a junta flexível e os extensômetros	113
I.2	Esquema de montagem do dispositivo de interface peça/máquina	114
I.3	Configuração preliminar do dinamômetro	116
I.4	Configuração da cabeça indexável	117
I.5	Configuração geométrica do suporte (com junta flexível)	117
I.6	Ilustração das forças de corte/avanço sobre a junta flexível	118
I.7	Apresenta a disposição dos extensômetros na região de medida	120
I.8	Comportamento estrutural com aplicação de esforços 32,5Kgf(Fc) e 25Kgf(Fa)	122
I.9	Comportamento estrutural com aplicação de esforços 65Kgf (Fc) e 50Kgf(Fa)	122
I.10	Comportamento estrutural com aplicação de esforços 97,5Kgf(Fc) e 75Kgf(Fa)	123
I.11	Comportamento estrutural com aplicação de esforços 130Kgf(Fc) e 100Kgf(Fa)	123
I.12	Montagem do dinamômetro para ensaio de aplicação de cargas	124
I.13	Gráfico ilustrando a linearidade do dinamômetro durante a calibração	125

Lista de Tabelas	pg.
3.1 Características físicas, químicas e mecânicas do metal duro	48
3.2 Propriedades qualitativas do revestimento de metal duro	49
3.3 Propriedades das ferramentas cerâmicas	52
3.4 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais de ferramentas	55
4.1 Propriedades do compósito CRFC nas respectivas direções do reforço....	57
I.1 Parâmetros de corte utilizados durante o trabalho	119

Nomenclatura

Letras Latinas

a_p	profundidade de usinagem	[mm]
C'	capacidade térmica	[KJ/Kg.K]
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_s	pressão específica de corte	[N/mm ²]
KT	profundidade de desgaste de cratera	[μ m]
L_c	comprimento de corte	[m]
L_f	comprimento de avanço	[mm]
N	rotação	[rpm]
r_s	raio de ponta	[mm]
t_c	tempo de corte	[min]
V_c	velocidade de corte	[m/min]
V_f	fração volumétrica	[%]
w	ângulo de bobinagem	[graus]

Letras Gregas

α	ângulo entre a direção de corte e a orientação das fibras	[graus]
α_o	ângulo de folga no plano ortogonal	[graus]

α'	coeficiente de expansão linear	[°K ⁻¹]
χ_r	ângulo de posição da ferramenta	[graus]
ϵ	deformação do material à ruptura	[%]
λ_s	ângulo de inclinação medido no plano de corte	[graus]
ρ	densidade	[g/cm ³]
σ_c	resistência à compressão	[Mpa]
σ_T	resistência à tração	[Mpa]
σ_H	resistência à ruptura transversal	[Kg/mm ²]

Abreviações

A/D	analógico/digital
C/C	carbono-carbono
CMP	Compósitos de matriz polimérica
CMM	Compósito de matriz metálica
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
MEV	microscópio eletrônico de varredura
PAN	Poliacrilonitrila
Patm	pressão atmosfera
PCBN	nitreto de boro cúbico policristalino
PCD	diamante policristalino
Prepreg	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
PRFK	plástico reforçado com fibras de Kevlar

PRFV	plástico reforçado com fibras de vidro
RFC	reforçado com fibras de carbono
SiC	carbeto de silício
TiC	carbeto de titânio
TiCN	carbonitreto de titânio
TiN	nitreto de titânio
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
VLS	veículo lançador de satélite
WC	carboneto de tungstênio

Siglas

AME	Divisão de Mecânica
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
DEF	Departamento de Engenharia de Fabricação
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
ISO	Organização Internacional de Normalização
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

Capítulo 1

1.1 - Introdução

A origem dos materiais compósitos é encontrada na natureza, onde as árvores são exemplos perfeitos. Elas são suportadas por troncos com fortes fibras de celulose unidas por lignina (resina natural). A fibra da madeira é difícil de romper quando os esforços estão atuando no sentido longitudinal da mesma, mas com os esforços atuando no sentido transversal à fibra, o seu rompimento torna-se fácil ocasionando a delaminação. Por esta razão os metais com suas propriedades isotrópicas, tornam-se mais populares como materiais estruturais, mas ainda possuem características, tais como, maior densidade, baixa resistência mecânica à alta temperatura, etc. Assim os modernos compósitos proporcionam vantagens para compensar tais dependências (J.E.Bailey, 1990).

O primeiro avanço em materiais aeronáuticos aconteceu quando a madeira, como principal material estrutural foi substituída pelas ligas metálicas, sendo a maioria das ligas metálicas usadas em aeronaves; o alumínio, titânio e superligas. A descoberta e o uso das ligas de alumínio como importante material estrutural, intensificou quando descobriu-se que ligas Al-Cu tinham características de endurecer quando envelhecidas, propiciando ao material melhores propriedades estruturais. O alumínio somente, é muito pobre do ponto de vista estrutural, mas com a adição de outros metais, especialmente cobre, zinco, magnésio e lítio, pelo processo de endurecimento por envelhecimento, resultam em ligas muitas vezes mais fortes (K. Wepmann, M. Peters, 1992). As ligas de alumínio apresentam excelente resistência à corrosão e podem ser usadas em temperaturas mais altas que aquela em que a madeira pode resistir (M. Hunt, 1990). Em segundo lugar vem as ligas de titânio mais usadas em aeronaves, e são também bastante aplicadas no setor

devido a sua baixa densidade, alta resistência à corrosão, alta resistência mecânica e capacidade para resistir a temperaturas acima de 500°C, dando às ligas de titânio uma excelente relação de resistência/peso (M. Peters, H. Buhl, 1992).

O segundo maior avanço em materiais para aeronaves aconteceu com a descoberta dos modernos materiais compósitos; sendo uma combinação de um material de reforço (partícula ou fibra) em conjunto com outro material atuando como elemento de união denominado matriz, mantendo o material de reforço sempre junto, protegendo dos efeitos do meio ambiente, e transferindo os esforços aplicados na estrutura para o reforço (partícula ou fibra) (A.B.Strong, 1989).

Diante das dificuldades encontradas na execução da usinagem de tubeiras (saída de gases do propulsor) e componentes de foguetes em compósitos reforçados com fibra de carbono CRFC, e a necessidade de informações, parâmetros de corte e comportamento das ferramentas para a realização destas operações, surgiu a iniciativa de realização de ensaios e avaliação do comportamento de diversas ferramentas aplicáveis .O compósito CRFC usado nos ensaios foi fornecido pela Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA). Considerando o alto custo e as dificuldades de obtenção, os materiais aplicados nos ensaios de usinagem foram anteriormente usados nos testes para qualificação de tubeiras, portanto não comprometendo a sua utilização em outras atividades.

Inicialmente será feita uma caracterização do compósito reforçado com fibra de carbono (CRFC) a respeito de suas origens históricas e classificações entre outros materiais. A literatura sobre a usinagem deste compósito ainda é muito escassa, principalmente em operações de torneamento. Sendo assim, será feita uma revisão, dando uma abordagem geral sobre o corte, e conceitos de usinagem do compósito CRFC.

Durante a realização de ensaios de usinagem em torneamento usando este tipo de compósito (Ferreira, 1999) foram obtidos resultados até então desconhecidos ou pouco divulgados. Este estudo e seus respectivos resultados obtidos durante a usinagem do compósito CRFC, e complementando com resultados de outros pesquisadores (Masuda et al., 1993), (Komanduri, 1997), etc. obtidos na usinagem de materiais compósitos similares, servirão como referências para o trabalho que ora se inicia. Sendo assim, decidiu-se desenvolver um dinamômetro adequado aos níveis de esforços de corte, possibilitando a interface com a máquina-

ferramenta, e que a relação custo/benefício para a fabricação do mesmo não comprometesse a realização dos trabalhos.

Na seqüência serão abordados os procedimentos experimentais utilizados, os resultados obtidos, as discussões, justificativas, comentários e conclusões. O objetivo deste trabalho é, através de ensaios de torneamento deste compósito, obter parâmetros e ferramentas de corte adequados e condizentes com as influências das condições de corte no processo. Portanto, visando este contexto foram ensaiados diversos materiais de ferramentas, tais como: metal duro com e sem cobertura, cerâmicas e diamante policristalino. Durante os ensaios serão observados os tipos de avarias e desgastes das ferramentas, o tipo de cavaco formado e os esforços de corte e avanço. Variando as condições de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem), verificar-se-á suas influências nos esforços de corte. Em seguida, com o objetivo de analisar a influência da refrigeração no processo de oxidação durante a usinagem no compósito CRFC, serão usados os sistemas, tais como: gás argônio, injeção de fluido de corte e inundação por óleo solúvel.

Os aspectos gerais que compõem o conteúdo deste trabalho estão apresentados conforme os seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Compósitos Carbono Reforçados com Fibra de Carbono

Capítulo 3 – Usinagem dos Compósitos Plásticos Reforçados com Fibra de Carbono

Capítulo 4 – Procedimentos Experimentais

Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Capítulo 7 – Referências Bibliográficas

Anexo I – Construção de um Dinamômetro Para Usinagem de Compósito CRFC

Capítulo 2

Compósito Carbono Reforçado com Fibra de Carbono - CRFC

2.1 – Generalidades

A partir de 1908 quando foi produzida a primeira resina fenólica, muitas outras resinas têm sido desenvolvidas; epóxies, poliesters, poliamidas e silicones. A primeira aplicação destes compósitos foi em aeronaves em 1943, usando fibra de vidro (reforço) e poliéster(matriz) para compor a fuselagem de uma aeronave de treinamento (J.E.Bailey, 1990). Os materiais compósitos avançados são geralmente divididos em quatro grupos principais:

Compósitos de matriz polimérica - CMP

Compósitos de matriz metálica - CMM

Compósitos de matriz cerâmica - CMC

Compósitos carbono-carbono - C/C

Os compósitos de matriz polimérica são os mais largamente usados, são extremamente leves em comparação com outros materiais, e estas propriedades combinadas com alta resistência e alta rigidez fazem os CMPs materiais versáteis para aplicações estruturais (M. Peters, 1992). A maioria dos CMPs são formados por resinas termofixas, as quais tornam-se rígidas quando submetidas à cura. Os compósitos de matriz metálica (CMMs) consistem de reforços de alta performance em uma matriz metálica (alumínio, titânio, magnésio, cobre, etc.). Os reforços podem ser na forma de partículas, whiskers ou fibras. As fibras são geralmente grafite, carvão de

silício, boro ou óxido de alumínio. O mais novo tipo de compósito são os denominados de compósitos de matriz cerâmica. As cerâmicas são de difícil definição, isto é, não são nem metálica e nem orgânica, são materiais sólidos, os quais têm ions positivos e negativos, e tipicamente exibem ligação iônica, embora algumas cerâmicas (SiC) têm ligações covalentes (A.B. Strong, 1989). Matrizes cerâmicas típicas são: carбето de silício, óxido de alumínio, carбето de zircônio e nitreto de silício. A principal característica dos compósitos de matriz cerâmica, e que os torna útil, é sua estabilidade térmica entre 1000°C e 2000°C.

O compósito carbono-carbono é uma forma de compósito de matriz cerâmica, mas devido às suas características únicas, eles são colocados em sua própria categoria. Os compósitos carbono-carbono têm a mais alta energia de absorção do que qualquer outro material conhecido (A.B. Strong, 1989). Eles podem ser usados com temperaturas superiores à 2000°C, e são especialmente utilizados em freios de aeronaves, onde o calor gerado por fricção é extremamente alto, e tubearas de motor foguete onde o desgaste por ablação (fluxo de fogo) se manifesta bastante acentuado.

Embora as informações disponíveis hoje sobre estes compósitos visam mais as propriedades de projeto destes materiais, surgem as necessidades de estudos visando seus processos de fabricação no sentido de ampliar sua produção (Bhatnagar, 1995). A usinagem é a operação final de confecção dos compósitos reforçados com fibra de carbono, visando a precisão dimensional/forma e a qualidade superficial dos componentes. Devido aos elevados custos de fabricação agregados destes materiais, e também ao longo período de obtenção em altas temperaturas, a perda ou a não conformidade da peça pode ocasionar sérios prejuízos (Coppini et al., 1995).

Os compósitos reforçados com fibra de carbono apesar de apresentarem características de materiais estruturalmente “moles” no que diz respeito a usinagem, as dificuldades aumentam com relação à sua abrasividade, estrutura heterogênea e anisotrópica, aumento do coeficiente de atrito com a temperatura e esforços de corte flutuantes, criando condições estritamente nocivas à ferramenta de corte durante a usinagem. As avarias na superfície da peça, tais como: sulcos e trincas na matriz, delaminações e extração das fibras da matriz (fiber pull-out), comprometem o acabamento final da peça. O cavaco em forma de pó, é altamente prejudicial ao operador e à máquina ferramenta. Isto mostra que a usinabilidade destes materiais difere significativamente

dos metais, portanto algumas pequenas analogias apresentadas devem ser recebidas com cautela (Krivov & Lupkin, 1995).

2.2 - Pré-Formas de FC

Os primeiros CRFC foram obtidos utilizando-se como reforço tecidos de fibras de carbono, obtidas a partir de rayon, impregnadas com resina fenólica de alto rendimento em carbono, através de técnicas de moldagem de plástico com subsequente carbonização em atmosfera de nitrogênio (Marsh, 1989). Atualmente, com o desenvolvimento de técnicas de tecelagem de fibras de carbono como: agulhamento de feltros e tecidos, multicamadas de tecidos, tecelagem em três direções, aliado ao desenvolvimento de técnicas de impregnação tais como: via líquida, via gasosa, e combinação de ambas, proporcionam CRFC de alta performance uni, bi, ou multidirecionais, adequados à diferentes tipos de aplicação. A maioria dos componentes de materiais compósitos utilizados nas indústrias aeronáutica, naval e automobilística são dimensionados para trabalhar em faixas de temperatura com amplitude da ordem de algumas dezenas de graus Celsius.

Além do mais, constituem-se tipicamente de estruturas tipo viga, placa ou casca de espessura reduzida, em relação as demais dimensões da peça (por exemplo, longarinas nervuras, carenagens, tubos e revestimentos de superfícies de controle), cujos regimes de carregamento mecânico (isto é, estados planos de tensões contidos nas camadas de reforço) permitem o uso de reforços unidirecionais ou bidirecionais, através de tecidos ou de “tapes”. Os reforços ficam contidos em camadas (normalmente associados com o plano (X-Y) mutuamente paralelas denominadas lâminas, e são orientados em direções estabelecidas durante o projeto das mesmas. Estes compósitos uni ou bidirecionais apresentam propriedades mecânicas satisfatórias nas direções dos reforços (restritas a um único plano (X-Y) ou superfície).

Entretanto, as propriedades na direção (Z), não reforçada, bem como as dos planos (X-Z) e (Y-Z), são dominadas pela matriz, sendo bem inferiores em relação àquelas onde há reforço. Este problema é crítico, tanto em aplicações que envolvem carregamentos termo-mecânicos de elevada magnitude, como em componentes utilizados para reentradas na atmosfera e em motores de foguetes, como nos casos em que laminados espessos são utilizados. O resultado de

carregamento em planos não reforçados é a delaminação das camadas constituintes, seguido de falha em determinadas regiões do compósito. A solução óbvia deste problema é então adicionar reforços de fibras na terceira direção, criando um sistema de coordenadas de reforços (X,Y,Z). Em certos casos, há registros na literatura de compósitos carbono-carbono reforçados em quatro ou mais direções (Levy Neto, 1991). A Figura 2.1 ilustra a resistência à tração em função da direção dos reforços.

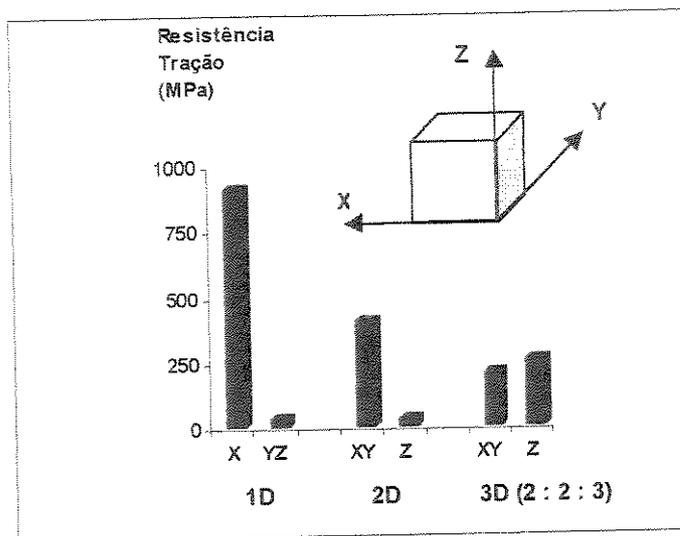


Figura 2.1 - Propriedades anisotrópicas do compósito CRFC (Thomas, 1993).

2.2.1- Substratos de fibras de carbono

Os substratos de fibras de carbono são pré-formas utilizadas como suporte para a impregnação via líquida e/ou gasosa da matriz de carbono. Os tipos de pré-formas e os seus processos de obtenção, normalmente utilizados na indústria são confeccionados e produzidos conforme as necessidades de cada aplicação, visando a obtenção de melhores desempenho estruturais quanto a rigidez, resistência térmica, densidade, etc. A Figura 2.2 ilustra a orientação das fibras em uni, bi, e demais direções. De outra forma, com a sofisticções das pré-formas, podem ser incorporadas mais dimensões ao compósito como: 4D, 5D, 7D, e 11D através de reforços diagonais na pré-forma. (Savage,1993)

Na Figura 2.2 são mostradas as pré-formas aplicáveis.

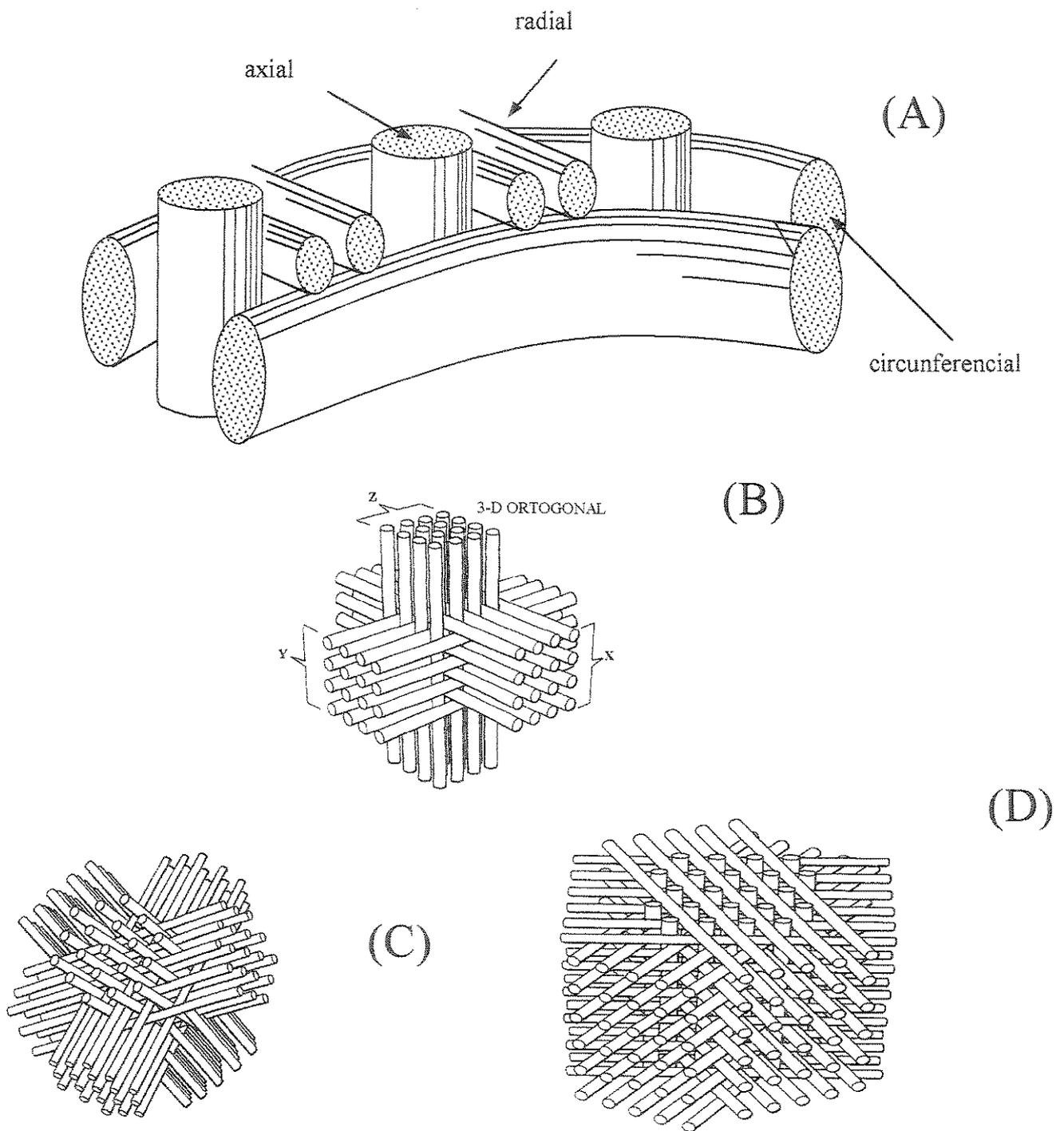


Figura 2.2 - Tipos de pré-formas (Pardini, 1998).

Pre-formas para compósitos CRFC: (A) Tri-direcional (3D) circunferencial, (B) Tri-direcional (3D) ortogonal, (C) Tetra-direcional (4D) vértice-diagonal, (D) Tetra-direcional (Z, $\pm 60^\circ$, 0°).

2.2.2- Pré-formas multidirecionais obtidas por fibras descontínuas

Fibras de carbono curtas, geralmente com comprimento entre 6 a 13 mm, são os tipos de reforços mais baratos e assim amplamente utilizados em compósitos obtidos por moldagem. As fibras de carbono curtas são utilizadas para a obtenção de uma pré-forma de feltro ou de manta. Estas pré-formas são impregnadas via líquida com posterior carbonização e/ou via gasosa para obtenção de CRFC para aplicação em sistemas de freios de aeronaves e automobilísticos (Fitzer, 1981).

Na Figura 2.3 são mostradas as pré-formas aplicáveis.

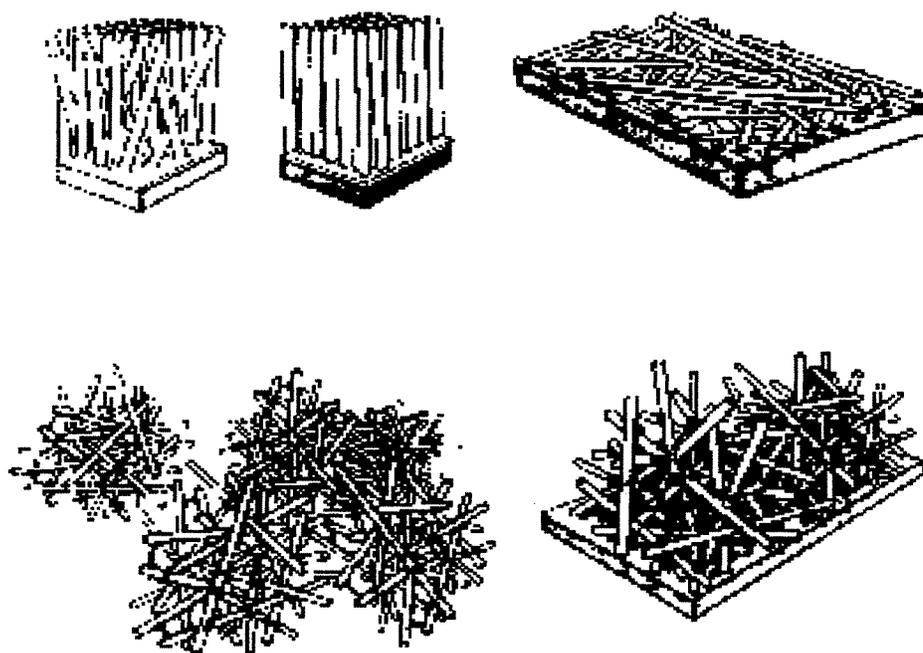


Figura 2.3 - Multiformas em fibras descontínuas (Marsh, 1989).

O desenvolvimento dos CRFC foi posterior ao dos materiais plásticos reforçados com fibras (PRF), desenvolvimento este motivado por aplicações envolvendo altas temperaturas. A relevância dos compósitos CRFC na engenharia alicerça-se no fato destes materiais manterem, em atmosfera não oxidante, propriedades mecânicas significativamente próximas daquelas apresentadas por PRF avançados (exemplo: compósito fibras de carbono/epóxi), mesmo em

temperaturas superiores a 2000°C. Entretanto, a despeito das inúmeras vantagens inerentes aos compósitos CRFC, ou seja altas rigidez e resistência, baixa massa específica, inércia química, estabilidade dimensional, estes jamais serão explorados de acordo com o potencial, se questões relacionadas com o processamento, a caracterização e a proteção contra oxidação não forem adequadamente estudadas e otimizadas.

O custo associado nas etapas de manufatura destes compósitos, isto é, obtenção da pré-forma, impregnação, carbonização e ciclos de densificação são altíssimos, tanto por exigirem longos períodos de tempo, como por envolverem temperaturas de processamento de até 2500°C, razão pela qual criteriosos trabalhos experimentais com corpos de provas simples, serem necessários. Outro aspecto que cabe ressaltar com respeito aos compósitos carbono/carbono é a grande diferença que, na maioria dos casos, há entre as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência a tração) e térmicas (coeficiente de dilatação) da matriz e da fibra. Tais diferenças geram tensões térmicas, sobretudo nas interfaces fibras/matriz, durante as etapas de aquecimento e resfriamento, inerentes aos ciclos de densificação necessários para a obtenção de compósitos CRFC. Adicionalmente, se o reforço for exclusivamente unidirecional (CRFC-1D), o material resultante terá como características: (i) baixa resistência a esforços de cisalhamento transversais e a tensões normais ao longo da espessura; e (ii) um elevado grau de anisotropia no que tange às propriedades mecânicas e térmicas. Cabe ressaltar que, aplicações como gargantas de tubeiras e discos de freios para aeronaves, nas quais são necessários compósitos espessos e resistentes ao choque térmico, a utilização de CRFC-1D e mesmo CRFC-2D não seria aconselhável. Nestes casos, faz-se mister o emprego de CRFC reforçado em no mínimo três direções ortogonais, para que o material suporte os esforços termo-mecânicos presentes durante a fabricação e uso do componente (Heym, 1981).

2.3 - Obtenção

Os materiais compósitos de forma geral são formados através da combinação de diferentes tipos de materiais carbonosos que diferem na forma, composição química e são insolúveis entre si. O compósito CRFC tem como característica uma matriz que pode ser polimérica ou deposição gasosa, e as fibras de reforço de carbono combinando as vantagens do compósito plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC) e as propriedades refratárias da matriz cerâmica de

carbono (Ferreira, Levy Neto et al., 1993). Enquanto o termo “materiais compósitos” pode ser aplicado para qualquer liga composta por dois ou mais materiais (dependendo da escala de referência), também é usado para descrever um material cujos componentes não formam juntos uma liga, mas terem sido fabricados separadamente antes de comporem um único sistema. Para um material ser classificado como um compósito, ele deve ser capaz de suportar níveis de tensões maiores do que o material da matriz empregado e esta suportar deformações superiores às fibras, e as mesmas apresentarem aderência adequada à matriz (Komanduri et al., 1993).

O processamento completo para obtenção de compósitos CRFC envolve a seleção adequada da fibra de carbono, projeto e construção das estruturas de reforço em fibras de carbono, esqueleto ou pré-forma de fibra de carbono e a escolha do precursor da matriz carbonosa, que define o tipo de processamento a ser usado. A ampla variedade de fibras de carbono, em função dos seus precursores e das formas comercializadas, tais como fibras curtas, feltros ou laminados, cabos com diferentes números de filamentos, tecidos, malhas, etc., além dos “prepregs” (laminados de fibras de carbono com resinas termorígidas), abre um universo de possibilidades de arranjos estruturais de fibras, o que permite, em tese, adequar as propriedades dos compósitos CRFC em função de sua aplicação (Gilton, 1994)

Dependendo da forma, tamanho e características do CRFC, ele pode ser obtido segundo dois processos principais: líquida e gasosa, seguida de tratamentos térmicos de carbonização e, se necessário, de grafitação. Geralmente, são necessários ciclos de impregnação ou de densificação adicionais, devido às perdas por volatilização ocasionadas pelos tratamentos térmicos de conversão dos precursores orgânicos em carbonos. O processo de impregnação líquida é o processo de obtenção da matriz carbonosa via infiltração de precursores orgânicos em fase líquida de tratamentos térmicos para a sua conversão em carbono ou grafite (Savage, 1993).

Considerando-se o rendimento, a estrutura e a interface (adesão) fibra/matriz, dois tipos de precursores poliméricos são os mais utilizados como impregnantes desse processo: as resinas termorígidas como as fenólicas e furfurílicas, e os piches de alcatrão de hulha e de petróleo (Fitzer, 1987). A impregnação em fase gasosa (CVD) ou seja, infiltração pela utilização de vapores químicos orgânicos, consiste no processo de deposição do carbono através da pirólise de gases orgânicos, onde o carbono sólido nucleia e cresce até envolver o substrato poroso de fibras de carbono aquecido. O processo é em geral conduzido com velocidade de reação baixa, requerendo um controle rigoroso de temperatura, tempo e pressão, tal que permita a infiltração e

a deposição uniformes do carbono. No fluxograma da Figura 2.4 são apresentadas as fases necessárias para obtenção de compósitos de CRFC.

Via de regra, os tratamentos térmicos de conversão dos precursores orgânicos em carbonos sólidos são acompanhados pela formação de poros gerados pelas perdas por volatilização de componentes moleculares leves ou de fragmentos elementares e requerem ciclos adicionais de densificação. Para determinadas aplicações nas quais as propriedades características da estrutura mais grafitizada são requisitadas, complementam-se os ciclos de impregnação em fase líquida ou gasosa com tratamentos térmicos de grafitização em temperaturas superiores a 2300°C (McAllister, 1983). Apesar dos compósitos CRFC já serem comercializados e amplamente utilizados pelos países desenvolvidos, o estágio do real conhecimento do material está ainda em fase incipiente, devido à complexidade do assunto e às inúmeras variáveis que interferem drasticamente nas propriedades. As pesquisas têm sido dedicadas aos estudos da influência da fração volumétrica e orientações espaciais das fibras de carbono nos compósitos. São também analisadas as correlações existentes entre as características da fibra de carbono em termos de fibras precursoras e parâmetros do processo (temperatura máxima, tempo de residência, estiramento e tipo de tratamento superficiais) (Savage, 1993).

Dois fatores distintos são tidos como chaves que poderão alavancar a ampliação do uso do compósito CRFC. O primeiro de cunho econômico, é a redução do custo da sua produção, e o segundo é puramente técnico, ou seja, encontrar uma solução para o aumento da resistência à oxidação do CRFC, pois quaisquer materiais carbonosos e grafiticos, apresentam taxa de oxidação significativa a temperaturas maiores que 400°C, na presença de elementos oxidantes. (Coppini et al., 1996)

A Figura 2.4 ilustra o fluxograma de obtenção do compósito CRFC.

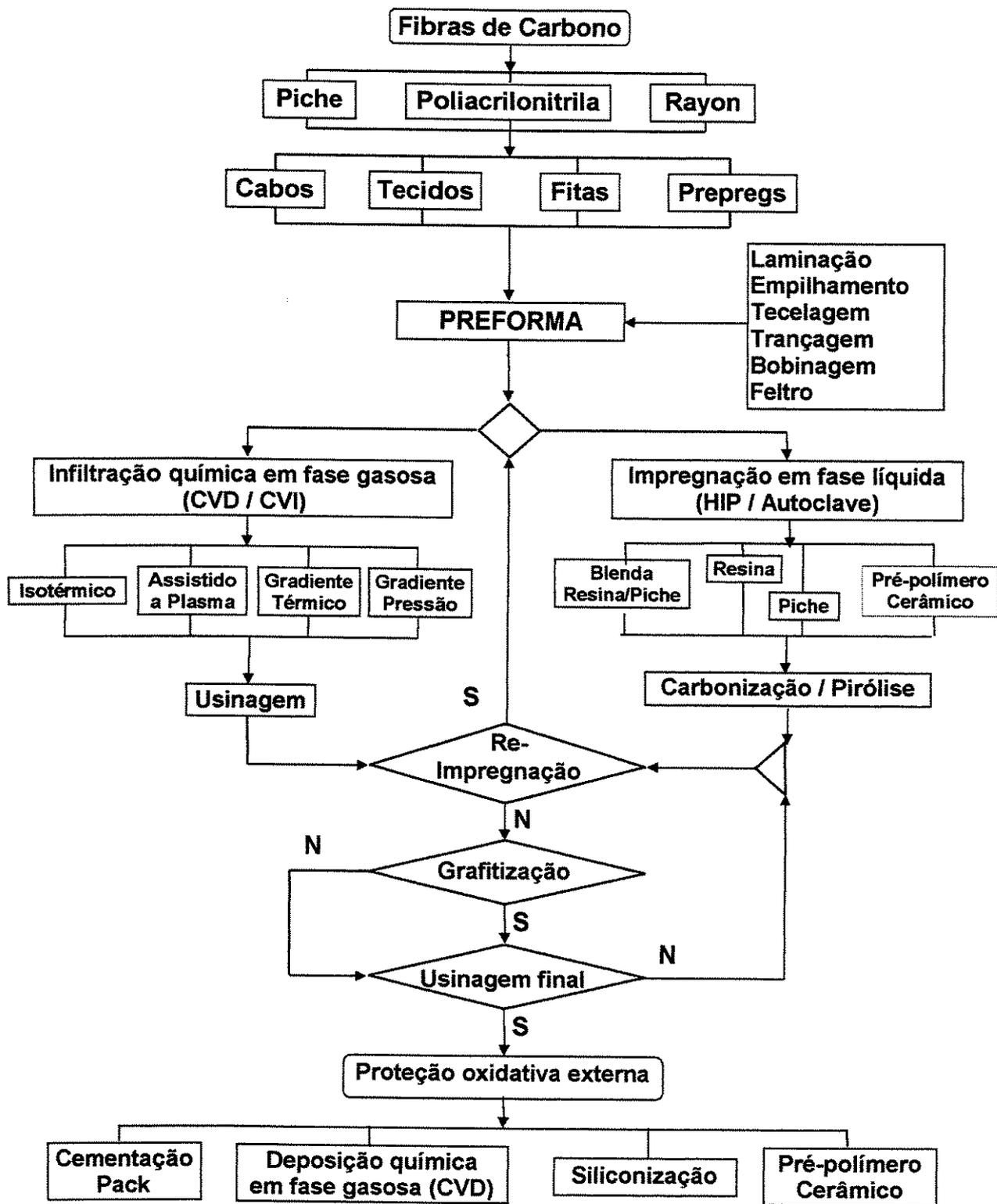


Figura 2.4 - Fluxograma dos processamentos possíveis para a obtenção de CRFC (Pardini, 1987)

Como novas tendências de pesquisa tem sido verificada, uma intensa dedicação ao estudo de novas fibras de carbono de alto módulo tem ocorrido, o que proporciona, em tese, a obtenção de compósitos com maior rigidez e baixo coeficiente de expansão térmica.. As ligações geradas nas interfaces entre fibras e matriz, durante o processo, dependem fundamentalmente das características da fibra, da matriz e das condições de processamento, incluindo-se a temperatura máxima do seu tratamento térmico. Essas ligações de adesão ou de coesão são de natureza física, química ou combinação de ambas, e são as responsáveis pelo aproveitamento eficiente das propriedades das fibras pelo CRFC (Mano, 1985).

2.4 - Propriedades e aplicações

A idéia da utilização de reforços de fibras de carbono para o aumento da resistência dos materiais carbonosos e grafiticos convencionais iniciou-se na década de 60, coincidindo com o advento da tecnologia de fabricação de fibras de carbono e da evolução da aplicação de fibras como reforço de materiais plásticos. Por sua vez, apesar da maioria dos materiais metálicos apresentarem valores de resistência à tração em torno de 135 Mpa, à temperaturas superiores a 1000°C suas propriedades começam a se deteriorar. Devido às características intrínsecas dos materiais carbonosos e grafiticos, os compósitos CRFC apresentam massas específicas baixas (m.e. $\sim 2,0 \text{ g/cm}^3$); resistência elétrica similar à apresentada pelos semi-metais ($\rho_E \sim 10^{-3} \Omega\text{cm.cm}$); elevada condutividade térmica; inércia química em meio ácido e meio básico, além de uma excelente estabilidade dimensional.

A incorporação de reforços de fibras de carbono nos materiais carbonosos e grafiticos traz como vantagem um aumento significativo nos valores das seguintes propriedades: resistências mecânicas (tração e compressão), módulos de elasticidade específicos e tenacidade à fratura, propriedades estas fundamentais para aplicação no setor aeroespacial. A maior vantagem da utilização dos CRFC em condições de máxima severidade de temperatura reside na manutenção da sua resistência mecânica em uma faixa relativa e ampla de temperatura, o que não se consegue mesmo com superligas metálicas ou materiais cerâmicos avançados de uso aeroespacial (Fitzer, 1987).

Os compósitos CRFC apresentados na Figura 2.5 correspondem aos desenvolvidos no programa “Space Shuttle” da NASA, sendo o tipo A um dos primeiros, e os do tipo Ar os de alta resistência, que estão sendo atualmente utilizados pelo mesmo programa. Os do tipo R são os compósitos utilizados no sistema de proteção térmica do veículo espacial que, apesar de serem obtidos com fibras de carbono de baixa resistência, apresentam resistência superior à das superligas e dos cerâmicos. Como nos materiais carbonosos e grafiticos convencionais, os componentes individuais dos CRFC apresentam uma ampla variedade de propriedades, decorrentes dos diferentes graus de ordenações estruturais dos carbonos, tendo como extremos os carbonos amorfos e as estruturas grafiticas – que dependem do precursor ou das condições de processamento das fibras de carbono, bem como da matriz carbonosa.

**Resistência
à tração
específica
(Mpa)**

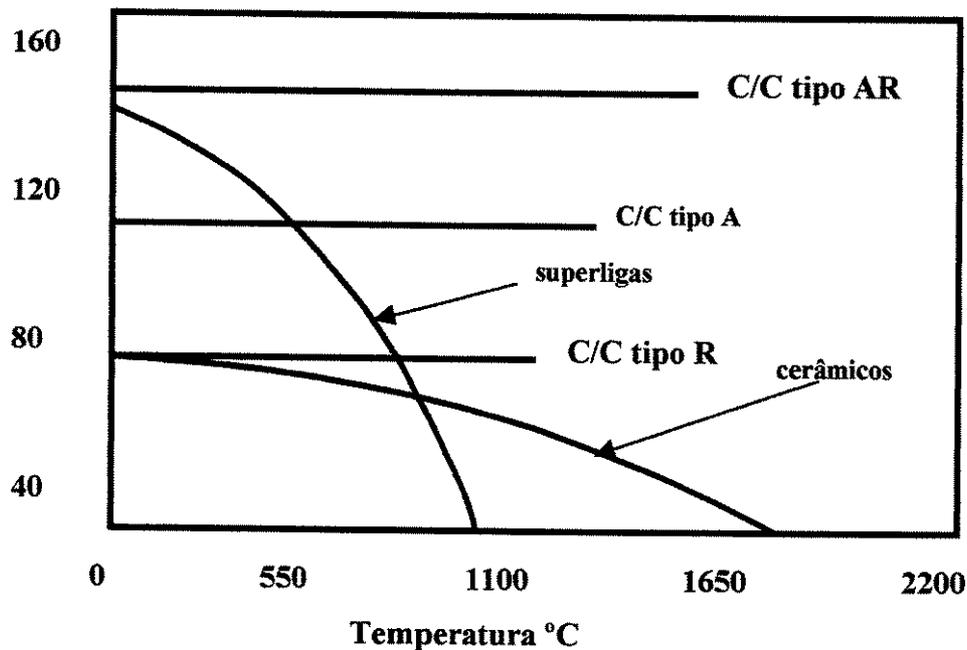


Figura 2.5 - Variação da resistência à tração específica de alguns materiais de uso aeroespacial em função da temperatura (Fitzer, 1987).

A possibilidade da conjugação de diferentes características de fibras e matrizes permite que o compósito CRFC apresente propriedades adequadas em função da sua aplicação, inclusive de maneira anisotrópica, em direções específicas, através da adequada distribuição espacial das fibras de reforço. Neste contexto, os compósitos CRFC são classificados em compósitos uni, bi, tri ou n-direcionais. O avanço da tecnologia de compósitos CRFC associado à redução do custo de seu processamento, vem beneficiar aos usuários dos materiais carbonosos e grafiticos convencionais, além de produzir uma contribuição significativa na área médica, na forma de implantes ortopédicos como decorrência da bio-compatibilidade do carbono (Gilton, 1994)

Com o intuito de exemplificar as principais aplicações, são a seguir listados os produtos que estão sendo efetivamente confeccionados em compósitos CRFC para atender às necessidades das indústrias diversas, principalmente às da área aeroespacial .

2.4.1 - Aplicações aeroespaciais:

- sistema de freios de aeronaves;
- tubeiras de foguete;
- componentes de motores a jato;
- discos de turbina, câmara de combustão e tubeiras de exaustão;
- protetores térmicos para veículos espaciais (nariz, calda, borda de ataque);

2.4.2 - Aplicações industriais

- interceptores de massa de vidros;
- ventoinhas de compressores e bombas de vácuo;
- fixadores mecânicos para fornos a vácuo de alta temperatura (parafusos, porcas, tarraxas, etc.);
- matrizes para prensagem a quente de pós cerâmicos e metálicos;
- elementos resistivos planos ou cilíndricos para prensas isostáticas;
- elementos resistivos para fornos de alta de temperatura (3.000°C);

formas para moldagem de metais superplásticos (ligas de titânio que requerem temperaturas em torno de 1000°C);

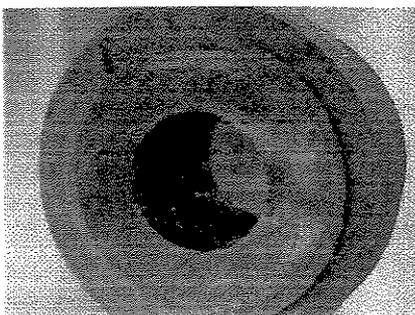
- mancais planos em que os grafites sofrem falhas catastróficas;
- dutos de gases quentes (reatores nucleares).

Outros

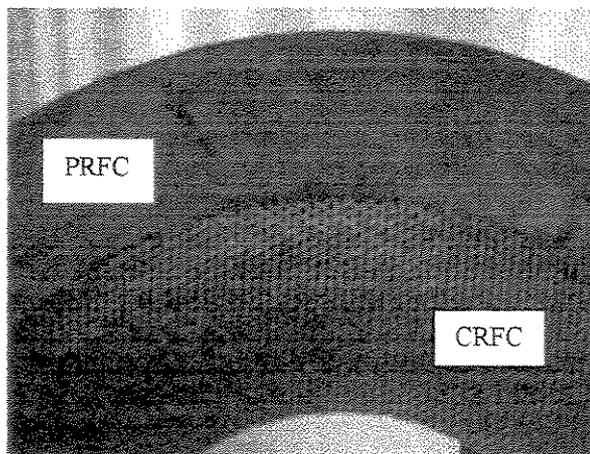
- conjunto de embreagem e freios de carros de corrida;
- refletor de antena parabólica de rádio-frequência;
- implantes ortopédicos e dentários

A aplicação do compósito CRFC ocorre em condições onde as suas propriedades são indispensáveis e o custo é justificado. Muitas destas aplicações estão em indústrias aeroespaciais, particularmente setores militares, onde é fator principal para a extrema capacidade de desempenho do material. O uso em ogivas de mísseis, protetores térmicos de veículos espaciais durante a reentrância na atmosfera, tubeiras de foguetes e componentes de motores de turbina à gás, vem sendo um grande campo da aplicação do compósito CRFC, o exemplo apresentado na Figura 2.6 ilustra um bloco preparado para a fabricação de uma tubeira para foguete. De outra forma, estes compósitos substituíram os metais sintetizados em função de sua baixa densidade e superior propriedades térmicas, em discos de freio de aeronaves militares e civis, de alto desempenho e também são aplicados em freios de carros de corrida (Fórmula 1), e em trens de alta velocidade (Savage, 1993).

Como novas tendências de pesquisa tem sido verificada uma intensa dedicação ao estudo de novas fibras de carbono de alto módulo, o que proporciona, em tese, a obtenção de compósitos com maior rigidez e baixo coeficiente de expansão térmica.. As ligações geradas nas interfaces entre fibras e matriz, durante o processo, dependem fundamentalmente das características da fibra, da matriz e das condições de processamento, incluindo-se a temperatura máxima do seu tratamento térmico. Essas ligações de adesão ou de coesão são de natureza física, química ou combinação de ambas, e são as responsáveis pelo aproveitamento eficiente das propriedades das fibras pelo CRFC (Mano, 1985).



Bloco pré-usinado com revestimento externo carbono fenólica



Detalhe mostrando parte interna da peça em compósito CRFC

Figura 2.6 - Bloco montado de tubeira em compósito CRFC - Hexagonal.

O compósito CRFC possui um baixo coeficiente de fricção e, por isto é aplicado em selos de mancal de eixo rotativo e camisa de pistão. Devido a sua boa resistência em alta temperatura, o compósito pode ser usado em matrizes e moldes para pressão à quente. A tenacidade e a condutividade elétrica são exploradas em elementos de construção de fornos, e eletrodos de grafite para refino de metais. A alta pureza do compósito CRFC, conjugando resistência à quente e radiação ionizada, sugere a sua aplicação na área nuclear, em dutos e reatores de potência. No campo médico tem excelente bio-compatibilidade, sua porosidade e o módulo de elasticidade pode ter comportamento similar ao realizado pela estrutura óssea, podendo ser aplicado em placas de ossos, próteses de quadril, implantes ortopédicos e cirurgia dental (Savage, 1993).

Estes exemplos demonstram a versatilidade do emprego do material compósito de carbono reforçado com fibras de carbono, aplicados numa larga variedade de extremas situações de desempenho, onde a combinação de propriedades mecânicas, químicas, térmicas, elétricas, e de microestrutura, tem encontrado novas possibilidades de uso. Apesar dos compósitos CRFC já serem comercializados e amplamente utilizados pelos países desenvolvidos, o estágio do real conhecimento do material está ainda em fase incipiente, devido à complexidade do assunto e às inúmeras variáveis que interferem drasticamente nas suas propriedades. As pesquisas têm sido

dedicadas aos estudos da influência da fração volumétrica e orientações espaciais das fibras de carbono nos compósitos. São também analisadas as correlações existentes entre as características da fibra de carbono e os parâmetros do processo de obtenção (Thomas, 1993). Com relação ao processo de fabricação, a operação final de acabamento do compósito CRFC passa por um processo de usinagem. Portanto, o conhecimento de suas características de usinabilidade torna-se um ponto relevante para o aprimoramento de seu processo de obtenção (Coppini et al. (b), 1996).

2.5 - Blocos de carbono/carbono para tubeiras

O Processo geral desenvolvido para fabricar compósitos CRFC para tubeiras está dividido em duas partes:

Inicialmente o substrato é obtido usando fibras secas, e posteriormente a matriz é obtida pela pirólise de um precursor orgânico entre as fibras do substrato. Devido à diferença de densidade do precursor orgânico, antes e depois da pirólise, a operação de densificação deve ser desenvolvida através de vários ciclos repetidos. Utiliza-se várias fibras padrões para fabricar compósitos carbono/carbono, dependendo da forma e propriedades requeridas para a peça. Entre elas, circular 3D está bem adaptada para a fabricação de garganta de tubeiras em compósitos CRFC. A proporção do volume de fibra é em torno de 50% em relação a matriz. Estes padrões são especialmente desenvolvidos para melhorar a confiabilidade e qualidade dos compósitos carbono/carbono. Isto permite fabricar peças com custo aceitável e boa qualidade. Descrevemos aqui por diante um dos processos de tecelagem 3D. Isto compreende três fases principais a seguir: Preparação, Tecelagem e Entrelaçamento

A preparação, consiste em obter uma cadeia de varetas metálicas que vão simular a direção longitudinal da pré forma. Este passo não é realmente uma fase do processo, é executado somente uma vez para posicionar varetas metálicas alinhadas nos furo das placas. Estas placas alinhadas define o espaçamento radial e circunferencial da pré forma. As varetas metálicas são niveladas por uma placa não perfurada e mantidas juntas por pequenos espaçamentos definidos pelo fabricante.

2.5.1 - Fase de tecelagem

A cadeia de varetas metálicas é colocada em um tear, onde é constantemente rotacionado. Em cada espaço são manipuladas lâminas metálicas posicionadas em uma placa com sulcos mantendo espaçamentos circunferenciais. Uma agulha de tecer que vai de um lado para outro através dos corredores radiais, a qual captura a fibra (pode ser uma ou conjunto de fibras) e puxa através dos espaços radiais da cadeia de varetas. As camadas, são levemente compactada para baixo, outra camada é formada com os mesmos procedimentos obtendo a pré-forma longitudinalmente ao longo da peça. A Figura 2.7 ilustra a obtenção do bloco de compósito CRFC para tubeiras

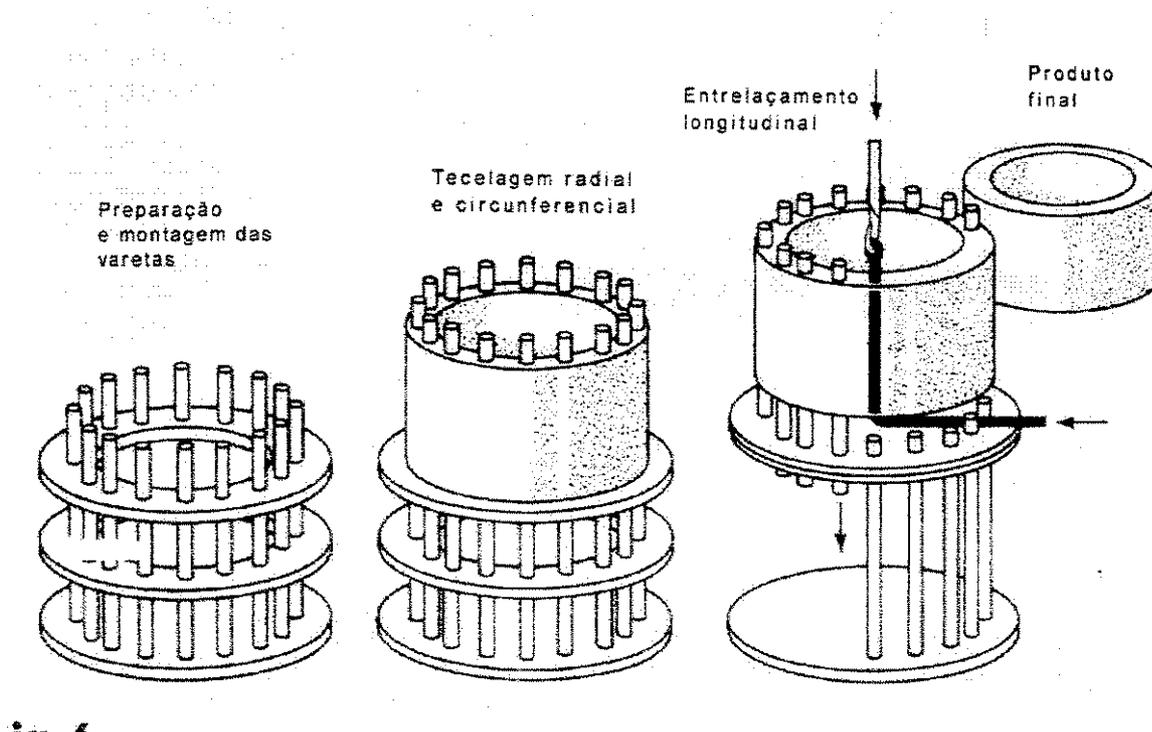


Figura 2.7 – Preparação e tecelagem do bloco para tubeiras (Sheehan, 1987).

2.5.2 - ENTRELACEMENTO

Seqüencialmente, no lugar das varetas metálicas que serviram para montar a pré forma, são entrelaçados fibras ou pacote de fibras em toda a extensão da pré forma finalizando toda a

estrutura de reforço da peça em fibras de carbono. A Figura 2.8 ilustra o entrelaçamento das fibras para obtenção da pré-forma do composto. Neste processo de tecelagem também é possível mudar a forma das varetas metálicas para se obter a configuração necessária das peças pretendida, este procedimento é aplicado para obtenção e fabricação de tubeiras para saída de gases, onde o perfil interno da garganta é previamente definido conforme ilustra a Figura 2.9.

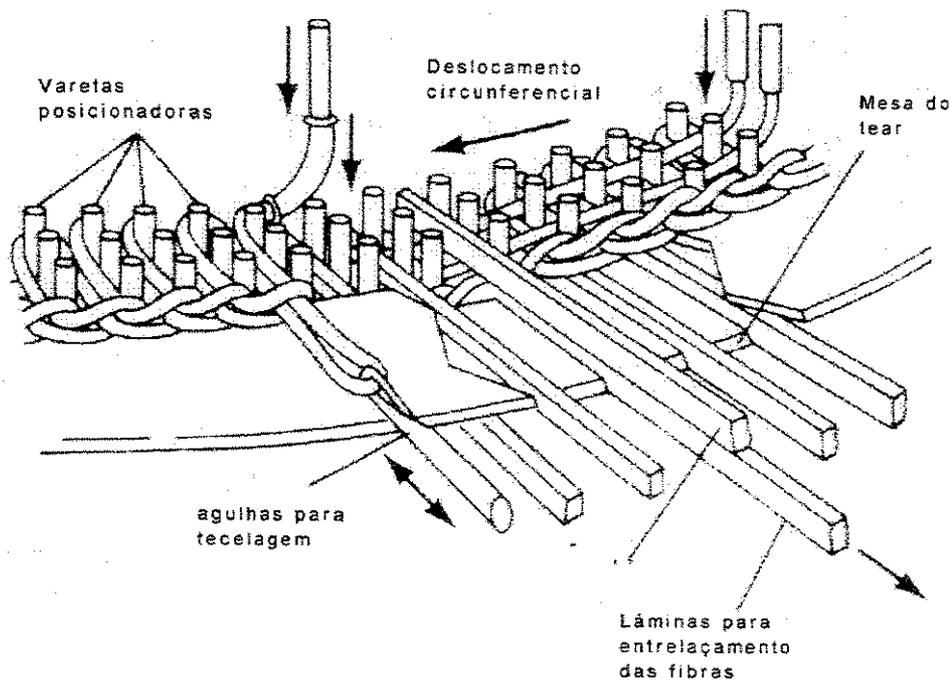


Figura 2.8 – Ilustração mostrando entrelaçamento das fibras no bloco (Sheehan, 1987).

A maior vantagem dos compostos CRFC multidirecionais está na liberdade de orientar tipos e quantidades de fibras para atender aos carregamentos de projeto do componente estrutural final. As desvantagens da tecnologia de fabricação são: o custo de fabricação das pré-formas e dificuldades de impregnação da matriz entre os arranjos multidirecionais de fibras. Como visto anteriormente, o composto CRFC apresenta desempenho diferente dos materiais metálicos e

cerâmicos, em termos de resistência mecânica e principalmente capacidade térmica, assim sua aplicação é direcionada em casos onde requisita-se altas temperaturas. Entretanto, as duas maiores restrições com relação ao seu uso são; o alto custo e a baixa resistência à oxidação (Sheehan, 1987).

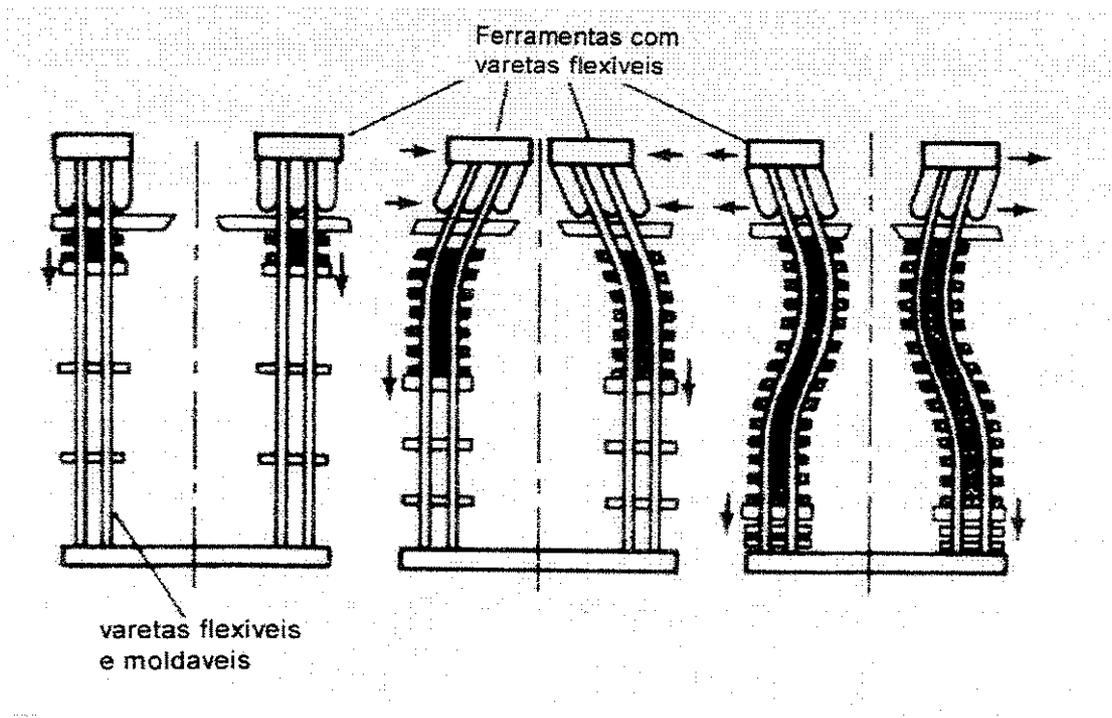


Figura 2.9 - Ilustração da montagem de bloco para tubeira com fibras direcionadas (Sheehan, 1987).

Capítulo 3

3.1 - Usinagem dos Compósitos PRFC/CRFC

Atualmente com a frequência do uso e aplicações de materiais compósitos (PRFC,CRFC), e analisando seu processo de obtenção, verifica-se a necessidade da aplicação de processos de manufatura e operações de usinagem, visto que as configurações de peças nem sempre são possíveis de serem obtidas pelos processos convencionais, para atender as especificações do produto (Takeshita, 1985).

As características de usinagem dos compósitos variam de peça para peça. Sendo assim, ter conhecimento de como o material se comporta durante a usinagem é da maior importância na fabricação dos componentes. A usinagem de compósitos reforçados com fibra de carbono pode ser realizado com a maioria das ferramentas convencionais. Entretanto, a abrasividade desses materiais reduz drasticamente a qualidade do corte e a vida da ferramenta. Este problema pode ser superado com o uso de ferramentas mais resistentes ao desgaste, como: metal duro; material cerâmico; nitreto de boro cúbico; e diamante (Spur & Wunsch, 1989; Ferreira, 1997). Verificando os resultados já obtidos e publicados em ensaios experimentais com ferramentas de corte na usinagem de compósito, e que estão sendo analisados neste trabalho voltado à obtenção de parâmetros de corte, serão observados comportamentos no processo de usinagem conforme descritos a seguir :

- Delaminações;
- Desgaste excessivo da aresta de corte (abrasão);
- Esforços de corte.

3.2 - Delaminações

Uma das causas do aumento de rugosidade em usinagem de plásticos reforçados com fibras (PRFC) são delaminações que ocorrem no corte das fibras que possuem ângulos de posição (α) menores que 90° em relação à direção de corte conforme Figura 3.1.(a); a recuperação elástica que ocorre no corte das fibras que possuem ângulos maiores de 90° em relação à direção de corte mostradas na Figura 3.1.(b); e a craterização da superfície da peça que ocorre no corte da resina pura, conforme Figura 3.1.(c).

Portanto a deterioração da superfície ocorrida na usinagem de compósitos reforçados por fibra é decorrida em função de causas ocorridas durante o corte, em razão da elevada heterogeneidade desses materiais (Hasegawa, 1984).

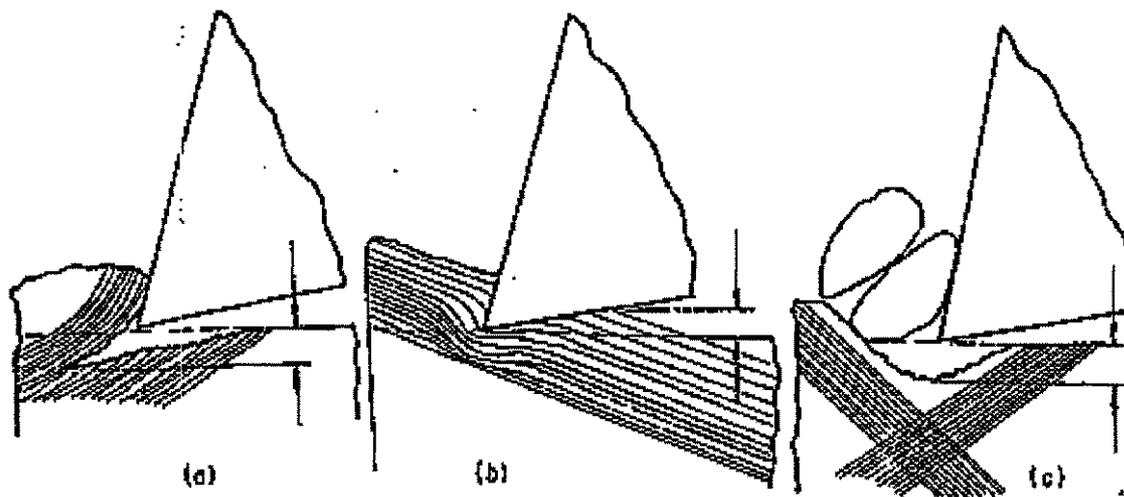


Figura 3.1 - Causas de deterioração da superfície na usinagem de PRFC (Takeshita et al., 1985).

3.3 - Formação do cavaco

Na usinagem de materiais frágeis, que possuem zona plástica bem pequena e, por isso rompem-se 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). Materiais frágeis como o ferro fundido cinzento tendem a formar cavacos curtos na forma de pequenas partículas. Conforme as condições de usinagem e a geometria da ferramenta, se estas impuserem uma deformação maior do cavaco, pode-se passar do cavaco contínuo ao cisalhamento, mas o principal fator determinante do tipo de cavaco é o material da peça usinada. Em geral, materiais dúteis (aço, alumínio) formam cavacos contínuos ou de cisalhamento e materiais frágeis (ferros fundidos e latões) formam cavacos de ruptura.

As porcentagens de calor total devido à deformação e do cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça, variam com o tipo de usinagem e a forma da ferramenta. Porém, numa primeira aproximação, pode-se dizer que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento são as principais fontes geradoras de calor, seguidas pelo atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e depois pelo atrito peça-superfície de folga da ferramenta. Este calor é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e do fluido de corte (Ferraresi, 1977; Diniz et al., 1999).

Os compósitos PRFC por sua natureza heterogênea causam problemas de usinagem. Durante a usinagem, a aresta da ferramenta tende a deformar o material de trabalho e consequentemente cisalha-o na forma de cavaco. A intensidade de deformação e cisalhamento do material nas proximidades do corte depende do tipo da fibra e da matriz do material. Durante a deformação as fibras comportam-se de maneira diferente, dependendo de suas características de resistirem ao dobramento. Estas características, tais como saliências, delaminação e heterogeneidade na composição física do material contribuem para adicionar problemas de usinabilidade. Com compósito PRFC, instantâneas rupturas das fibras com quebras do material da matriz podem ser observadas, em que pouquíssima deformação pode ser associado com o material removido.

Durante a usinagem de PRFC, uma grande quantidade de pequenos cavacos foram produzidos, os quais eram pequenos fragmentos dos compósitos, formados por uma série de fraturas durante a usinagem. Diferente do caso de cavacos de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) os quais são mais ásperos, os cavacos de PRFC são finos e poeirentos, com pequenas fibras de carbono. A fibra não tem muita capacidade para deformação, provocando fraturas bruscas, com muito pouca deformação do material da matriz. Foi observado também que as fibras de carbono desprendem-se do material sem muita aderência residual da matriz sobre as

mesmas. Isto indica que durante a usinagem, quando o compósito é tensionado, e sendo camadas de material entrelaçado, devem causar deslizamento da fibra através da matriz, ou seja a ligação matriz/carbono não é tão forte como os compósitos matriz/vidros. Isto pode também ser um fator que propicia boa textura da superfície usinada de PRFC, com exceção das características de esforços e tensões da fibra de carbono (Santhanakrishnan, 1993).

A usinagem de compósitos reforçados com fibras difere significativamente da usinagem dos materiais metálicos, em função da diversidade estrutural entre estes materiais. A disposição das fibras na matriz define o mecanismo de corte durante a usinagem e, conseqüentemente, o tipo de cavaco produzido, as forças de corte, a vida da ferramenta, a rugosidade e a integridade da peça (Santhanakrishnan et al., 1993). A Figura. 3.2 mostra algumas configurações típicas do mecanismo de corte em compósitos reforçados com fibras.

As propriedades físicas da fibra e da matriz são significativamente diferentes, as quais combinadas com as diversas orientações das fibras, 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, que apresentam uma característica de corte diferente do compósito reforçado com fibras orgânicas como o Kevlar (Konig et al., 1985).

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/matriz, conforme ilustrado na Figura 3.2. 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 (Krishnamurthy et al., 1992).

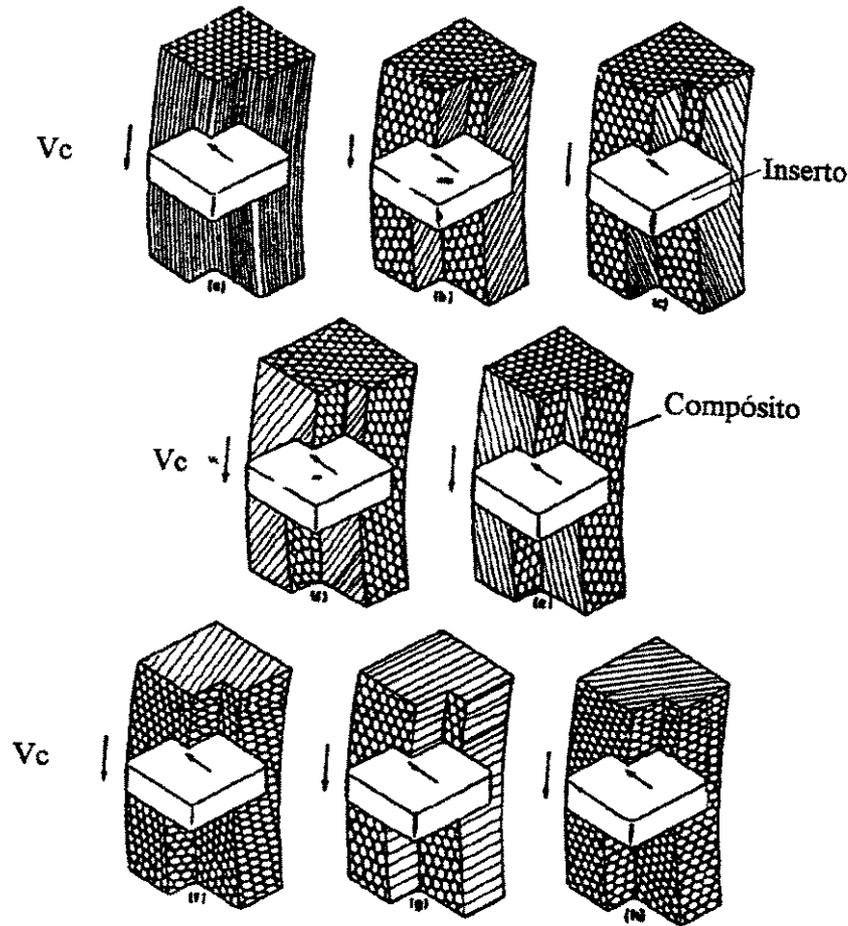


Figura. 3.2 – Corte de compósitos em várias orientações (Santhanakrishnan et al., 1993).

Na usinagem de compósito reforçado com Kevlar (PRFK), as fibras são mais difíceis de cortar, apresentando após o processo um número grande de felpas (fibras não cisalhadas). Já na usinagem de compósito PRFC ocorre o cisalhamento na seção transversal e ao longo do comprimento das fibras. As fibras de carbono sofrem uma fratura frágil com pouquíssima deformação, pois, por apresentarem uma estrutura em cadeias lamelares, facilitam o deslizamento da fibra sobre o material da matriz durante o corte. Assim, o compósito PRFC é mais propício ao corte, comparado aos compósitos PRFK (Dennis, 1991). Na Figura 3.3 são apresentados os tipos de situações que a ferramenta de corte enfrenta durante o processo de usinagem.

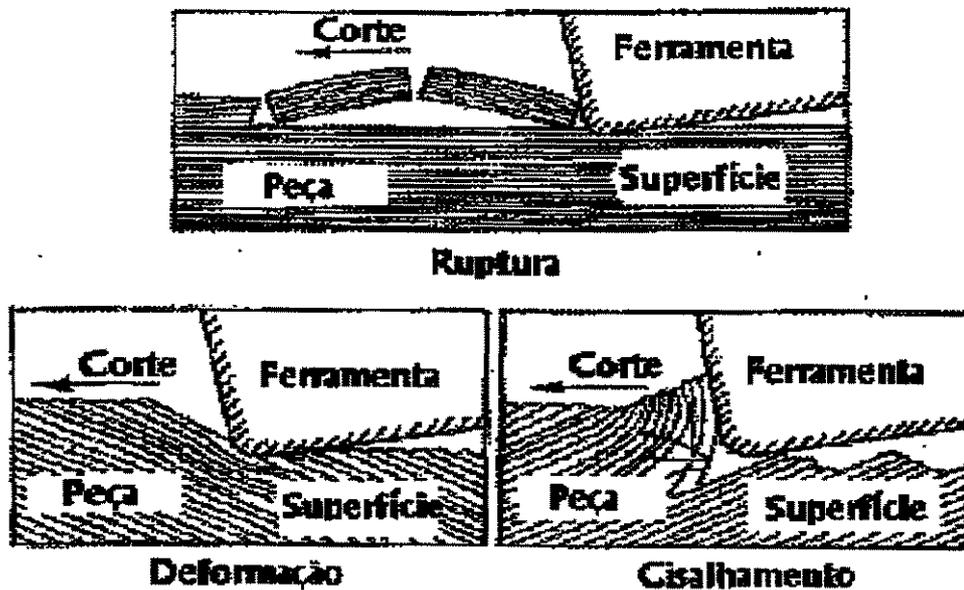


Figura. 3.3 – Ruptura, deformação, e cisalhamento durante o corte de compósitos (Wern & Ramulu, 1995).

Na usinagem do compósito PRFC, um grande número de pequenos cavacos são produzidos. Os cavacos são pequenos fragmentos de compósitos formados de uma série de fraturas do material durante a usinagem. A Figura. 3.4 mostra uma típica macrografia de cavacos obtidos durante o torneamento de compósito PRFC de tecido bobinado. Diferente dos cavacos obtidos da usinagem em compósitos de fibra de vidro, que são mais grossos, os cavacos de compósitos PRFC são finos na forma de um pó, e com presença de fibras de carbono curtas (Puw & Hocheng, 1993).

A quantidade de deformação e cisalhamento do cavaco na proximidade da ponta da ferramenta depende do tipo de fibra e do material da matriz. Durante a deformação, as fibras comportam-se de maneira diferente, dependendo de propriedades como sua resistência à flexão. Estas características contribuem para elucidar adicionais problemas de usinagem como deformação e delaminação de fibras (Bhatnagar et al., 1995).

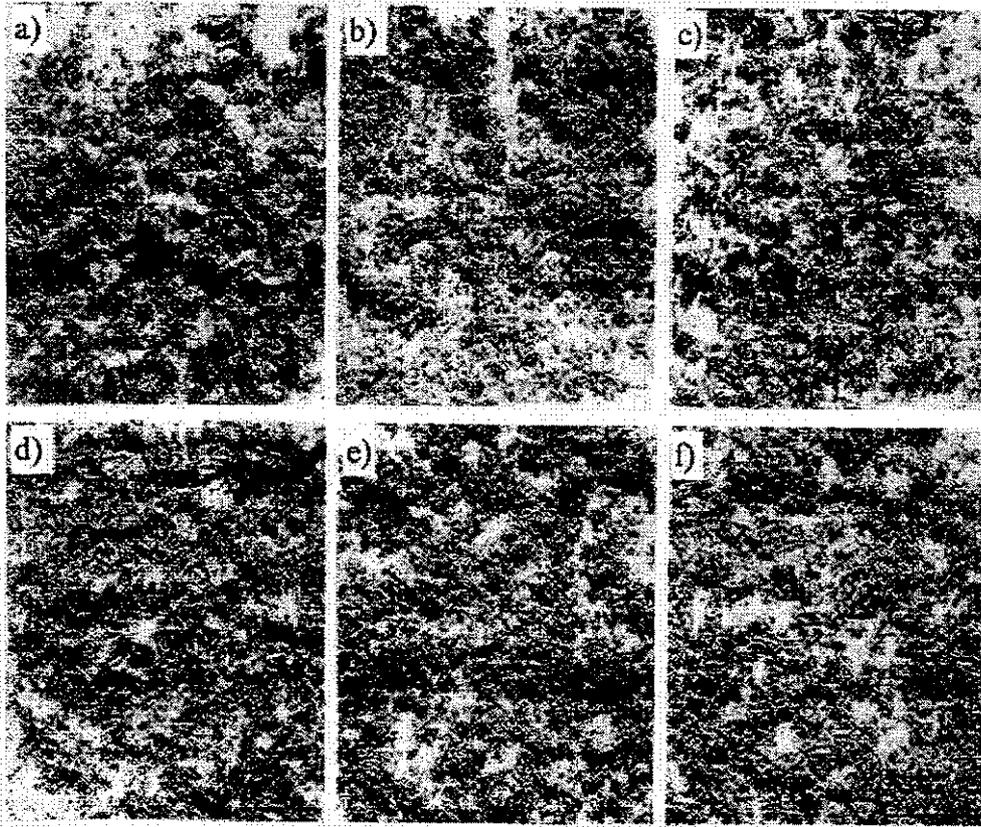


Figura. 3.4 – Macrografia de cavacos de PRFC: (a)-(c) $V_c = 100\text{m/min}$, $a_p = 1\text{mm}$, $f = 0,025$; $0,05$; $0,1\text{mm/v}$; (d)-(f) $V_c = 200\text{m/min}$, (3,5x) (Santhanakrishnan et al., 1992).

A Figura. 3.5 mostra uma típica coleção de cavacos produzidos por ruptura no torneamento de PRFC. Nota-se que as fibras de carbono sofrem fraturas agudas durante a usinagem, com pequena deformação da matriz. Devido às tensões sofridas durante o corte, as fibras de carbono soltam-se em grande parte da matriz em função do deslizamento de suas lamelas gráficas. As ligações fibra/matriz no composto PRFC não são fortes como no composto PRFV. Esta pode ser uma das razões que possibilitam obter boas texturas superficiais usinadas de PRFC em comparação aos PRFV e PRFK, em função das características de tensão-deformação das fibras de carbono (Dennis (b), 1991).

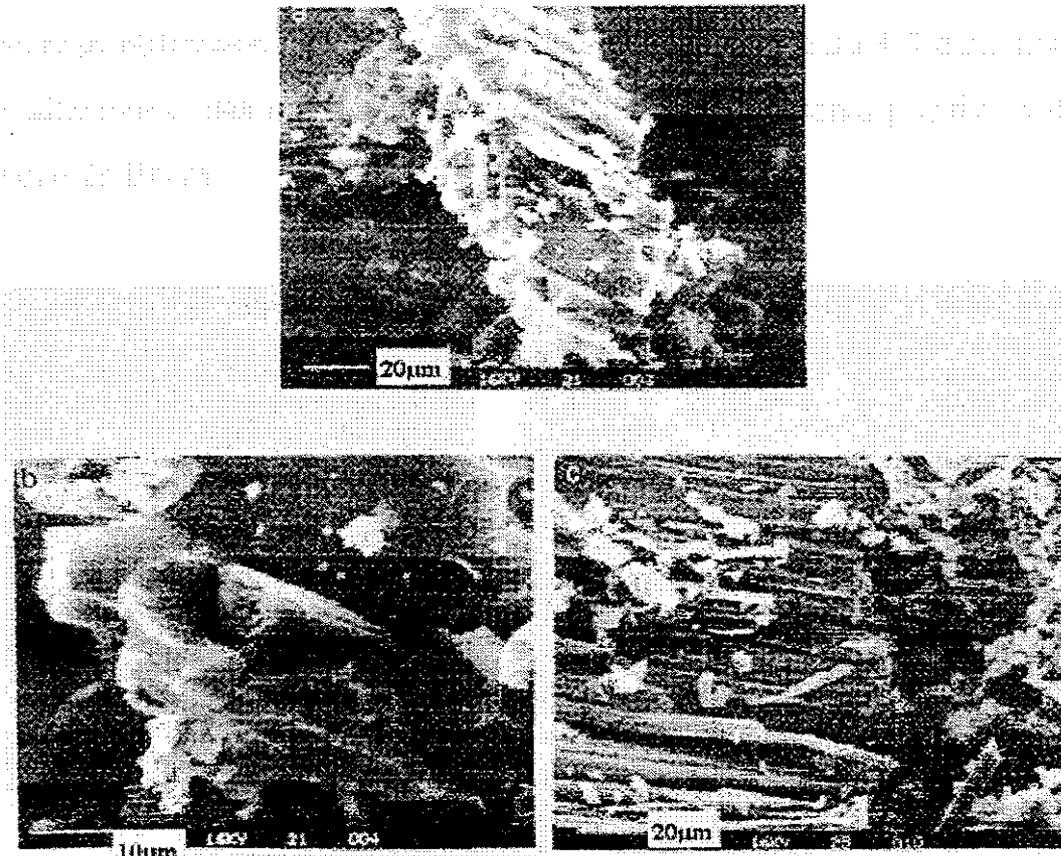


Figura.3.5 - Rupturas das fibras e matriz na usinagem do compósito PRFC; $V_c = 100$ m/min, $f = 0,025$ mm/v, $ap = 1$ mm (Santhanakrishnan et al., 1992).

(Kim et al., 1992) estudou o mecanismo de formação de cavaco no torneamento de compósito PRFC bobinado com 60% de volume de fibras (60% V_f). Ele observou os tipos de cavacos formados durante a usinagem em função do ângulo de bobinagem das fibras e do ângulo de saída da ferramenta. A Figura. 3.6 mostra as fotos tiradas em câmara de alta velocidade da operação de torneamento do compósito. Os ângulos de bobinagem das fibras foram de $w=0^\circ$ e $w=90^\circ$ em relação ao axial da peça, ou seja perpendiculares e paralelos à direção de corte, respectivamente. Os mecanismos de formação de cavaco observados foram do tipo de delaminação, flambagem e fibras cortadas.

A Figura. 3.6 (a) mostra que o corte tipo delaminação ocorre quando a ferramenta é positiva (ângulo de saída medido no plano de trabalho $\gamma_f = 20^\circ$) e ângulo de bobinagem paralelo à direção de corte ($w = 90^\circ$). Neste processo observou-se uma baixa rugosidade e pequenas avarias na superfície usinada. Entretanto, o cavaco formado apresentou-se maior que nos outros casos. A Fig. 3.6 (b) ilustra o cavaco formado por flambagem das fibras, ocorrido quando da utilização de ferramentas negativas ($\gamma_f = -5$ e -10°) para todos ângulos de bobinagem das fibras. Neste caso obteve uma rugosidade mais elevada. A Figura.3.6 (c) mostra o cavaco formado por cisalhamento das fibras, em função do uso de ferramenta positiva e direção de corte perpendicular às fibras.

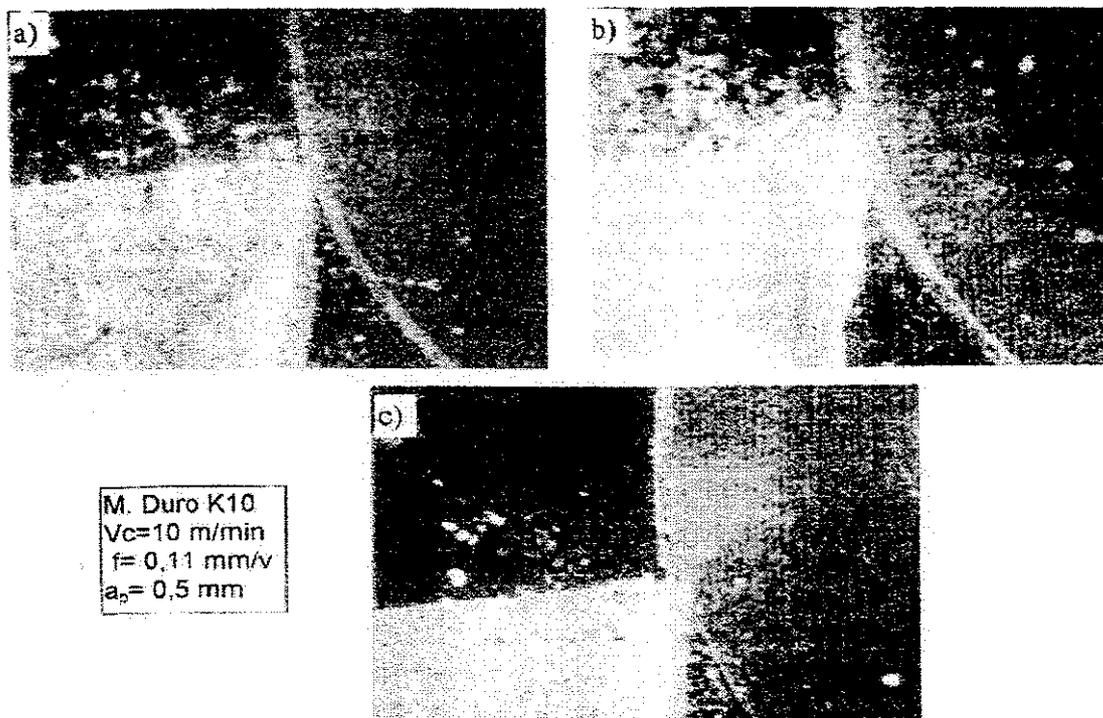


Figura 3.6 - Formação do cavaco no torneamento de PRFC. a) Tipo delaminação ($w = 90^\circ$, $\gamma_f = 20^\circ$); b) Flambagem ($w = 90^\circ$, $\gamma_f = -10^\circ$); c) Fibras cisalhadas ($w = 0^\circ$, $\gamma_f = 20^\circ$). $V_c = 10$ m/min, $f = 0,11$ mm/v, $a_p = 0,5$ mm (Kim et al., 1992).

A usinagem de compósitos PRF laminado apresenta um mecanismo de corte diferente do compósito bobinado. Os materiais compósitos laminados são obtidos pela superposição de camadas de fibras e resina. No entanto, estes compósitos apresentam, em operação de

torneamento, um mecanismo de corte particular, que varia ponto a ponto sobre a superfície da peça. A Figura. 3.7 mostra a mecânica de contato no torneamento de um compósito laminado cujas fibras estão dispostas paralelamente na direção longitudinal da peça. O ângulo de contato (α) é a medida entre a direção de corte e a orientação das fibras. A posição angular $\alpha=0^\circ$ é a posição circunferencial da peça onde a direção das fibras coincidem com a direção de corte. Assim neste processo, as tensões mecânicas e térmicas na formação do cavaco variam a cada instante sobre a circunferência da peça, e a textura superficial gerada depende de outros fatores além dos parâmetros de corte tradicionais, e, por exemplo, também é função ângulo de contato fibra-ferramenta (Spur & Wunsch, 1988).

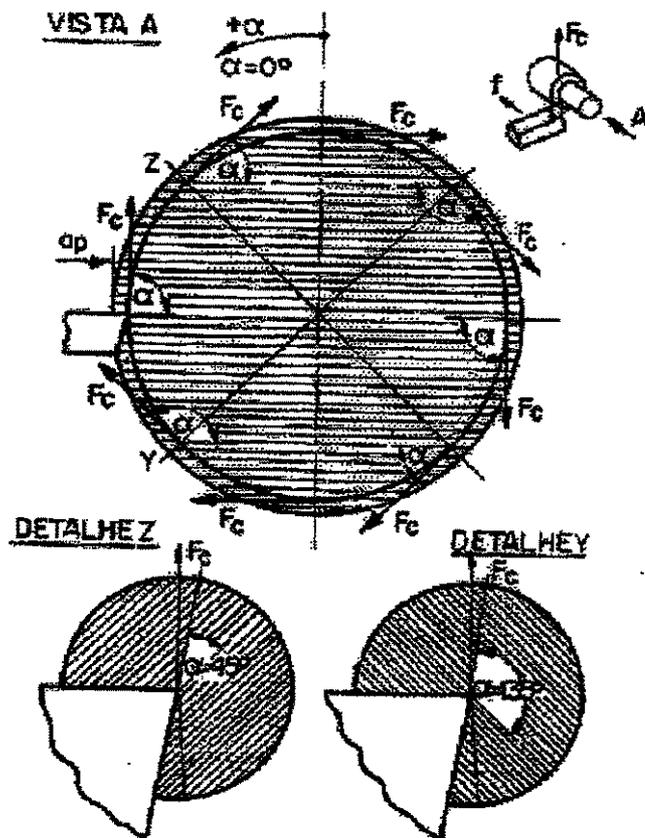


Figura. 3.7 – Mecânica de contato ferramenta-peça no torneamento de compósito laminado. (Spur & Wunsch, 1988).

3.4 - Desgaste da ferramenta de corte

Analisando o comportamento dos mecanismos de corte durante a usinagem de materiais compósitos reforçados com fibras (PRFC) observa-se um desgaste excessivo da ferramenta. Tais desgastes apresentam características abrasivas, e dependem da velocidade de corte, da área de contato entre ferramenta-peça, das características do compósito usinado e etc. (Lélis, 1987). Os compósitos CRFC apresentam uma estrutura heterogênea e anisotrópica que, ao contato das fibras na aresta de corte da ferramenta dificulta o mecanismo de remoção do cavaco durante a usinagem e com isso a ferramenta de corte na usinagem do compósito reforçado com fibras, está sujeita à esforços pulsantes, temperaturas elevadas e a própria distribuição das fibras dentro do material.

Além dos esforços, a aresta de corte da ferramenta também é submetida a crescentes temperaturas de corte, devido aos compósitos RFC terem elevada abrasividade e apresentarem baixa condutividade térmica, tendo a ferramenta que dissipar a maior parte do calor gerado durante a usinagem. A condutividade térmica do compósito RFC é bem menor que a dos metais. Segundo Krivov & Lupkin (1995) aproximadamente apenas 10% do calor gerado no processo de usinagem (torneamento) é retirado pela peça, 5% pelo ambiente, e a grande parcela de 80% pela ferramenta. Assim este processo apresenta um quadro de balanceamento térmico diferente da usinagem dos metais, onde a maior parte do calor gerado na usinagem é removido pelo cavaco.

(Friend et al., 1972) fizeram testes de usinagem convencional e não convencional. Para reduzir o desgaste da ferramenta recomendam ferramentas de diamante. Para obtenção de formas complexas de alta precisão, os autores recomendam usinagem ultra-sônica. Um excessivo processo de fricção das fibras sobre a superfície de folga da ferramenta acontece durante a usinagem, que combinados com esforços pulsantes e temperaturas elevadas, submete a ferramenta a um processo excessivo de fadiga, degradação térmica e abrasão, deixando-a sujeita a vários mecanismos de desgaste (Komanduri, 1997). Segundo Santhanakrishnan et al., (1993) o mecanismo de desgaste predominante em torneamento de PRFC é a abrasão e aderência/arrastamento (Attrition), desenvolvido no caso da ferramenta de metal duro K20 em função da ação abrasiva das fibras e, em menor intensidade, em relação à ferramenta P30. No metal duro P30 pode ocorrer transferência de TiC do flanco da ferramenta para a superfície da peça com formação de sulcos na superfície de folga (desgaste de entalhe). Sendo que, geralmente

não é observado desgaste de cratera na superfície de saída, apresentando apenas um arredondamento das arestas principais e secundárias de corte, quando da usinagem de composto PRFC.

A Figura 3.8 mostra a influência da velocidade de corte e do tipo de material da ferramenta sobre a temperatura de corte durante o torneamento de composto PRFC. Observa-se que a temperatura aumenta com a velocidade de corte e para cada tipo de ferramenta existe uma velocidade crítica onde há um aumento brusco da temperatura de corte. As diversas curvas de temperatura em relação à velocidade de corte devem-se aos diferentes coeficientes de condutividade térmica de cada material de ferramenta.

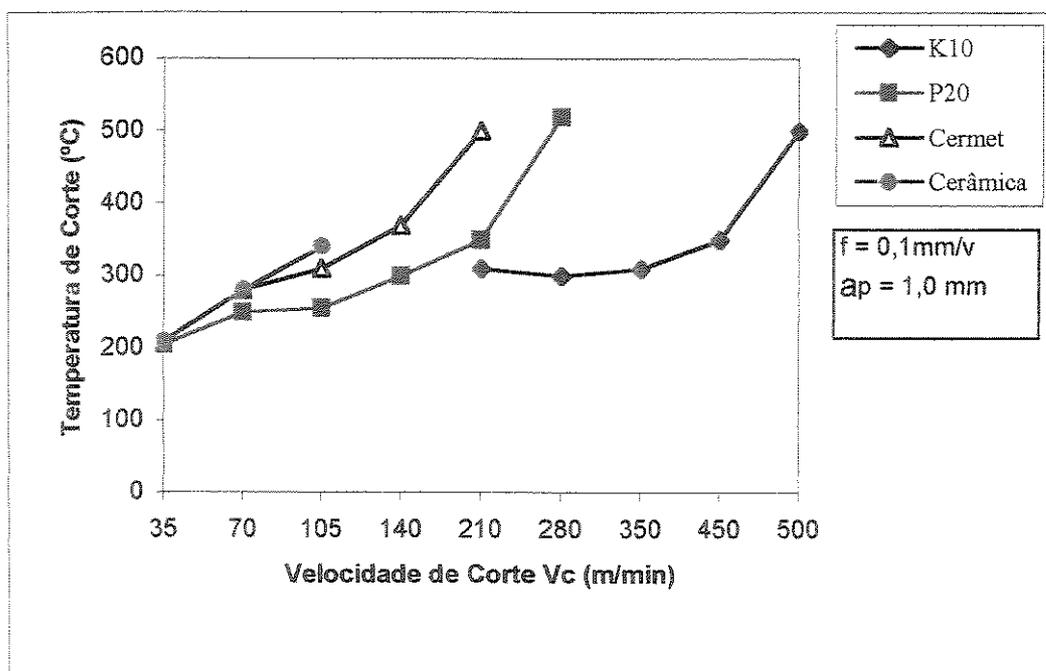


Figura 3.8 - Relação entre a temperatura x velocidade de corte (Santhanakrishnan, et al., 1993).

No torneamento com ferramenta de metal duro ISO K10 recoberta com TiN foram observados primeiramente, um tipo desgaste de flanco decorrido do atrito do flanco da ferramenta com a superfície da peça. Devido às tensões termo-mecânicas alternadas ocorridas durante o corte, observou-se a formação de trincas paralelas na direção perpendicular à aresta de

corte na região do flanco da ferramenta. Durante a usinagem desenvolve-se altas temperaturas em três regiões distintas da ferramenta na região de corte: (i) na profundidade de usinagem máxima (VB_N); (ii) na ponta de corte; e (iii) na aresta secundária (VB_c), conforme mostra a Figura. 3.9. Estas regiões sofrem aquecimento e resfriamento muito rápidos, promovendo tensões de choque térmico. Também, em função da flutuação dos esforços devido à variação de orientação das fibras em relação à aresta de corte, a ferramenta sofre tensões termo-mecânicas resultando em trincas que se iniciam na região da profundidade de usinagem e seguem na direção da ponta, enfraquecendo o flanco da ferramenta e chegando ao lascamento por choque térmico (spalling) da camada de revestimento (Santhanakrishnan, et al., 1993). Masuda et al. (1993) estudaram o mecanismo de desgaste de ferramentas de metal duro K10 em torneamento de compósito PRFC bobinado ($60\%V_f$) e carbono sinterizado ($\rho = 1,74 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_T = 25 \text{ Mpa}$) obtido a partir de grafite. A Fig. 3.10 mostra um padrão típico de desgaste sofrido na superfície de folga da ferramenta na usinagem do carbono sinterizado, onde observou-se inúmeras marcas e sulcos bem definidos nas superfícies de folga, cuja intensidade aumentava com o avanço e com o tempo de usinagem.

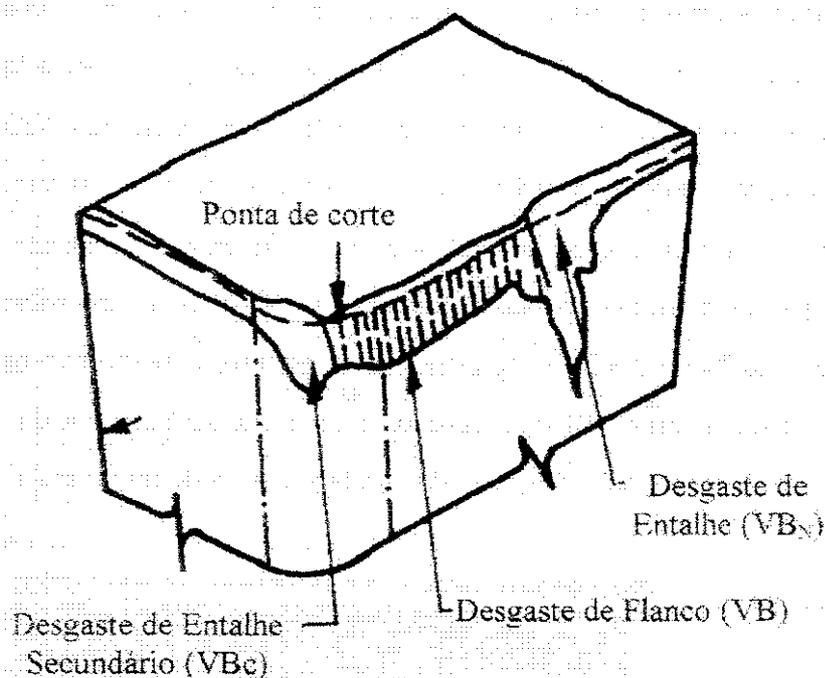


Figura 3.9 - Ilustração dos desgastes da ferramenta. (Santhanakrishnan, et al., 1993).

O mesmo tipo de desgaste foi observado por Kanda et al. (1995) em operação de fresamento de grafite com fresa de topo de ponta esférica de metal duro K10. Na superfície de saída da ferramenta, um pequeno desgaste de cratera foi percebido no torneamento do carbono sinterizado. O desgaste ocorrido é relativamente alto em função dos baixos esforços de corte observados ($F_c=14N$, $F_f = 8N$, $F_p = 7N$; para $V_c = 100m/min$, $f = 0,12mm/v$, $a_p = 1mm$). Diferentes taxas de desgaste ocorreram em função do tamanho de grão do carboneto de tungstênio (WC) e da porcentagem de cobalto (Co) no metal duro, parâmetros estes que determinam as propriedades mecânicas como dureza e tenacidade à fratura da ferramenta.

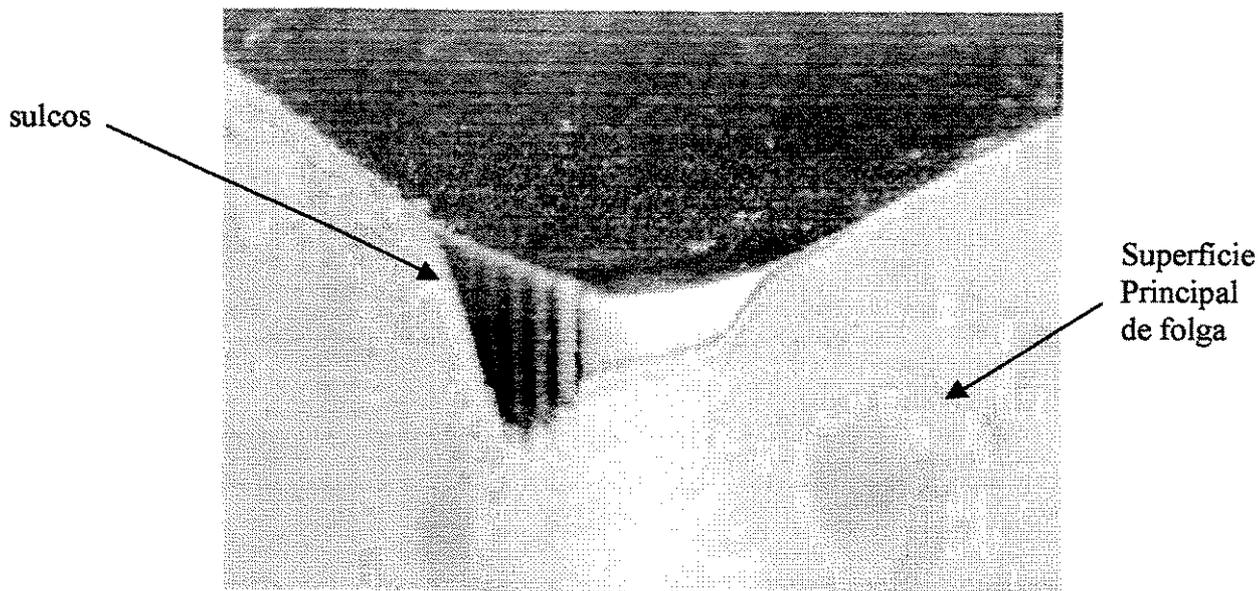


Figura 3.10 – Desgaste na superfície de folga da ferramenta de metal duro K10 na usinagem de carbono $V_c = 85 m/min$, $f = 0,12mm/v$, $a_p = 1mm$ (Masuda et al., 1993).

A Figura 3.11 mostra fotos da superfície de folga da ferramenta antes do corte (tempo de corte $t_c=0s$), com $t_c=24s$ e $t_c=36s$ usinando carbono. As fotos com tempo de corte de 24s e 36s revelam pouca presença da fase de cobalto na estrutura e grãos gastos de WC. Observou-se a presença de trincas em partículas de WC em 24s e subsequente fratura em 36s de corte. Dos resultados obtidos por (Masuda et al., 1993) pode-se relatar que: (i) o carbono duro da peça adere sobre as superfície de saída e folga da ferramenta (ruptura de aderência); (ii) ocorrência de

elevado desgaste da fase de cobalto em pouco tempo de corte, enquanto que o desgaste do WC ocorre em menor escala; (iii) o WC sofre trincas e fraturas no decorrer da usinagem. Portanto, o fenômeno de desgaste na usinagem de carbono com metal duro WC-Co deve-se à severa ação abrasiva de partículas de carbonos duros da peça, que leva à fratura frágil do WC da ferramenta de metal duro.

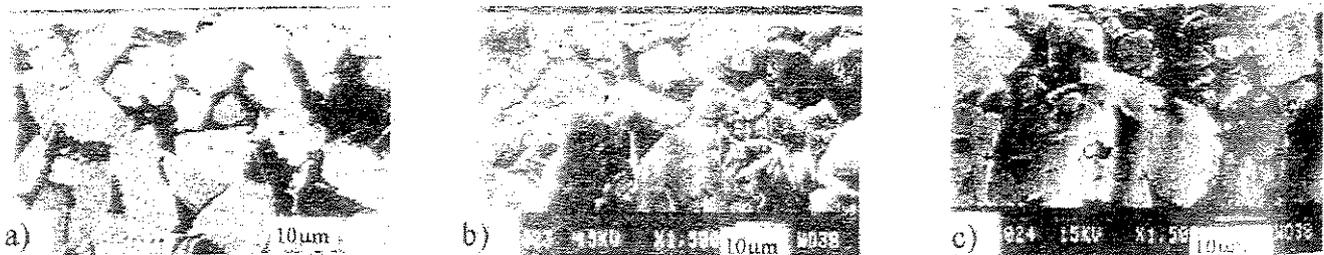


Figura 3.11 – Fotos da superfície de folga do metal duro na usinagem de carbono. a) 0 s, b) 24 s; c) 36 s (Masuda et al., 1993)

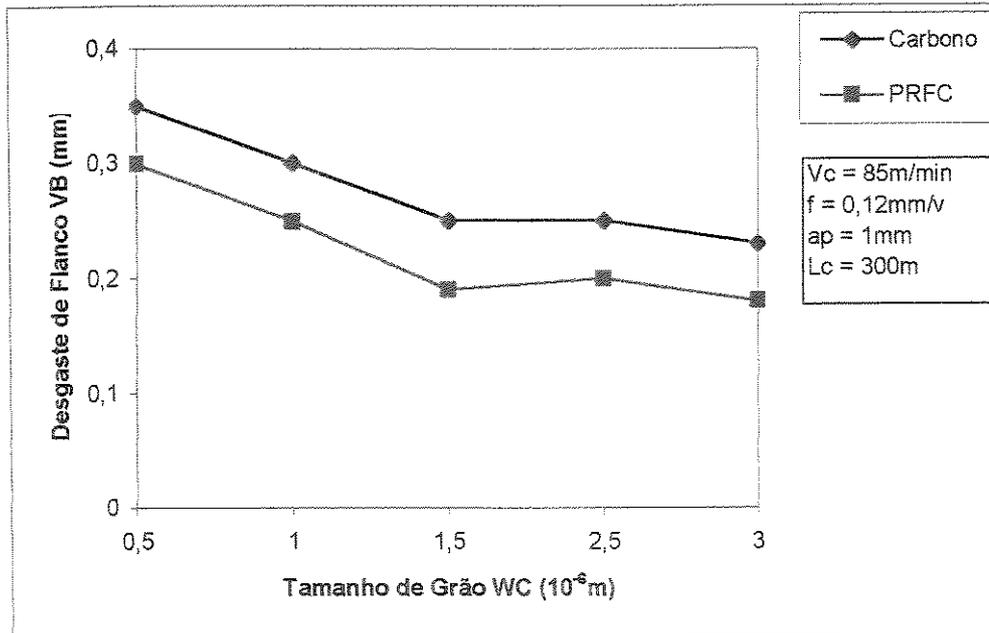


Figura 3.12 – Efeito do tamanho do grão sobre o desgaste da ferramenta de metal duro (Masuda et al., 1993).

A influência do tamanho de grão de WC e do teor de Co sobre o desgaste é mostrado nas Figura.3.12 e 3.13 em operação de torneamento do carbono sinterizado e do composto PRFC. Verifica-se que o desgaste da ferramenta aumenta com o teor de cobalto e diminui com o aumento do tamanho do grão. Assim, prefere-se trabalhar com um metal duro de grão maior e menor porcentagem de cobalto (Masuda et al., 1993).

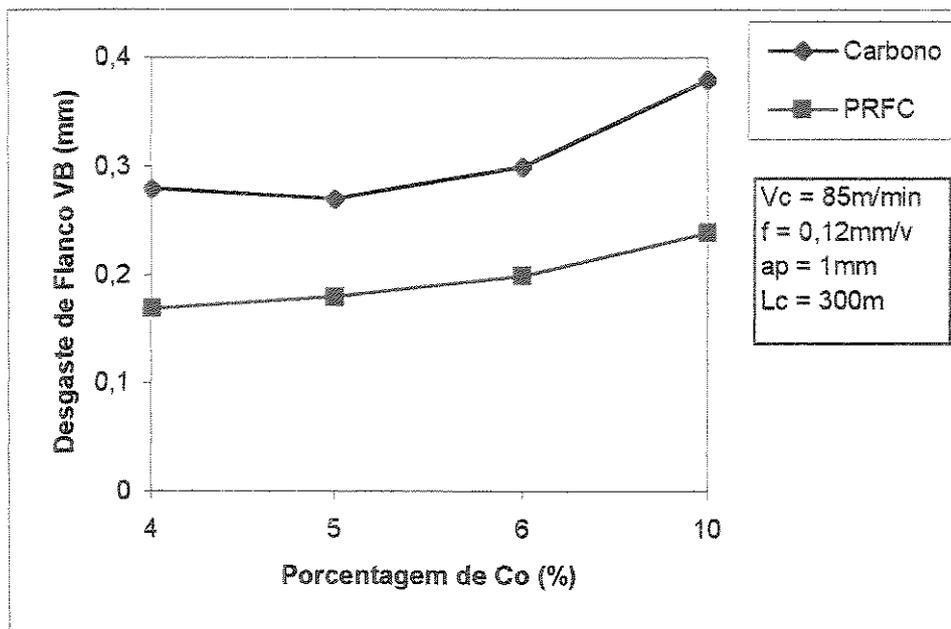


Figura.3.13 - Efeito do conteúdo de cobalto no desgaste da ferramenta de metal duro WC-Co (Masuda et al., 1993).

3.4.1 - Características de desgaste do metal duro (tipo P, tipo K)

Durante a usinagem do composto PRFC as fibras de carbono sofrem rupturas instantâneas, as quais resultam em menos deformação sobre a porção usinada e quase nada das fibras mostram-se salientes sobre a superfície usinada, tornando-se uma usinagem mais fácil em relação a outros compostos. Isto tem facilitado a usinagem com relativamente maiores velocidades de corte

A Figura 3.14 mostra padrões de desgaste típicos observados nas ferramentas tipo P durante a usinagem de PRFC compostos. O desgaste de flanco observado está associado com

bastante uniformidade e compactas marcas de abrasão. Uma vista ampliada de parte da ferramenta acima da aresta de corte principal é mostrada na Figura 3.14 (a)(f). Uma ilustração da estrutura da pastilha com ampliação, mostrando a camada de cobalto como visto na figura.

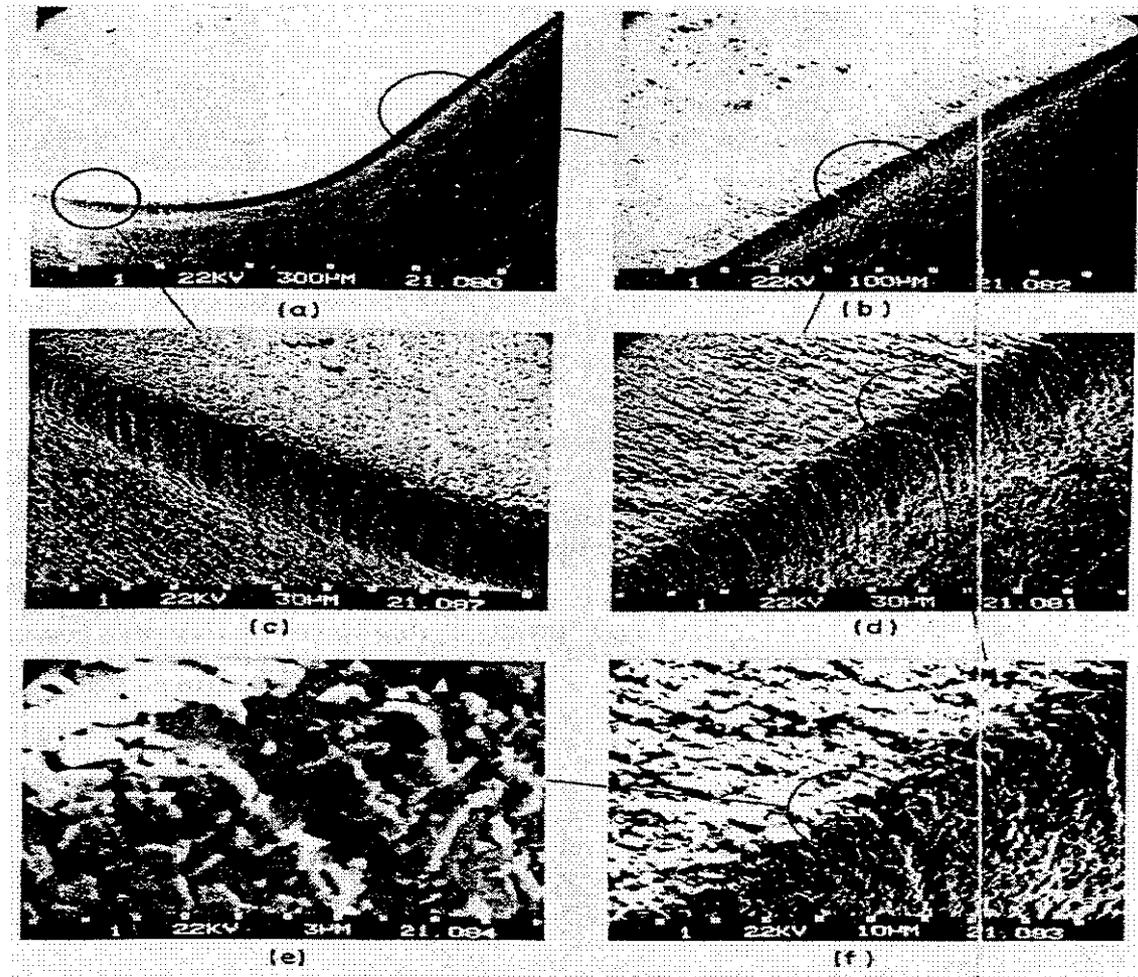


Figura 3.14 – Padrões de desgaste das ferramentas tipo P (Santhanakrishnan, et al., 1993).

É provável também que a camada de cobalto pode ser eliminada devido à temperaturas muito altas dominantes sobre a aresta de corte. A usinagem de PRFC compósitos com pastilhas tipo K renderam melhores resultados. Estas ferramentas cortam PRFC compósitos com uma ampla faixa de velocidade de crítica e com desgaste mínimo da ferramenta. Durante a usinagem com pastilhas tipo K houve desgaste mínimo de aresta e o flanco estava mais liso com moderadas marcas de abrasão. A Figura. 3.15 ilustra típicos padrões de desgaste observados em ferramentas

tipo K: estes padrões são refletidos em melhor performance de ferramenta, como observado na qualidade superficial e pressão de corte específica (Santhanakrishnan, 1993).

A usinagem de compósitos PRFC usando ferramentas de corte de metal duro e aço rápido apresentaram desgaste muito severo. Portanto a velocidade de corte e avanços para a operação de usinagem devem ser definidos cuidadosamente, e também a superfície da peça fica sujeita à danos superficiais como; trincas, delaminações e o comprometimento da rugosidade superficial. (Kim, 1991).

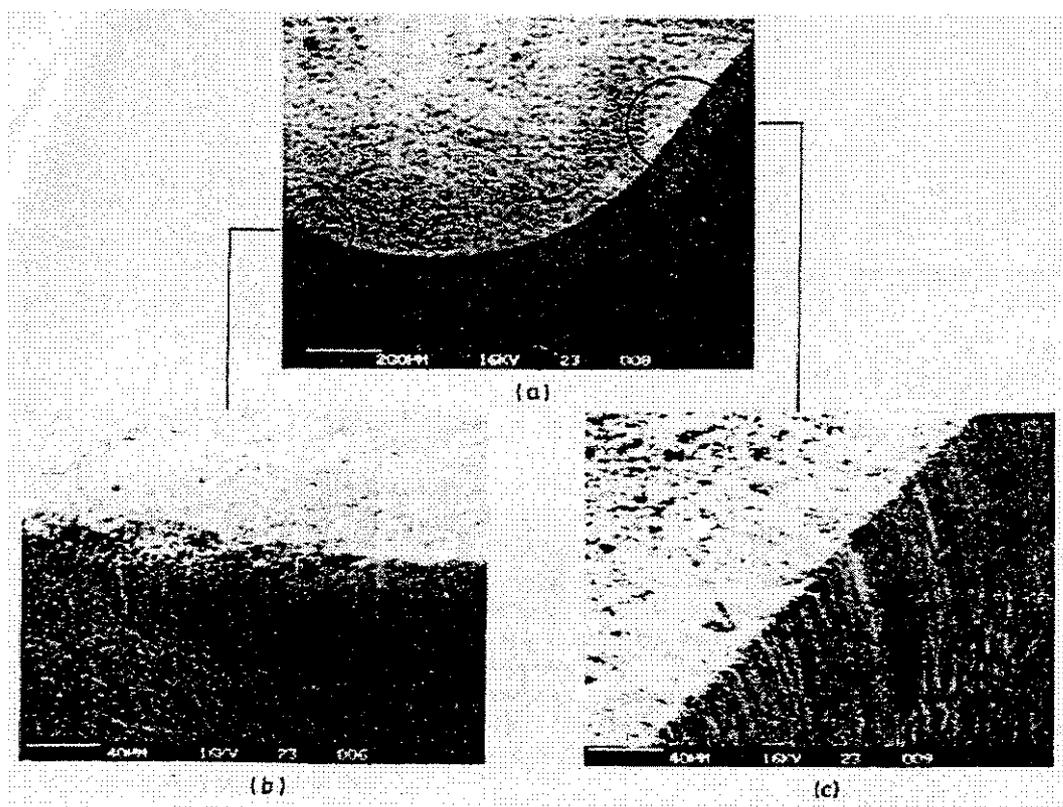


Figura 3.15 - Padrões de desgaste das ferramentas tipo K (Santhanakrishnan, 1993).

Fazendo ensaios de usinagem em compósitos PRFC verificou-se que, o processo de usinagem de compósitos consiste de uma série de fraturas criando os cavacos. A superfície torna-se mais rugosa quando a usinagem é processada perpendicular à fibra, e a superfície adquire melhor rugosidade superficial quando usinada paralela a fibra. Foi observado também que quando o compósito foi usinado perpendicular às fibras, não foi encontrado fibras visíveis na

superfície da peça, mas abaixo da superfície foram encontradas pequenas trincas provocadas pelo atrito causado pela pressão da ferramenta na peça. (Koplev, 1983). Durante a usinagem de compósitos PRFC usando ferramentas de PCD(diamante policristalino) foi observado que a aresta de corte da ferramenta e sua microestrutura tem grande influencia na eficiência do processo de usinagem ou seja, quanto maior o tamanho do grão na microestrutura, melhora a resistência ao desgaste e conseqüentemente a sua eficiência (Ramulu, 1985).

3.5 – Esforços de corte

3.5.1 - Alterações dos esforços em relação direção do corte/direção da fibra.

Apesar de compósitos PRFC serem fabricados quase sempre na forma final, às vezes é necessário a execução de alguma operação de usinagem (furação, rebarbagem, etc.) Elevado desgaste da ferramenta de usinagem e delaminação dos compósitos são algumas das preocupações em usinagem de compósitos. Segundo Koplev et al., (1983) através dos estudos feitos do comportamento das forças de usinagem em compósitos PRFC em ensaios de corte ortogonal, verificou-se que as forças são influenciadas pelas condições de corte de várias formas. Em geral existe uma relação entre o ângulo de saída da ferramenta, a formação do cavaco e a força de corte. Analisando o comportamento das forças durante a usinagem de compósitos reforçados com fibra de carbono, Koplev et al., (1983) observaram que força de formação do cavaco independe do desgaste, pois a ponta da ferramenta durante o corte não chega a penetrar na peça com uma profundidade de usinagem (a_p), mas apenas faz pressão sobre ela, resultando numa série de fraturas do cavaco.

Durante vários ensaios de torneamento de compósitos PRFC, PRFV e PRFK realizados por Krishnamurthy et al., (1992), verificou-se que geralmente as componentes das forças passiva e de avanço são maiores que a força de corte. Isto se deve ao fato, que na usinagem de compósitos há maior deformação na ponta da ferramenta em decorrência da elevada abrasão e temperatura de corte, e conseqüentemente há maior área de contato ferramenta/peça aumentando F_p e F_f .

3.5.2 - Avaliação da Pressão Específica de Corte

Conforme mostrado nas figuras 3.14 e 3.15, observou-se que as ferramentas classe ISO-tipo K cortam PRFC melhor que classe ISO-tipo P, e que as ferramentas tipo K apresentam variação da pressão específica de corte com baixas velocidade de corte, não como no caso das ferramentas tipo P. Sendo que os compósitos PRFC apresentam maior nível de abrasividade, a dureza da ferramenta de corte pode também ser um critério para seleção da ferramenta para usinagem de PRFC. Segundo (Santhanakrishnan et al., 1993), o tipo e a orientação das fibras tem grande influência sobre a usinabilidade dos compósitos PRFC. As fibras de carbono, dentre as mais usadas na prática, geralmente apresentam a máxima rigidez e a mínima deformação até a ruptura ($\epsilon \approx 1\%$), enquanto que as fibras de Kevlar apresentam maior resistência à flexão e à deformação, que resulta em superfícies com grande número de felpas.

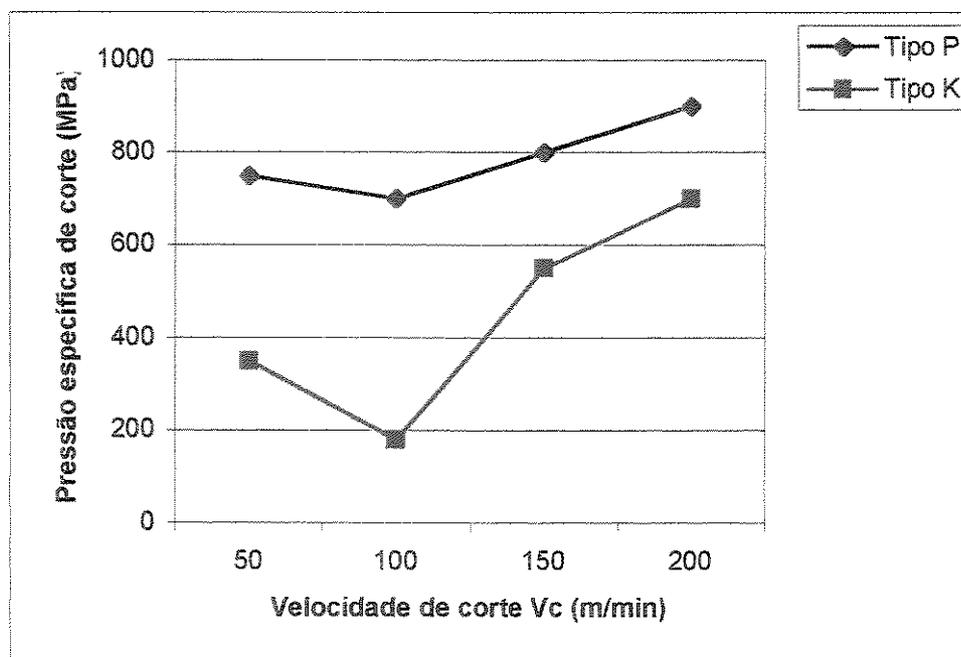


Figura 3.16 - Comportamento da Pressão específica de corte, na usinagem de compósitos PRFC, usando pastilhas de metal duro classe ISO tipo P e K (Santhanakrishnan, 1993).

Como visto na Figura 3.16, para ambas as ferramentas, a pressão específica de corte de corte diminui com aumento de velocidade na faixa de 50 – 100m/min e após 100 m/min. ocorre um aumento na pressão específica de corte. Com o aumento da velocidade de corte, a ferramenta pode cortar melhor, resultando na queda da pressão específica de corte. Continuando aumentando a velocidade de corte acima de 100m/min. a temperatura de corte deve aumentar rapidamente, resultando em deformação na ponta da ferramenta aumentando a pressão específica de corte. Desta forma 100m/min. deve ser considerada como a velocidade crítica para a usinagem de PRFC compósitos com metal duro sem cobertura.

3.6 - Medida de forças de corte

Usinagem de compósitos PRFC na maioria das vezes envolve cisalhamento e ruptura das fibras de carbono com pouca deformação. A usinagem em compósitos PRFC resultam em um grande número de pequenos cavacos. Estes cavacos têm mostrado uma menor quantidade de filamentos, isto é, os cavacos mostraram-se em pequenas partículas de compósitos removidos da peça e relativamente uniformes, os quais resultam na obtenção de melhor textura superficial com compósitos PRFC. A Figura. 3.17 mostra variações típicas das forças de corte durante a usinagem de PRFC com ferramentas de corte tipo P. Durante a usinagem em compósitos PRFC, as forças de avanço (F_f) foram mais altas. Estas forças são devido à ação da aresta de corte secundária (ponta). A maior dureza do PRFC compósito aumenta a resistência à penetração da aresta da ferramenta. Com aumento da velocidade de corte, a temperatura da aresta de corte aumenta resultando em degradação e deformação da aresta de corte da ferramenta. Isto resulta em um aumento da componente força de corte (F_c) com velocidade de corte.

As características das forças de corte são bastante diferentes. Com aumento da velocidade de corte (faixa 50 – 100 m/min.) a força de corte (F_c) registra uma queda, ainda abaixo de 100m/min.. Destas características da força de corte pode ser deduzido que, a velocidade crítica de usinagem de PRFC compósitos para ferramentas de corte tipo P é em torno de 100 m/min e avanço de 0,1mm/v.

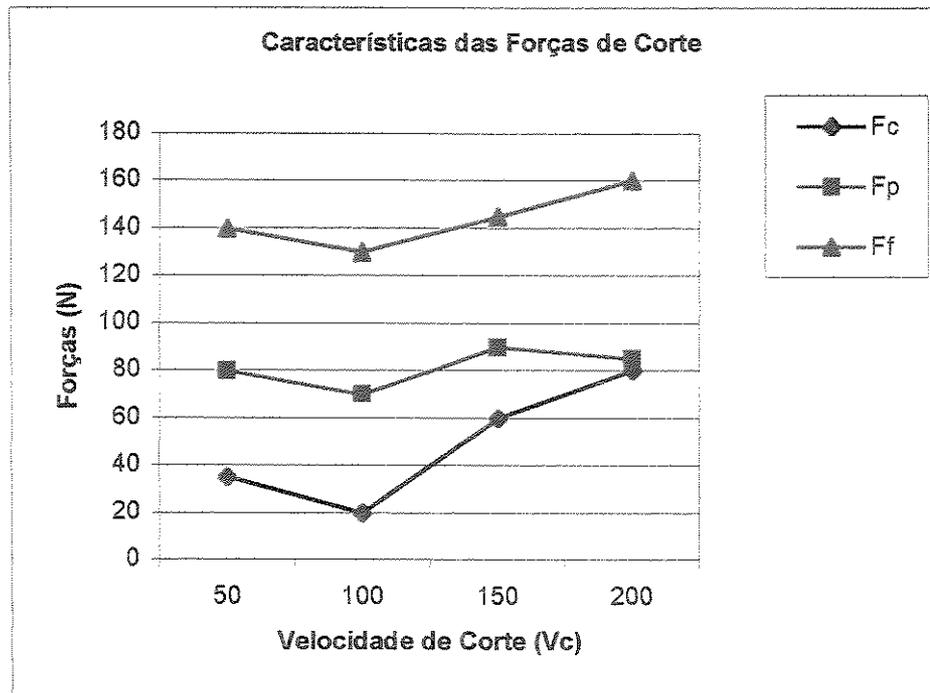


Figura. 3.17 - Usinagem de compósitos PRFC, com ferramentas de metal duro Tipo P (Santhanakrishnan, 1993).

Além das ferramentas tipo P, ferramentas tipo K convencionais também foram ensaiadas para usinagem de PRFC compósitos. A Figura. 3.18 mostra as características da força de corte quando usinadas com ferramentas tipo K. No caso das ferramentas tipo P uma distinta inflexão pode ser vista nas características das forças de corte em torno de 100m/min. De outra forma, com ferramentas tipo K a variação da magnitude da força com condições de corte eram menores, indicando melhores capacidades de corte.(Santhanakrishnan, 1993). Entretanto, comparando as forças de corte das duas ferramentas pode ser visto que as ferramentas tipo K cortam PRFC compósitos com força levemente mais altas, especialmente com velocidades de corte mais altas. É visto que além das propriedades do material da ferramenta, pode ser influenciada pelas condutividade térmica do material da peça usinada. A condutividade térmica dos compósitos PRFC é maior do que de outros compósitos usinados. Isto deve resultar em aumento da remoção do calor pela peça resultando em redução na temperatura na aresta ou na ponta da ferramenta de corte.

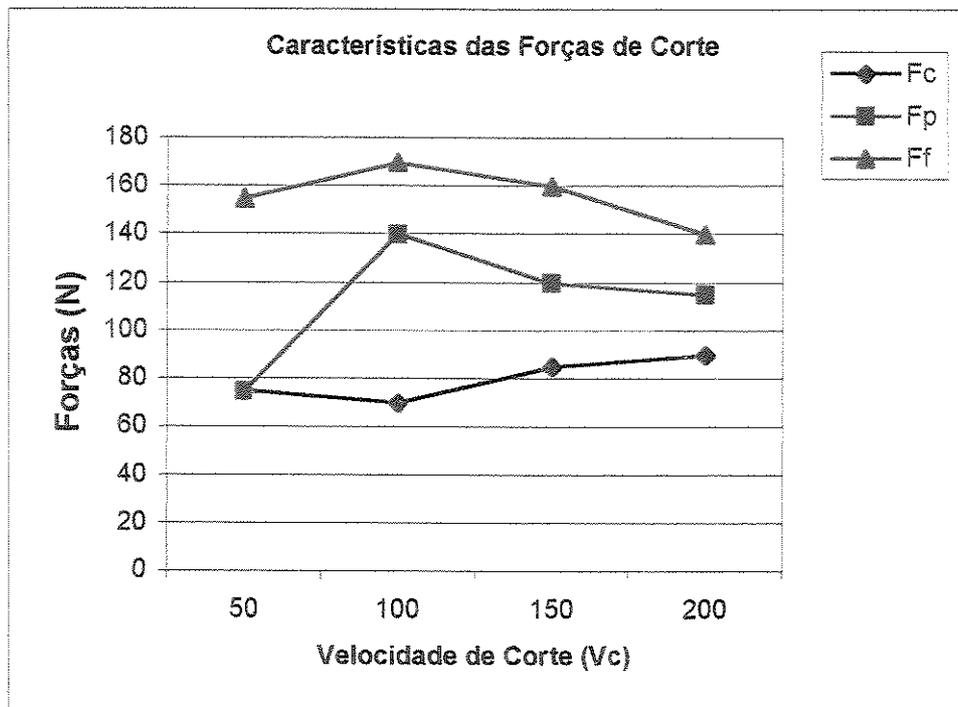


Figura. 3.18 - Usinagem de compósitos PRFC, usando ferramentas de metal duro Tipo K (Santhanakrishnan, 1993).

Sob tais condições, as ferramentas de corte tendo uma condutividade térmica mais baixa (tipo P comparada com tipo K) pode funcionar melhor, resultando na redução da magnitude da força de corte, como observado com as ferramentas tipo P especialmente com avanços maiores.

3.7 - Aspectos de Segurança e Considerações Parciais

A usinagem de compósitos PRF apresenta como subproduto um cavaco na forma de pó, e em consequência da velocidade de corte uma nuvem de poeira é formada durante o corte. As partículas resultantes do material do reforço fibroso misturadas com fragmentos da matriz, são dispersos e contaminam o ambiente de trabalho. Com o aquecimento durante a usinagem, gases tóxicos são liberados do compósito. Assim, pode-se trazer sérios riscos de saúde para as pessoas envolvidas no trabalho ou que estão no mesmo ambiente. Problemas como irritações de pele em

caso de contato, e efeitos tóxicos quando poderão ocorrer. Portanto, é estritamente necessário ter algumas precauções de segurança para a usinagem de compósitos PRFC e C/C, tais como (Krikov & Lipkin, 1995):

- A área de corte na máquina deve ser equipada com sistemas efetivos de sucção do cavaco;
- Proteção individual dos olhos, nariz, e mãos;
- Proteção de máquinas e equipamentos;
- O ambiente de trabalho deve ter um sistema de exaustão específico para tal fim;
- Camadas de pó ou cavacos não podem ser acumuladas sobre equipamentos, chão, e paredes,
- Devido ao risco de explosão por descarga elétrica estática;

Adicionalmente, em função das fibras de carbono conduzirem eletricidade, os cavacos na forma de pó podem causar curtos-circuitos nos equipamentos eletro-eletrônicos existentes no ambiente de trabalho. Em função das peculiaridades dos compósitos RFC mostradas anteriormente, nota-se que é de extrema necessidade para a ampliação de suas aplicações, o entendimento de suas características de usinagem. Observou-se que os parâmetros de usinabilidade do compósito RFC variam em função do tipo e orientações das fibras, e da proporção da matriz no esforço.

Assim, para cada projeto específico de compósito tem-se um comportamento diferente de usinagem. Observou-se também, que existe uma dificuldade de corte inerente devido à elevada abrasividade e não homogeneidade dos compósitos RFC, proporcionando reduzidas vidas de ferramentas. A baixa condutividade térmica do compósito faz com que a maior parte do calor gerado no processo de usinagem seja dissipado pela ferramenta, elevando a temperatura na zona de corte. Devido à estrutura não uniforme, a qualidade superficial dos compósitos RFC podem ser afetada por vários tipos de avarias, exigindo um controle apurado do processo de usinagem, no que tange à ferramenta e condições de corte. Portanto, este capítulo apresentou vários aspectos da usinagem de compósitos RFC, mostrando as diversas variáveis que podem influenciá-la, e a necessidade de realização de novas pesquisas sobre o assunto, em função das crescentes aplicações destes materiais em várias áreas da engenharia.

3.8 - Tipos de Ferramentas de Corte

3.8.1 - Metal Duro

O metal duro é confeccionado pelo processo da metalurgia do pó, sendo composto de finas partículas duras de carbonetos de tungstênio, titânio, tântalo, e nióbio, sinterizados com um metal aglomerante que pode ser o ferro, níquel, ou cobalto (Marcondes, 1990). As partículas duras variam de tamanho de 1 a 10 μm , e ocupam de 60 a 95% do material.

O metal aglomerante usado geralmente é o cobalto em várias porcentagens. A proporção de cobalto no metal duro influencia a dureza à quente e a tenacidade, que são propriedades importantes que a ferramenta deve possuir na usinagem dos compostos RFC (Sandvik, 1994). A Figura. 3.19 mostra a variação da dureza das ferramentas de metal duro com dois teores de cobalto, e do aço rápido, em função da temperatura.

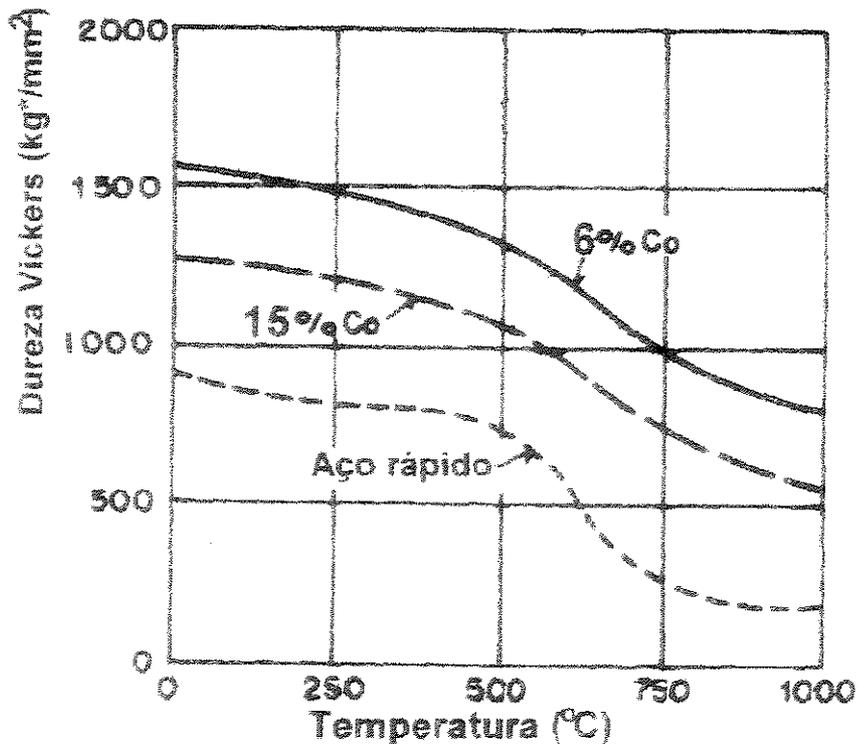


Figura 3.19 – Dureza das ferramentas em função da temperatura (Ferraresi, 1977).

Observa-se que a dureza à quente do metal duro aumenta com a diminuição da porcentagem de cobalto e com o aumento de carbonetos, e que o aço rápido apresenta queda de dureza com o aumento da temperatura. Os diversos tipos de metal duro são classificados pela norma ISO em três grupos: P, M, e K. O grupo P é constituído de uma combinação dos carbonetos WC-TiC-TaC e do cobalto, destinados para usinagem de materiais que apresentam cavacos longos. O grupo K é constituído principalmente por WC-Co, e destinado para usinagem de materiais que apresentam cavacos curtos e quebradiços, como é o caso dos compósitos RFC. O grupo M apresenta propriedades intermediárias destinadas para aplicações múltiplas.

Tabela 3.1 - Características físicas, químicas e mecânicas do metal duro (Ferraresi, 1977)

Designação ISO	%WC	%TiC+ TaC	%Co	Densidade (g/cm ³)	Dureza (HV)	σ_r (Kg/mm ²)	Mód. E (Kg/mm ²)
P01	30	64	6	7,2	1800	75	-
P10	55	36	9	10,4	1600	140	52000
P20	76	14	10	11,9	1500	150	54000
P30	82	8	10	13	1450	170	56000
P40	77	12	11	13,1	1400	180	56000
P50	70	14	16	12,9	1300	200	52000
M10	84	10	6	13,1	1650	140	58000
M20	82	10	8	13,4	1550	160	56000
M30	81	10	9	14,4	1450	180	58000
M40	78	7	15	13,5	1300	200	55000
K01	93	2	5	15	1750	120	63000
K10	92	2	6	14,8	1650	150	63000
K20	91,5	2,5	6	14,8	1550	170	62000
K30	89	2	9	14,5	1450	190	-
K40	88	-	12	14,3	1300	210	58000

A Tabela. 3.1 apresenta a as propriedades dos materiais de revestimentos das ferramentas de metal duro. Devido a sensibilidade do metal duro revestido a cortes interrompidos, as classes de metal duro convencionais ainda continuam importantes como classe complementares nestes casos. Observa-se que a medida que aumenta a porcentagem de carbonetos (TiC-TaT), a dureza aumenta e a densidade cai. Vê-se também que a medida que o cobalto aumenta no metal duro, a tenacidade medida pela resistência à ruptura transversal (σ_{rt}) também aumenta.

Tabela 3.2 – Propriedades qualitativas dos revestimentos de metal duro (Marcondes, 1990).

Material da camada	Dureza 20°C (HV)	Inércia química	Resistência à quente	Coefficiente de atrito
TiC	2700	Boa	Boa	Bom
TiN	2200	Boa	Boa	Excelente
HfN	2000	Boa	Boa	Bom
Al ₂ O ₃	2300	Excelente	Excelente	Bom

3.8.2 - Ferramentas Cerâmicas

Os materiais cerâmicos começaram efetivamente a serem utilizados como ferramentas de usinagem na década de 80, depois dos desenvolvimentos ocorridos nas suas propriedades. As cerâmicas possuem algumas propriedades interessantes como: dureza à quente e à frio, resistência ao desgaste, e excelente estabilidade química. Como desvantagem, estes materiais possuem baixa tenacidade, que facilita a formação de trincas e a quebra da ferramenta; baixa condutividade térmica que dificulta a transferência de calor, fazendo com que nas regiões próximas à ponta de corte tenha acúmulo de calor, elevando a temperatura de corte (Ezugwu & Wallbankl, 1987).

De maneira geral as ferramentas cerâmicas podem ser classificadas em dois grupos, onde no primeiro se enquadram os materiais à base de óxido de alumínio(alumina). Fazem parte desta categoria alumina mais zircônio, alumina mista, e alumina reforçada com whiskers de carbetto de silício. No segundo grupo são encontrados os materiais à base de nitreto de silício (Brinksmeier & Bartsch, 1988).

3.8.3 - Cerâmica Pura ou Branca

As ferramentas de alumina, também conhecida como cerâmica pura são produzidas através de prensagem à frio, seguida de sinterização em uma atmosfera oxidante.

Estes materiais possuem dureza de $\cong 1700$ HV, semelhante ao metal duro em temperatura ambiente, além de boa estabilidade química comparada aos carbetos e nitretos. Porém, as ferramentas de alumina possuem baixa tenacidade à fraturas e resistência ao choques térmicos e mecânico, em relação ao metal duro (Tabela. 3.3). Com a adição de zircônio na matriz de alumina melhora-se a tenacidade desta ferramenta (Lange, 1982). Em função da fragilidade das ferramentas cerâmicas, elas devem ser empregadas utilizando-se ângulo de saída negativo e aresta chanfrada, afim de melhorar sua resistência à fratura.

Devido sua alta resistência ao desgaste por difusão, a ferramenta de cerâmica branca ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$) é empregada na usinagem de ferros fundidos: cinzento, maleável, e nodular; em altas velocidades de corte. Elas podem também ser empregadas no torneamento de aços ao carbono e aços liga com dureza inferior a 300 HB. Para operações de acabamento são recomendadas pastilhas com pequenas quantidades de zircônio, o passo que para o desbaste são preferíveis ferramentas com porcentagens mais elevadas de ZrO_2 (Abrão & Aspinwall, 1996).

3.8.4 - Cerâmica Mista

Ferramentas de alumina mista também conhecida como cerâmica mista ou preta, consistem de uma alumina com tamanho de grão de 0,5 a 1,0 μm contendo 24-40% vol. De TiC (0,2-0,5 μm) e também pequenas quantidades de nitreto de titânio (TiN). As pastilhas são prensadas à quente (1500-1800°C e 40 Mpa). A adição TiC-TiN na alumina eleva a resistência à transversal da matriz, além de maior dureza e condutividade térmica (Tabela. 3.3), expandindo a área de atuação destas ferramentas de corte (Sandvik, 1994). A presença de TiC e TiN na matriz de alumina faz com que estas ferramentas sejam empregadas em velocidades de corte mais elevadas que alumina mais zircônio, com menor risco de fratura súbita. Além disso, a alumina mista apresenta uma dureza à quente superior, podendo ser utilizada na usinagem de aço temperado e ferro fundido de elevada dureza, além de fresamento de ferro fundido cinzento (Costa, 1993;

Matsumoto, 1998). Devido a sua maior dureza à quente e condutividade térmica, a cerâmica mista é mais resistente ao desgaste de flanco que a cerâmica branca durante a usinagem de aços de dureza inferior a 300 HB.

3.8.5 - Cerâmica Reforçada com Whiskers de SiC

A alumina reforçada com whiskers que são fibras curtas de carbeto de silício orientadas aleatoriamente formando uma estrutura ($Al_2O_3+SiC_w$), foi desenvolvida para aumentar a tenacidade à fratura e a resistência ao choque térmico. Os whiskers são cilindros monocristalinos de SiC que são caracterizados pelo comprimento L e diâmetro D, sendo L/D a taxa de forma. Em geral as fibras apresentam um diâmetro de 0,5 a 1 μm e um comprimento de 10 a 80 μm , sendo que sua adição faz aumentar a tenacidade à fratura ($\cong 8 MPa.m^{0,5}$). A dureza em temperatura ambiente é de aproximadamente 2000 HV (Tabela. 3.3) (Richards & Aspinwall, 1989).

As ferramentas de alumina reforçada com whiskers são indicadas para a usinagem a altas velocidades de corte ($V_c \cong 500 m/min$) de superligas de níquel e cobalto, ferro fundido endurecido e aços temperados com dureza acima de 45 HRC. Não são indicadas para a usinagem de aços de média e baixa dureza devidos às altas taxas de desgaste de cratera, provocados pela afinidade entre as fibras de SiC e aços. Para a usinagem de superligas como Inconel 718, a vida dessa ferramenta foi três vezes maior que as demais cerâmicas e oito vezes maior que o metal duro (Whitney & Vaidynathan, 1988).

3.8.6 - Cerâmicas a Base de Nitreto de Silício

Cerâmicas a base de nitreto de silício (Si_3N_4) têm sido utilizada como ferramentas de usinagem desde o início da década de 80. Há duas características básicas que distinguem as cerâmicas de Si_3N_4 das cerâmicas a base de óxido (Sorrel & McCartney, 1986): (i) A matéria prima requer um processamento termoquímico complexo, e portanto são caras; (ii) os nitretos são materiais covalentes, ao contrário da maioria dos óxidos que são iônicos. Por isto, o comportamento dos nitretos é determinado por ligações rígidas e direcionais, conferindo ao material elevada rigidez e dureza mesmo em elevadas temperaturas. Existem basicamente duas

formas de nitreto de silício: α e β . Devido suas propriedades mecânicas, a forma β é mais vantajosa para a utilização como ferramenta de usinagem, sendo que a microestrutura fibrosa aumenta sua resistência e dureza. A forma α é transformada irreversivelmente em β sob temperaturas maiores que 1500°C. Dentre os materiais cerâmicos a base de nitreto de silício, têm-se o Sialon e o próprio Si_3N_4 puro (Euzugwu & Wallbank, 1987).

Tabela 3.3 - Propriedades das ferramentas cerâmicas (Richards & Aspinwall, 1998).

Propriedade	Cerâmica Branca	Cerâmica Mista	Cerâmica Ref. SiC	Sialon	M. Duro K10
Composição	90-95% Al_2O_3 5-10% ZrO_2	55-60% Al_2O_3 30% TiC 5-10% ZrO_2	75% Al_2O_3 + 25% SiC	77% Si_3N_4 + 13% Al_2O_3 + 10% Y_2O_3	94% WC 6% Co
Grão (μm)	1 - 2	1 - 2	-	1	1 - 2
Densidade ρ (g/cm^3)	3,9 - 4,0	4,2 - 4,3	3,7	3,2	14,8
Dureza a 20°C (HV)	1700	1900	2000	1600	1700
Dureza a 1000°C (HV)			650	800	400
Tenacidade K_{1c} ($\text{MNm}^{-3/2}$)	1,9	2	8	6	10
Módulo E (GPa)	380	420	390	300	630
Cond. Térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$)	8 - 10	12 - 18	32	23	100
Exp. Térmica ($10^{-6}/^\circ\text{K}$)	8,5	8	-	3,2	5 - 6

Ferramentas a base de nitreto de silício apresentam diversas vantagens com relação as demais cerâmicas, tais como: elevada tenacidade e resistência a ruptura transversal, o que permite sua aplicação sob condições de alto impacto, excelente resistência ao choque térmico, podendo ser empregada onde há oscilações cíclicas de temperatura, como no fresamento ou quando da aplicação de fluido de corte. Infelizmente o nitreto de silício tem alta solubilidade em ferro e portanto não é recomendado para o corte contínuo de aços devido às altas taxas de crateramento (Abrão & Aspinwall, 1995). A Tabela. 3.3 apresenta algumas propriedades do sialon.

3.8.7 - Diamante Policristalino Sintético (PCD)

O emprego do diamante como ferramenta de corte de geometria definida começou a concretizar-se significativamente em 1975 com o lançamento do PCD, pela empresa General Electric (GE). Uma mistura de metal usado como solvente/catalisador e grafite foi submetida simultaneamente sob alta pressão (cerca de 6Gpa) e temperatura (cerca de 1500°C), condições necessárias para transformação do grafite em diamante (Lammer, 1988). O pó de diamante usado na produção de PCD pode ser de procedência natural ou sintética. Quando submetido à alta pressão a grafitização começa a ocorrer nos pontos de contato entre cristais adjacentes devido a presença do catalisador. Em seguida a temperatura sobe e novas estruturas de diamante voltam a formar nestes pontos. A estrutura resultante é constituída de cristais de diamante ligados entre si, e nos espaços vazios se encontra o metal catalisador que pode ser o cobalto na proporção de 6% a 8% em massa. Há uma outra alternativa para produção de PCDs termicamente mais estáveis, com uso de cerâmica (SiC) como segunda fase (Heath, 1981).

O PCD é formado comercialmente em diversas classes, dependendo do tamanho médio dos cristais de diamante presentes e do material da segunda fase. Para cada aplicação e operação há certamente uma classe mais apropriada, no entanto, quanto maior o tamanho dos cristais maior a resistência à abrasão do PCD. Os produtos de menores cristais são destinados para operações de acabamento superficial, por exemplo a classe Compax 1600 da GE. A dureza e a resistência à abrasão do PCD são semelhantes ao do diamante monocristalinos (natural), sendo ele muito tenaz mesmo em operações de corte interrompido, apresentando boa condutividade térmica e resistência ao choque térmico, conforme mostra a Tabela. 3.4. As geometrias da ferramenta de PCD utilizadas têm sido similares às do metal duro, cantos arredondados e baixos valores de ângulo de folga devem ser preferidos a fim de evitar a fragilização da aresta de corte (Coelho et al., 1995).

Atualmente, os preços das ferramentas de PCD têm diminuído em função das inovações tecnológicas, que levaram à baixar o custo da matéria-prima. A idéia da substituição somente da aresta de corte das ferramentas contribui para a redução de custos. O PCD é produzido em discos, nos quais uma camada de 0,5 a 1,0 mm de diamante é depositada sobre um substrato de metal

duro com cerca de 2,0 a 2,5 mm de espessura. Pequenos segmentos são cortados e soldados em pastilhas ou ferramentas que serão posteriormente reafiadas (General Electric, 1989).

O maior campo de aplicações das ferramentas de PCD estão na usinagem de materiais não ferrosos, como ligas de alumínio, madeira, compósitos de matriz metálica (MMC) (Coelho, 1994), e no caso deste trabalho, em compósito de matriz plástica reforçada com fibras de carbono, que são materiais de natureza bastante abrasiva fazendo com que a ferramenta de PCD seja uma opção interessante para sua manufatura. Apesar das vantajosas propriedades do PCD, seu uso não pode ser estendido para a usinagem de materiais ferrosos. Isto porque durante a formação de cavacos a temperatura atinge valores nos quais a grafitização é favorecida pela presença de carbono, e o grafite por sua vez reage com o ferro, tendo como consequência o desgaste acelerado da ferramenta. Este fenômeno acontece em ferramentas de diamante natural e policristalino PCD. (Konig, 1981).

3.8.8 - Ferramentas de Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN)

Na década de 50 a forma cúbica do nitreto de boro BN foi produzida por pesquisadores da General Electric (GE), usando o mesmo aparato empregado na síntese do PCD. Porém somente em 1972 é que os insertos de CBN (cubic boron Nitride) foram produzidos comercialmente. O processo de obtenção desta forma alotrópica, também do correspondente material policristalino conhecido como PCBN, segue a mesma seqüência descrita acima para o PCD, no entanto, ao invés de grafite, o material inicial é o nitreto de boro de forma hexagonal. As propriedades do PCBN são similares às do diamante, no entanto, apresenta algumas vantagens em relação ao mesmo, por exemplo quanto à estabilidade química (Sorrel & McCartney, 1986). O PCBN é sinterizado em camadas de 0,5 e 0,7 mm de espessura sobre um substrato de metal duro, possibilitando a soldagem em pastilhas, ou ainda na forma de pastilhas maciças. Várias classes podem ser encontradas de acordo com a porcentagem de CBN presente (entre 30 e 98%) e do material de segunda fase que pode ser ligadas de Ni-Co, TiC, WC, TiN, ou AlB₂/AlN. Por exemplo, os produtos GE são designados por Borazon 6000, 8100, e 8000, contendo de 85% a 55% de CBN, e como segunda fase Ni-Co ou TiC. O PCBN é quimicamente mais estável que o PCD, sendo utilizado na usinagem de ligas ferrosas sem que ocorra grande desgaste por difusão

(Abrão & Aspinwall, 1995). Sua tenacidade é similar ao metal duro, e a dureza duas vezes da alumina branca, sendo superado apenas pelo PCD e diamante natural (Tabela. 3.4)

Tabela 3.4.- Propriedades físicas e mecânicas dos materiais de ferramentas (Brookes, 1993).

Propriedades	Cerâmicas	M. Duro ISO K10	Diamante Natural	PCD	PCBN
Densidade (g/cm ³)	3,2 – 4,3	14,8	3,52	3,43	3,1
Resistência σ_c (GPa)	1,8 _(Al₂O₃)	4,5	8,68	4,74	3,8
Tenacidade K _{1c} (Mpa)	1,9 – 8,0	10	3,4	6,89	10
Dureza a 20°C (HV)	1500 2450	1700	8000 12000	6500 10000	3500 4500
Módulo E (GPa)	300 - 420	620	1141	925	680
Exp. térmica (10 ⁻⁶ /°K)	3,2 – 8,5	5,4	1,5 – 4,8	3,8	4,9
Cond. Térmica (W/m.°K)	8,0 - 23	80 - 120	500 - 2000	120	100

Entre as aplicações típicas de ferramentas de PCBN estão, o torneamento, a furação, e o fresamento de materiais endurecidos entre 45 e 65 HRC, tais como: aço para rolamento, aço-ferramenta, etc. Em geral, o grande campo de aplicações para as ferramentas de PCBN tem sido a substituição das operações de retificação pelo torneamento (Costa, 1993; Matsumoto, 1998). A utilização do PCBN no torneamento de compósitos RFC objetiva comparar seu comportamento com PCD, já que seus processos de obtenção e suas propriedades são bastante similares, como visto na Tabela. 3.4.

Sendo os materiais compósitos CRFC, abrasivos e de difícil usinagem, requerem materiais de ferramentas que apresentem principalmente propriedades de resistência ao desgaste e elevada dureza que permitam a usinagem de um compósito heterogêneo e com formação de cavacos de ruptura. Os materiais ferramentas apresentados neste trabalho possuem tais propriedades, permitindo submetê-los aos ensaios de usinagem frente a este compósito.

Capítulo 4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 – Material Compósito CRFC

O compósito CRFC utilizado neste trabalho é constituído de uma pré-forma hexagonal, ou seja, com reforços distribuídos em quatro direções distintas (u, v, w e z) de varetas de CRFC, conforme ilustração da Figura 4.1. O processo de densificação e obtenção do compósito C/C passou por impregnação líquida com resina fenólica e piche e por infiltração gasosa (CVD), alcançando uma densidade de $1,8\text{g/cm}^3$.

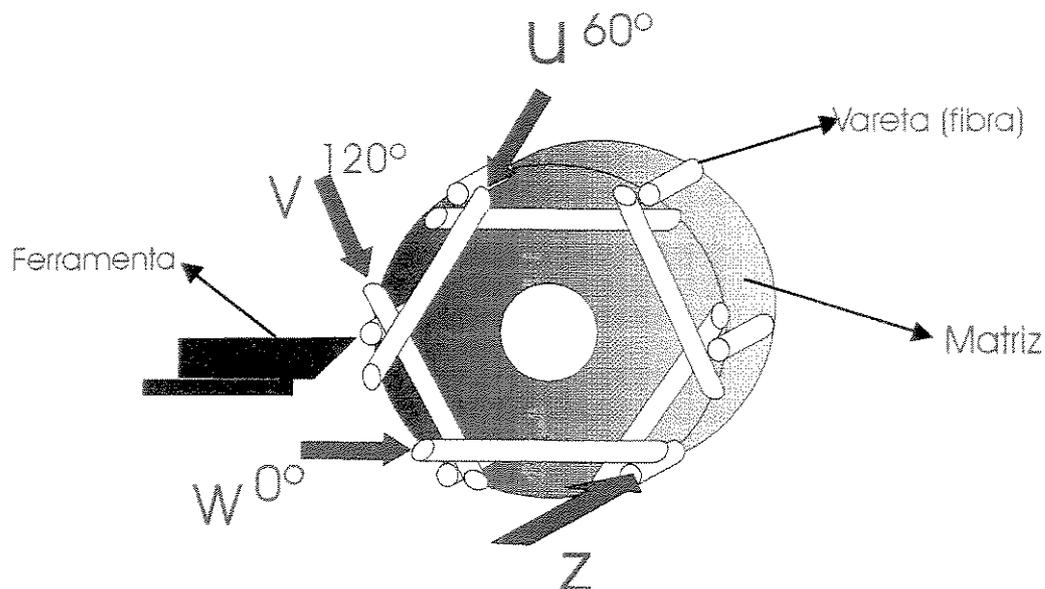


Figura 4.1 – Representação esquemática da pré-forma hexagonal de CRFC.

As propriedades físicas do compósito CRFC, tais como: coeficiente de expansão linear (α'), capacidade térmica (C'), coeficiente de condutividade térmica (λ); e propriedades mecânicas : resistência à compressão (δ_c) e módulo de elasticidade (ϵ), estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades do compósito CRFC nas respectivas direções do reforço na pré-forma (Ferreira, 1999)

Temperatura °C	20	500	1000	1500	2000	2500	3000
$\alpha'_z (10^{-6}/K)$	0,75	1,5	1,8	2,8	5,1	7,8	10
$C' (KJ/Kg.K)$	0,68	1,59	1,92	2,02	2,09	2,13	2,16
$\lambda_{(u,v,w)} (W/m.K)$	6	8,6	11,4	14	17,8	22	40
$\lambda_z (W/m.K)$	10,7	12,2	15,2	19	25	31,3	40
$\sigma_c^{(u,v,w)} (Mpa)$	150	—	153	178	140	—	—
$\sigma_c^{(z)} (Mpa)$	250	—	250	300	230	—	—
$E^{(u,v,w)} (Gpa)$	18	—	18	18	15	10	5
$E^{(z)} (Gpa)$	42	—	42	42	35	24	12

O material para ensaio foi obtido de um bloco formado por compósitos PRFC e CRFC, usado para fabricação de tubeiras do foguete VLS (Veículo Lançador de Satélite). Após a remoção da estrutura externa do bloco, ou seja, o invólucro metálico e a parte de compósito PRFC, obtendo um corpo cilíndrico vazado em compósito CRFC conforme as dimensões da Figura 4.2.

Para permitir a fixação do material no dispositivo de interface, foi necessário a usinagem de rebaixos nas duas extremidades internas, sendo feita a fixação por compressão, visto que a fragilidade do material não permite fixá-lo diretamente na placa do torno.

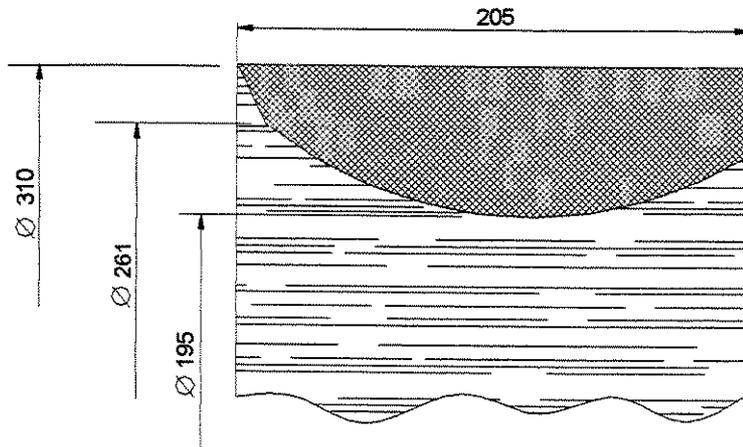


Figura 4.2 - Dimensões do corpo de prova de compósito CRFC

4.2 - Ferramentas e Dispositivos

Na operação de torneamento do compósito CRFC foram utilizadas cinco materiais de ferramentas de corte diferentes, descritos a seguir (NN, 1993/1994):

- Metal Duro classe ISO K10 sem cobertura – (H1P/Sandvik)
- Metal Duro classe ISO K15 com cobertura de TiC e Al_2O_3 - (GC3015 - Sandvik)
- Cerâmica Mista (Al_2O_3 + TiC) – (CC650/Sandvik)
- Cerâmica reforçada com whiskers de carbeto de silício (Al_2O_3 + SiCw) – (CC670 - Sandvik)
- Diamante Policristalino (PCD) – (Compax 1600/GE)

A geometria das ferramentas utilizadas apresentam as seguintes especificações segundo a norma ISO 1832/1985

- Inseto SNGN 120408 (metal duro e PCD)
- Inseto SNGN 120408 T01020 (cerâmica mista, cerâmica reforçada com Whiskers)

As ferramentas de corte foram posicionadas e fixadas através de cabeça indexável, similar (tipo T-max P com grampo, Sandvik), com os seguintes ângulos de posicionamento

$\chi_r=75^\circ$; $\alpha=-6^\circ$; $\lambda_s=-6^\circ$, projetada e fabricada no IAE/CTA para permitir a interface ferramenta/dinamômetro.



Figura 4.3 – Cabeça indexável com ferramenta de corte

O corpo de prova foi fixado no torno através de dispositivo placa/ponto conforme ilustração Figura 4.4.

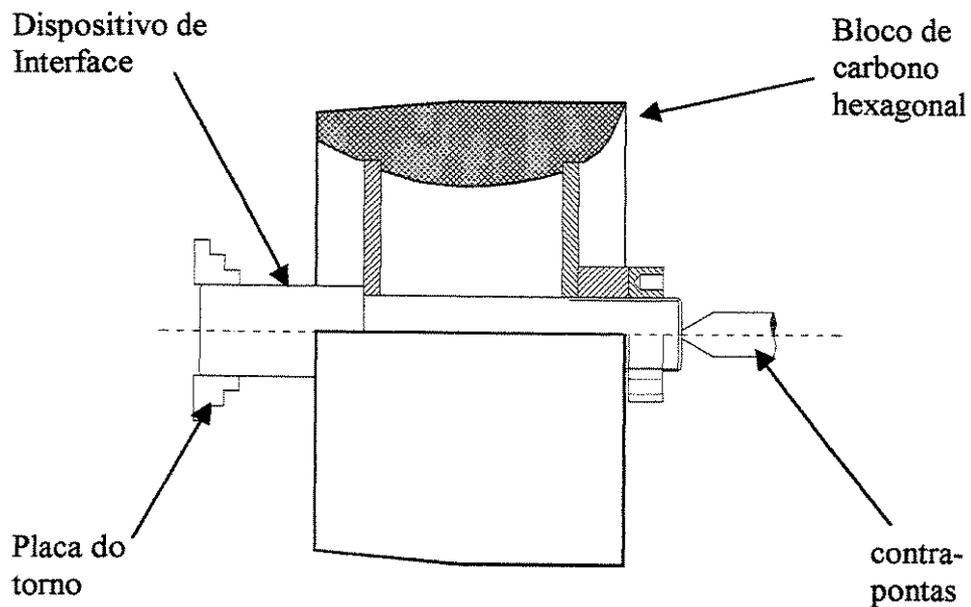


Figura 4.4 - Ilustração esquemática de montagem do corpo de prova no dispositivo.

4.3 - Equipamentos e Instrumentos

4.3.1 - Máquina Ferramenta

Os ensaios foram realizados em um torno tipo universal marca Romi, modelo S520, potência = 7,600 KW e rotação máxima = 1200 rpm

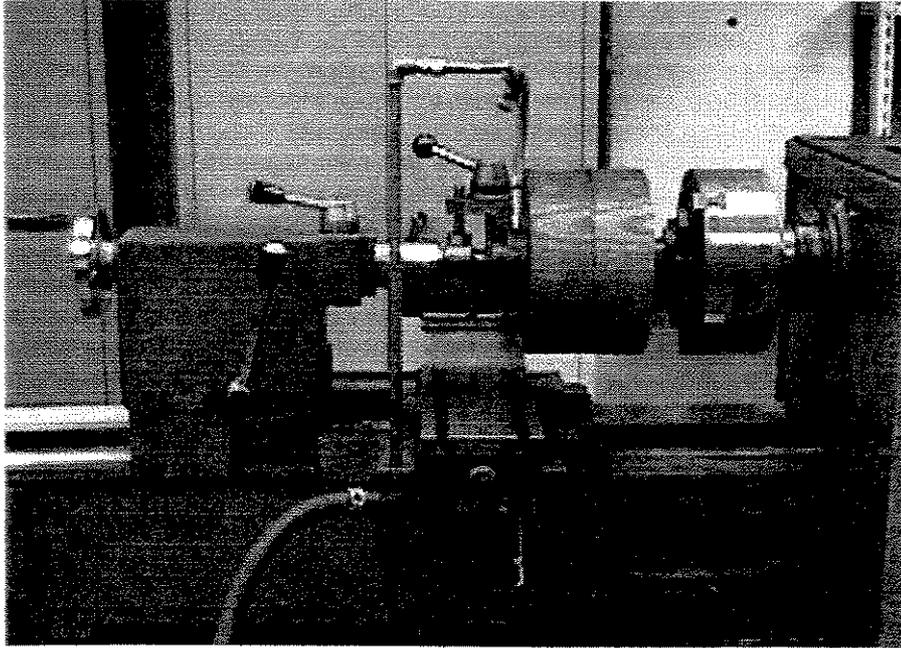


Figura 4.5 – Ilustração mostrando a fixação do corpo de prova na máquina

4.3.2 - Dinamômetro

Verificando-se que os esforços de corte são relativamente baixos (0 - 100N), foi desenvolvido um dinamômetro que melhor se adaptasse às necessidades dos ensaios a serem realizados. Este dinamômetro é composto de 08 canais com extensômetros, distribuídos em 04 barras, para o monitoramento de esforços de tração e compressão simultaneamente. Antes da realização dos ensaios, o dinamômetro foi submetido a uma calibração estática com cargas aplicadas escalonadamente até 1300 N.

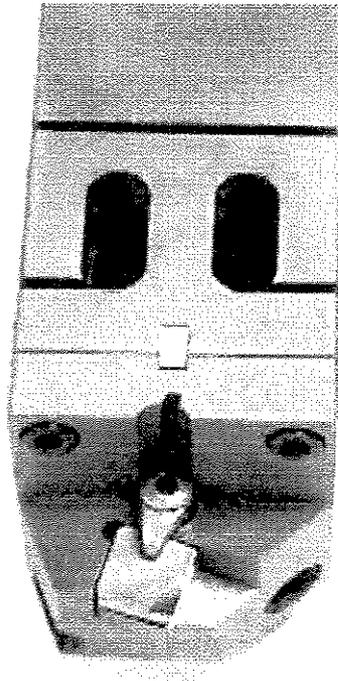


Figura 4.6 – Vista completa do dinamômetro

4.3.3 - Microscópio

Para observação dos desgastes e avarias das ferramentas utilizou-se em primeira análise uma lupa (8x), em seguida os desgastes foram observados em microscópio ótico e microscópio eletrônico de varredura (MEV)

4.3.4 - Sistema de Aspiração e Proteção

Para remoção do pó gerado durante os ensaios utilizou-se aspirador industrial de sucção com filtro seco. Para proteção do operador/pesquisador utilizou-se luvas, máscaras, macacão impermeável, etc.

4.3.5 - Sistema de Aquisição de Dados

Para aquisição de dados das forças de corte e avanço, utilizou-se um microcomputador com placa de aquisição e software Sistema 4000 (Measurements Group), e para aquisição de dados de temperatura utilizou-se um termopar aplicado sobre a ferramenta de corte e uma termo-câmera posicionada à 30 cm da superfície de saída.

Em cada aquisição foram coletados dados com espaçamento de 5 segundos durante a extensão de cada usinagem realizada, tanto para medidas das forças de corte e avanço, como para as medidas de temperatura com amostragem de 8 pontos por segundo. Os componentes ilustrados na Figura 4.7 fazem parte do sistema de monitoramento empregado.

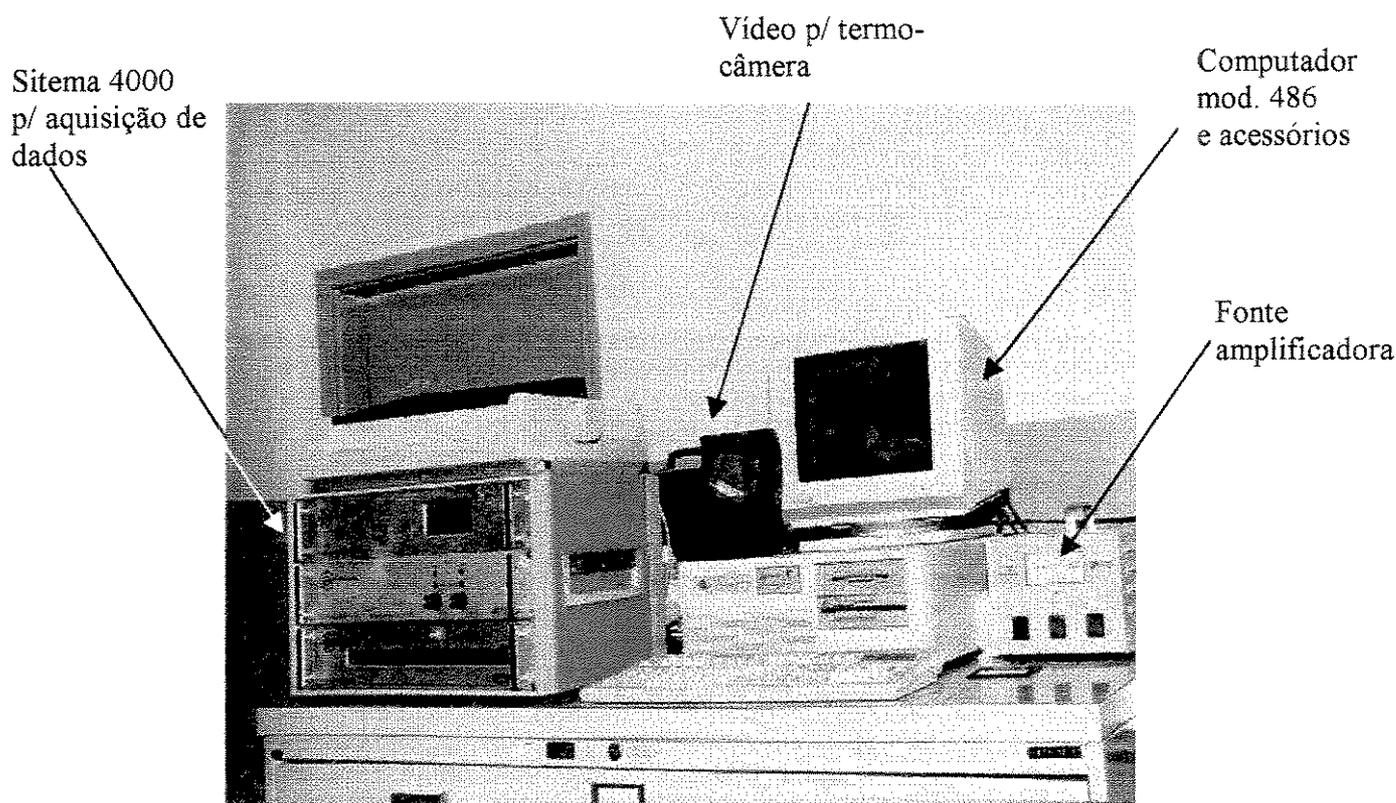


Figura 4.7 - Equipamentos para aquisição de dados durante os ensaios de usinagem.

Na figura 4.8 estão apresentados esquematicamente todos os componentes integrantes dos ensaios durante o monitoramento de dados realizados.

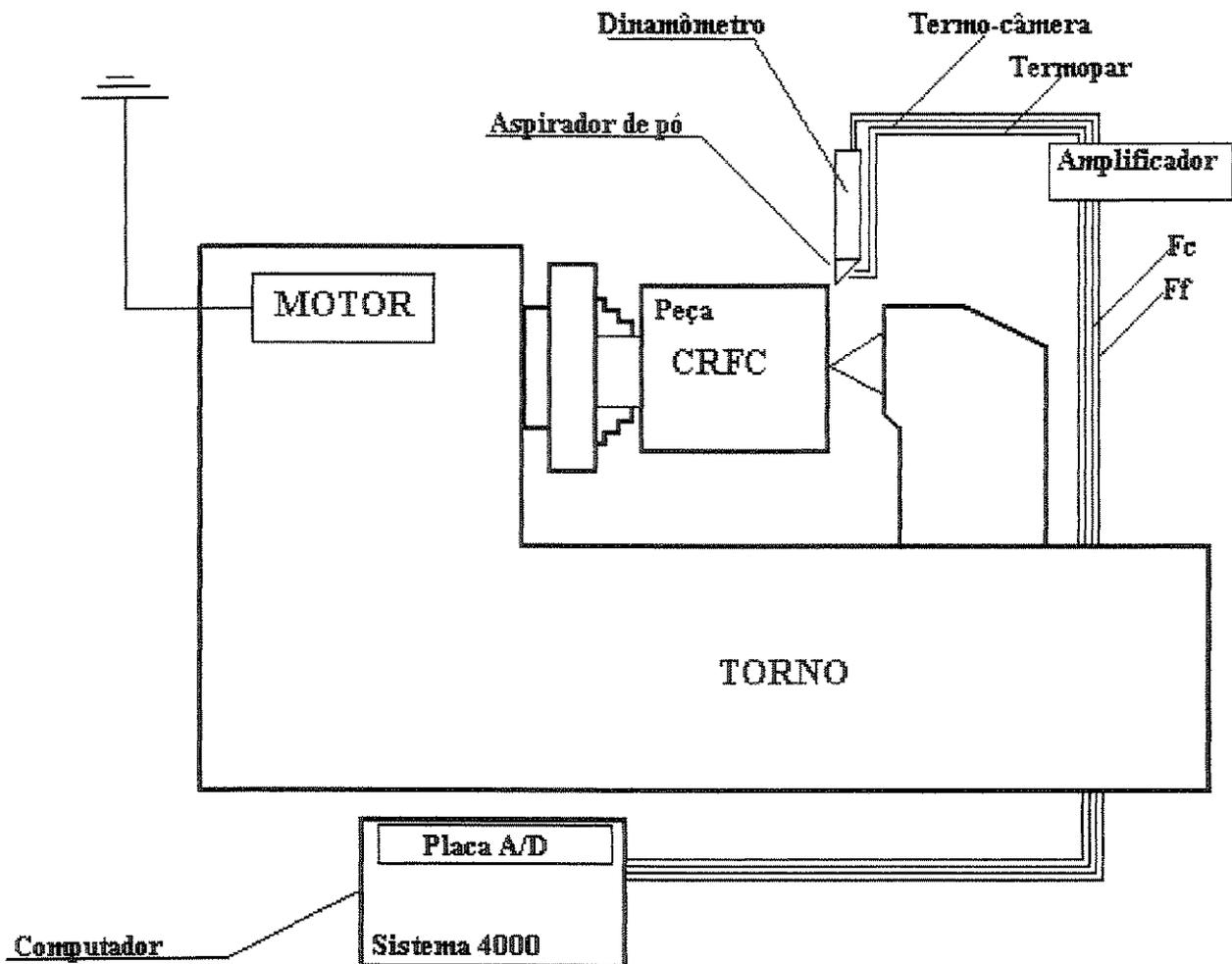


Figura 4.8 – Ilustração esquemática para aquisição de dados durante a usinagem.

Para verificação e confirmação das rotações aplicadas à máquina-ferramenta (torno) utilizou-se um tacômetro.

Com o objetivo de monitorar a temperatura durante a usinagem na aresta de corte da ferramenta, foram posicionados uma termo-câmera e um termopar conforme mostra a Figura 4.9

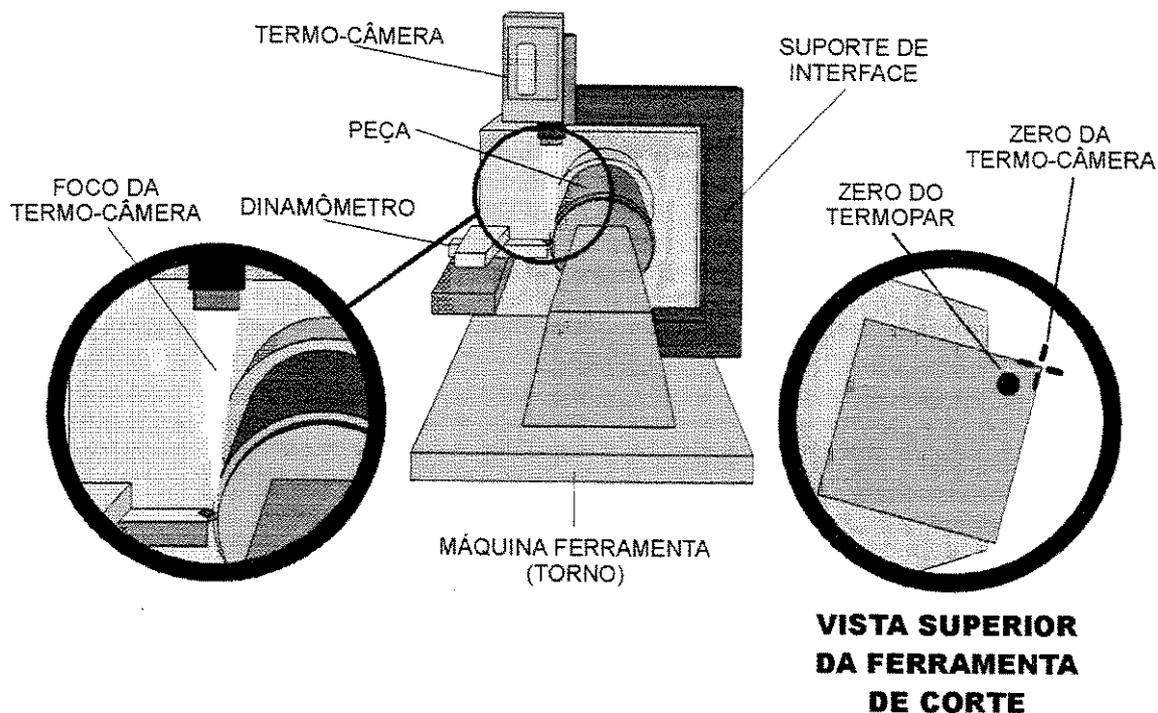


Figura 4.9 - Montagem do sistema na máquina durante a usinagem.

4.3.6 - Filmagem com câmera de alta velocidade

Durante a execução de alguns ensaios utilizou-se uma câmera de alta velocidade (400 quadros por segundo) para filmagem do processo. Assim possível observar a formação e o tipo de cavaco obtido na usinagem do compósito CRFC.

4.4 - Metodologia Experimental

4.4.1 - Torneamento do Compósito CRFC com várias ferramentas de corte.

Os ensaios foram iniciados fazendo-se uma comparação do desempenho de materiais ferramentas diferentes: metal duro ISO K10 sem cobertura, metal duro ISO K15 com cobertura, cerâmica mista, cerâmica reforçada com Whiskers e diamante policristalino PCD.

As condições adaptadas inicialmente foram:

- 1) Velocidade de corte $V_c = 310\text{m/min}$
- 2) Avanço $f = 0,1\text{ mm/v}$
- 3) Profundidade de usinagem $a_p = 1\text{ mm}$

- 1) Velocidade de corte $V_c = 115\text{m/min}$
- 2) Avanço $f = 0,1\text{ mm/v}$
- 3) Profundidade de usinagem $a_p = 1\text{ mm}$

Estes parâmetros foram mantidos para todas as ferramentas. A velocidade de corte em torno de 310 m/min foi adotada para acelerar o desgaste das ferramentas e permitir melhor avaliação do comportamento das mesmas, sendo que o avanço e profundidade de usinagem baixos foram escolhidos visto que, as peças obtidas deste composto geralmente são moldadas próximas às suas dimensões finais (sobrematerial/reduzido).

O desgaste das ferramentas, as medidas de esforços de corte e avanço e temperatura foram medidos em cada condição de ensaio ferramenta-peça. Com isto, observou-se a variação do desgaste das ferramentas e das forças aplicadas em função do comprimento de corte usinado. Durante a execução dos ensaios as medidas de desgaste das ferramentas foram avaliadas por lupa de aumento (8x) e posteriormente avaliadas com maior precisão com auxílio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os esforços de corte foram medidos através de sistema de aquisição de dados em intervalos de tempos pré-fixados do início ao fim da vida das ferramentas.

4.4.2 - Comportamento do desgaste das ferramentas em função da variação da velocidade de corte

Devido aos resultados contraditórios obtidos por (Ferreira, 1999) decidiu-se pela realização de novos ensaios no sentido de comprovar a tendência de evolução do desgaste em função da velocidade de corte (V_c).

1ª fase de ensaios

Condições de corte:

Ferramenta Metal Duro K10

$V_c = 80; 120; 200; 350$ e 600m/min

$f = 0,1$ mm/v

$a_p = 1,0$ mm

Usinagem à seco

2ª fase de ensaios

Após avaliação dos resultados obtidos nos ensaios com variação da velocidade de corte, observou-se que na faixa de velocidade em torno de 350m/min ocorreu a menor incidência de desgaste. Portanto decidiu-se que a seqüência dos ensaios seguintes seriam mantidas, a mesma velocidade de corte e a mesma ferramenta (Metal Duro K10); variando então o avanço f ($0,1; 0,2$ e $0,3$)mm/v, e posteriormente a profundidade de usinagem a_p $1,0; 2,0$ e $3,0$ mm.

3ª fase de ensaios

Com o objetivo de tentar esclarecer a tendência da evolução do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro (K10) durante os ensaios anteriores, optou-se pela utilização de meios refrigerantes com o intuito de diminuir a temperatura de corte e conseqüentemente amenizar ou eliminar a ocorrência de um provável processo de oxidação do composto CRFC. Neste sentido utilizou-se os seguintes meios refrigerantes:

- 1) Gás Argônio - Metal Duro K10
- 2) Mínimo volume - Metal Duro K10
- 3) Inundação (óleo emulsionável) - Cerâmica CC650/CC670
- 4) Inundação (óleo emulsionável) - Metal Duro K10

A injeção do gás argônio sobre a aresta de corte da ferramenta teve o objetivo de criar uma zona de proteção, eliminando a presença de oxigênio, evitando uma possível oxidação do compósito CRFC. A Figura 4.10 ilustra o posicionamento do bico injetor sobre a ferramenta.

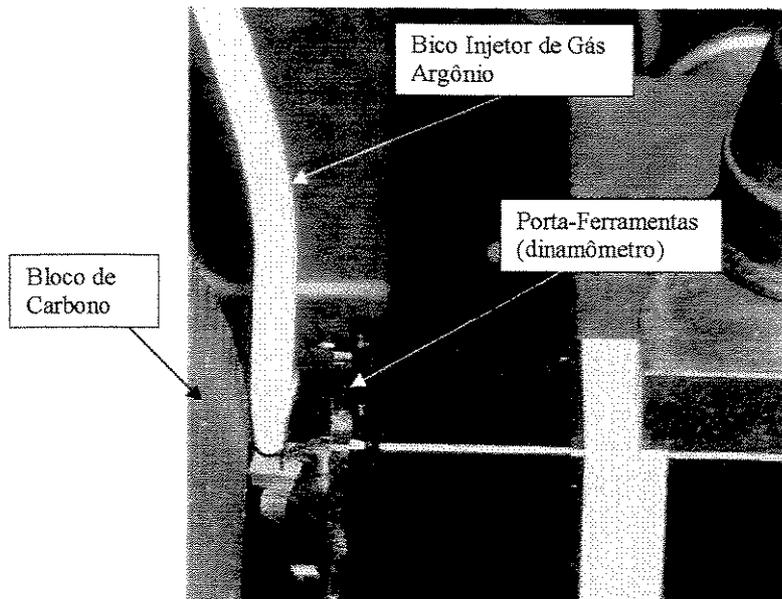


Figura 4.10 - Ilustração esquemática da montagem para injeção de argônio

A injeção de fluido de corte (Macron-A) sobre a aresta de corte da ferramenta, através do processo de mínimo volume(60ml/h) com o equipamento Magic Cut, tem como objetivo diminuir o atrito e conseqüentemente a temperatura, diminuindo a possibilidade de oxidação do compósito durante a usinagem.

A aplicação do processo de inundação por óleo emulsionável tem como objetivo manter a temperatura em níveis inferiores à 370°C e, com isso, não permitir a ocorrência do possível fenômeno de oxidação do compósito CRFC. A Figura 4.11 ilustra o posicionamento do bico injetor de óleo sobre a ferramenta. Nesta fase dos ensaios serão usadas as ferramentas de cerâmica CC650 e CC670 e posteriormente metal duro K10.

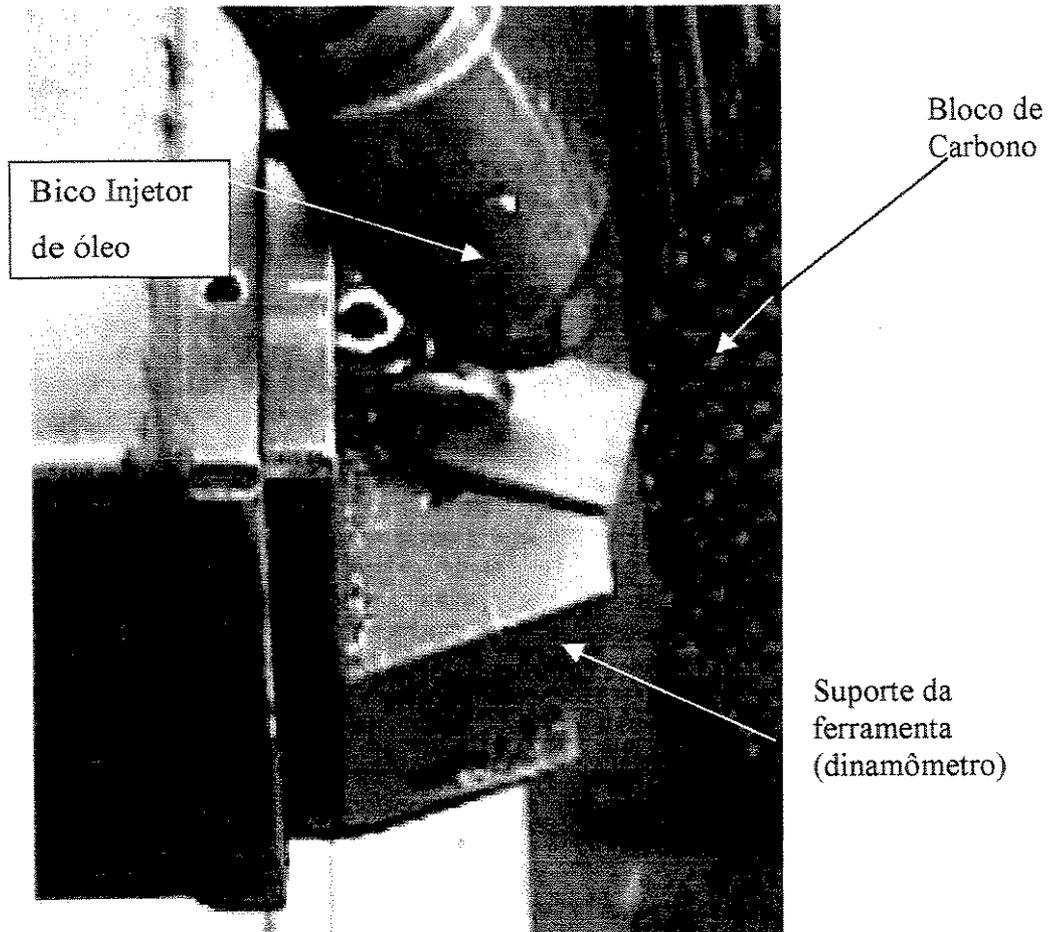


Figura 4.11 - Ilustração esquemática para inundação por óleo emulsivo (óleo solúvel)

Com o objetivo de esclarecer o comportamento do desgaste das ferramentas durante a usinagem do compósito CRFC, decidiu-se pela realização de ensaios usando ferramentas de cerâmicas mista (CC650) e reforçada com whiskers (CC670), também com inundação de óleo solúvel.

Condições de corte:

$V_c = 80; 118; 340 \text{ e } 555 \text{ m/min}$

$f = 0,1 \text{ mm/v}$

$a_p = 1,0 \text{ mm}$

4ª fase de ensaios

Após todos os ensaios realizados durante este trabalho, observou-se que, na faixa de velocidade de corte onde ocorreu menor desgaste de flanco da ferramenta, poderia estar acontecendo o fenômeno de oxidação, o qual ocorre no compósito C/C quando submetido a temperaturas superiores à 370°C.

Desta forma optou-se pela realização de um ensaio, com óleo solúvel abundante usando a ferramenta de metal duro ISO K10 com velocidades de corte inferiores (80m/min) e superiores (600m/min) à velocidade de referência (350m/min), de menor desgaste. Estes ensaios têm como objetivo verificar uma possível mudança de comportamento do desgaste, e tentar correlacionar com a ocorrência ou não, do fenômeno oxidação no processo de usinagem.

As condições de corte para este ensaio foram:

$$V_{c1} = 80\text{m/min}$$

$$V_{c2} = 350 \text{ m/min}$$

$$V_{c3} = 600\text{m/min}$$

$$f_1 = 0,1\text{mm/v}$$

$$f_2 = 0,1\text{mm/v}$$

$$f_3 = 0,1\text{mm/v}$$

$$a_{p1} = 1,0 \text{ mm}$$

$$a_{p2} = 1,0 \text{ mm}$$

$$a_{p3} = 1,0 \text{ mm}$$

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Introdução

Os resultados obtidos serão apresentados em concordância com o desenvolvimento das etapas do trabalho descritas no procedimento experimental, de modo a permitir sua análise e avaliação, conduzindo para o esclarecimento de alguns problemas existentes durante o processo de usinagem do compósito CRFC. Considerando a necessidade do aprimoramento do processo, sendo a usinagem a operação final de sua fabricação e o elevado custo de fabricação deste compósito, a não conformidade da qualidade da peça leva à sérios prejuízos (Coppini et al., 1996). O compósito CRFC apresenta características de difícil usinabilidade e ainda se tem uma escassa literatura a respeito da usinagem do mesmo. Portanto justifica-se um estudo do seu comportamento durante a usinagem, no que tange aos materiais de ferramentas, desgaste, vida e condições de velocidade, avanço, profundidade e uma possível influência do uso de fluido de corte no processo.

5.2 - Mecanismo de formação do cavaco

Os compósitos CRFC por sua natureza heterogênea e anisotrópica causam problemas durante a usinagem. Durante o corte a aresta da ferramenta tende a deformar o material de trabalho e conseqüentemente cisalha-o na forma de cavaco. A intensidade de deformação e cisalhamento do material nas proximidades do corte depende do tipo da fibra e a matriz do

material. Durante a deformação, as fibras comportam-se de maneira diferente, dependendo de suas capacidade de resistirem ao dobramento. Estas características, tais como, saliências, delaminação e heterogeneidade na composição física do material contribuem para adicionar problemas de usinabilidade. Com compósito CRFC, instantâneas rupturas das fibras com quebras do material da matriz podem ser observadas. Durante a usinagem do compósito CRFC, uma grande quantidade de pequenos cavacos foram produzidos, os quais eram pequenos fragmentos, formados por uma série de fraturas durante a usinagem..

Observou-se que o mecanismo de formação do cavaco na usinagem do compósito CRFC, tem um comportamento equivalente quando comparado com os estudos feitos por (Ki Soo Kim et al., 1992) durante ensaios de usinagem em compósitos PRFC. Foi visto também que as fibras de carbono desprendem-se do material sem muita aderência residual da matriz sobre as mesmas. Observa-se que, durante a usinagem o material usinado resultante da matriz transforma-se em pó, e que o restante do material, tornam-se cavacos pequenos gerados pela ruptura das fibras. Este cavaco gerado na usinagem é abrasivo e altamente condutor elétrico. Portanto, é de fundamental importância a sua coleta junto à região de corte, para que não polua a máquina e o ambiente de trabalho (Ferreira, 1999).

Nas Figuras 5.1 e 5.2 foi identificado um comportamento distinto no processo de formação do cavaco, onde o mesmo apresenta delaminações e arrancamento de segmento de fibras, identificando condições de extrema severidade de usinagem. Este ensaio foi realizado usando ferramentas de corte de cerâmica (CC650 e CC670), onde o desgaste da ferramenta apresentou-se com tendência em arredondar a aresta de corte

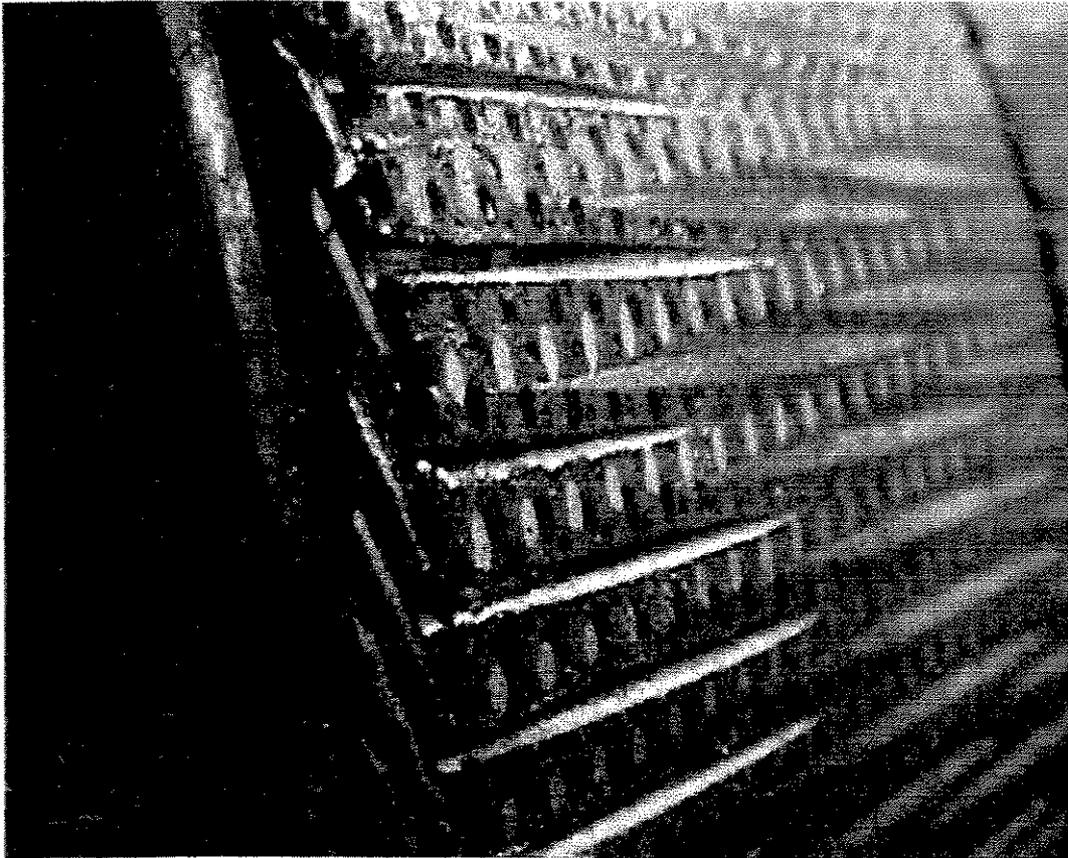


Figura 5.1 - Superfície do composto CRFC usinada com ferramentas de corte de cerâmica CC650 e CC670. ($V_c = 555\text{m/min}$, $a_p = 1,0\text{ mm}$ e $f = 0,1\text{mm/v}$)



Figura 5.2 - Amostragem de cavacos obtidos em severas condições de usinagem, usando ferramentas de corte de cerâmicas CC650 e CC670. ($V_c = 555\text{m/min}$, $a_p = 1,0\text{ mm}$ e $f = 0,1\text{mm/v}$)

5.3 - Comportamento do desgaste das ferramentas

Analisando o posicionamento das fibras em relação à ferramenta durante a usinagem conforme visto na Figura 5.3, observa-se as condições de agressividade e a causa de esforços flutuantes devido à heterogeneidade do material, as quais está exposta a aresta de corte, desta forma criando situações altamente abrasivas e adversas para o sistema ferramenta/peça.

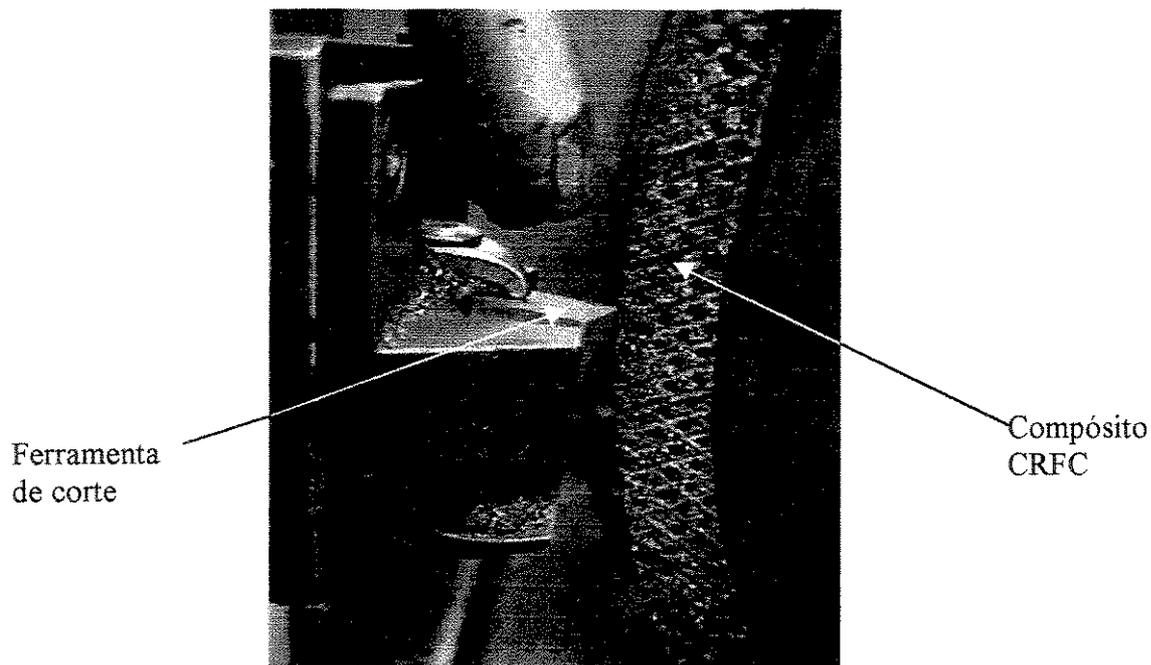


Figura 5.3 – Posição das fibras do compósito em relação à aresta de corte da ferramenta.

Analisando as arestas de corte, após à seqüência de ensaios, verificou-se que os resultados obtidos de desgaste de flanco convergem segundo (Komanduri, 1997), estes provocados por um excessivo processo de fricção das fibras sobre a superfície de folga da ferramenta. Este comportamento acontece durante a usinagem, que combina com esforços pulsantes e temperaturas elevadas, submetendo a ferramenta a um processo excessivo de fadiga, degradação térmica e abrasão conforme mostram as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

As trincas ilustradas conforme Figura 5.6 identificam o processo de fadiga (trincas horizontais) e degradação térmica (trincas verticais), as quais a ferramenta foi submetida (Diniz et al., 1999). A fadiga mecânica da ferramenta pode estar relacionada à heterogeneidade do material, a qual incide pulsações sobre a aresta e a região em contato da ferramenta. Outro fator que poderia incidir fadiga mecânica no processo de usinagem seria a possibilidade do suporte da ferramenta (dinamômetro) ser excitado a um processo pulsativo até a sua freqüência natural. Porém, avaliando os níveis de esforços de usinagem do compósito CRFC e o grau de rigidez acrescentado ao dimensionamento do dinamômetro, esta probabilidade seria muito pequena.

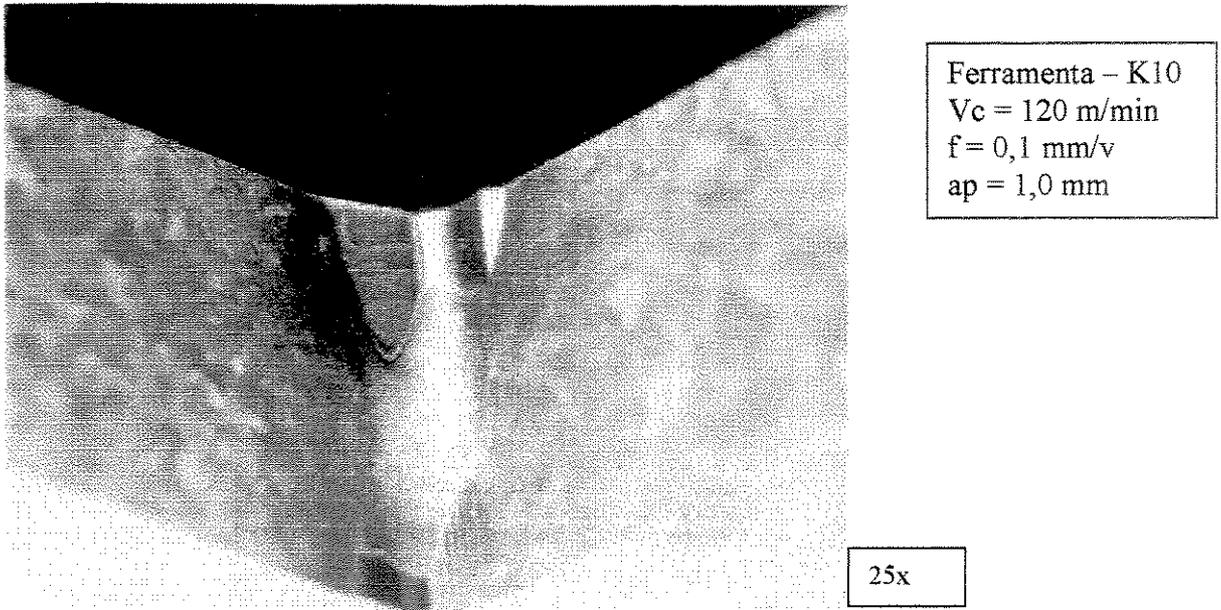


Figura 5.4 - Aresta de corte apresentando desgaste por abrasão e degradação térmica

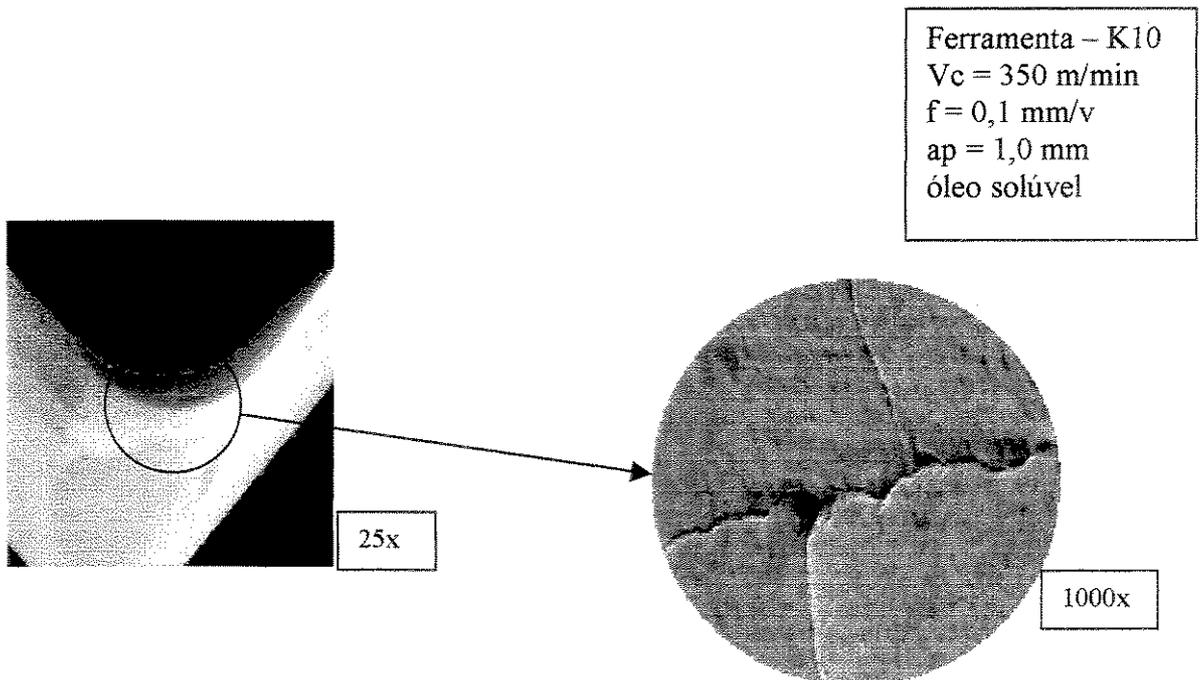


Figura 5.5 - Aresta apresentando desgaste por fadiga térmica e mecânica (trincas).

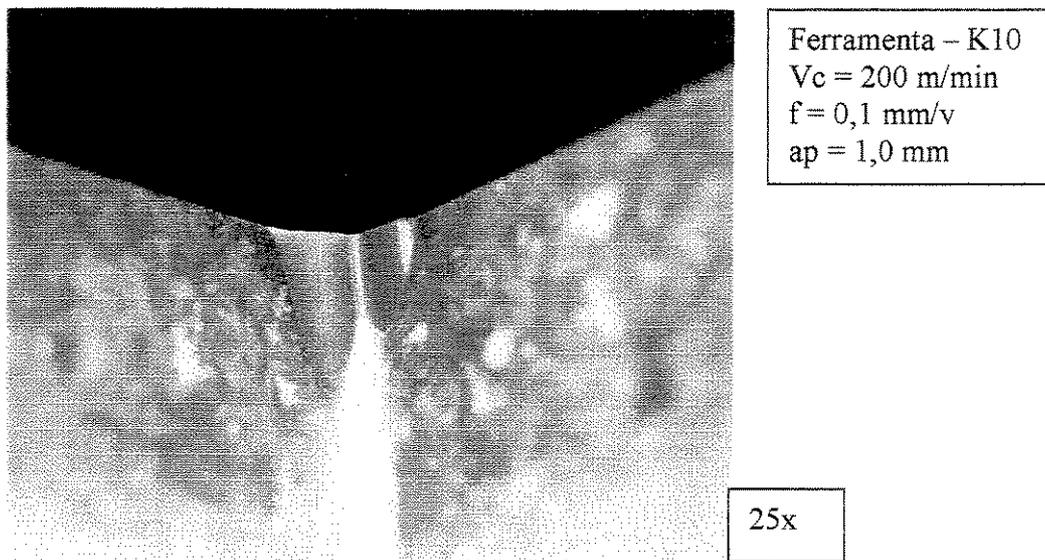


Figura 5.6 - Aresta de corte apresentando desgaste acentuado por abrasão

5.4 – Avaliação do comportamento das ferramentas de corte ensaiadas

Como mostrado na Figura 5.7, a ferramenta de corte metal duro ISO K10 apresentou desgaste de flanco mais acentuado em relação às ferramentas de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) e diamante policristalino (PCD), com exceção da ferramenta de cerâmica reforçada com whiskers ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) que apresentou o maior desgaste de flanco entre todas as ferramentas ensaiadas. Apesar de sofrer elevado desgaste na usinagem do compósito CRFC, optou-se para os ensaios seguintes utilizar ferramenta de metal duro ISO K10, por apresentar níveis de desgaste que permitisse uma melhor análise de comportamento, menor custo e a obtenção de dados (desgaste, forças de corte/avanço) que servirão de base para uma análise comparativa da usinabilidade deste compósito com os resultados obtidos segundo (Ferreira, 1999).

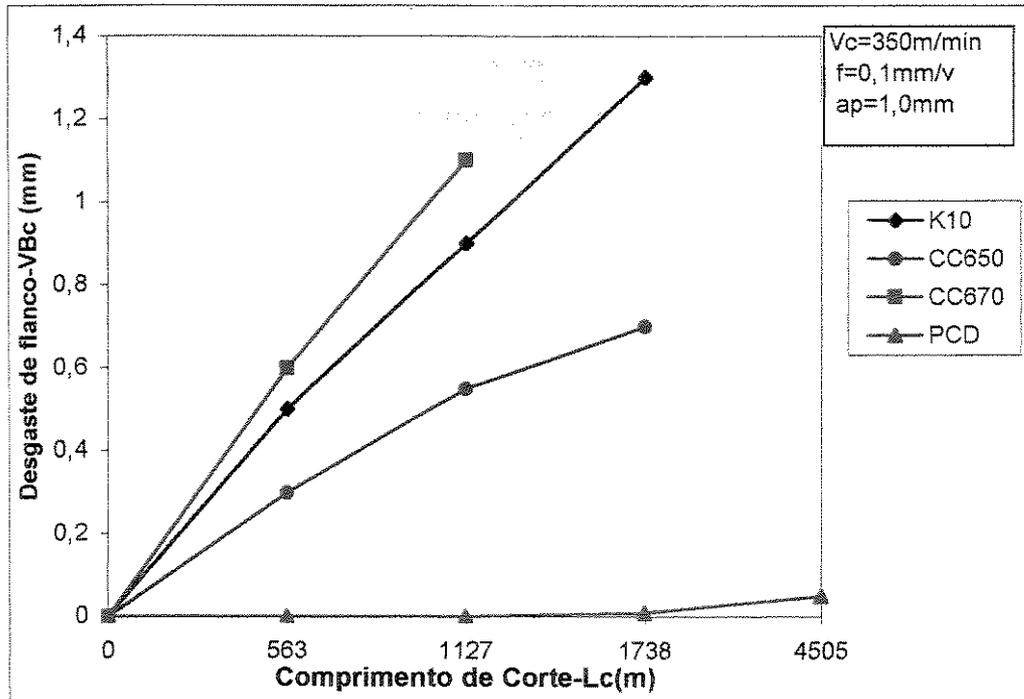


Figura.5.7 - Desgaste das ferramentas X Comprimento de corte.

A ilustração da Figura 5.8 apresenta o comportamento do desgaste de flanco de algumas ferramentas de corte quando submetidas à velocidade de corte 115m/min. Observa-se que, com a ferramenta de metal duro ISO K10 ocorreu um acréscimo no desgaste de flanco em relação ao ensaio anterior ($V_c = 350 \text{ m/min}$). Provavelmente em velocidades de corte em torno de 350m/min e acima destes níveis esteja ocorrendo um processo oxidativo do composto CRFC. Em relação à ferramenta de cerâmica CC670, a qual ocorreu uma redução nos níveis de desgaste, possivelmente deve-se ao fato de que, reduzindo a velocidade de corte, também ocorreu uma redução ao choque térmico provocado pelo atrito ferramenta/peça.

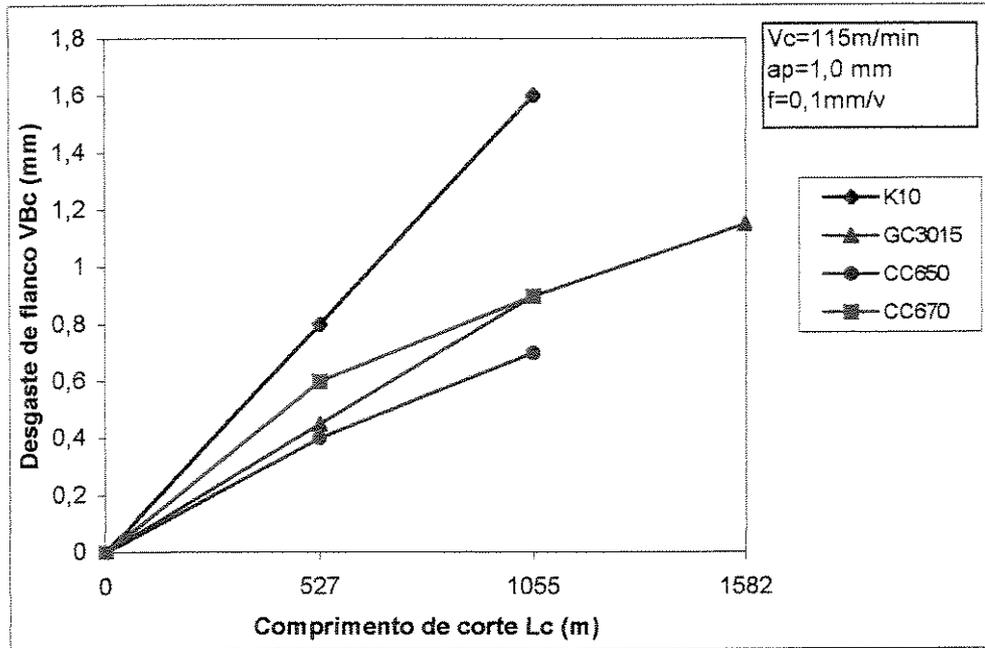


Figura.5.8 - Desgaste das ferramentas X Comprimento de corte

Os maiores índices de desgastes foram apresentados pela ferramenta de cerâmica reforçada com whiskers de SiC ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) com $V_c = 350 \text{ m/min}$. e com $V_c = 115 \text{ m/min}$ ocorreu sensível redução do desgaste. Possivelmente ocorreu uma reação do carbeto de silício da ferramenta com o material da peça (desgaste por Attrition). Em relação à ferramenta de corte de diamante policristalino (PCD), observou-se que o desgaste apresentado foi o de menor incidência, mostrando uma extrema eficiência para a realização de usinagens desse compósito; quanto à ferramenta de corte de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), observou-se um desgaste de flanco moderado com características de arredondamento da aresta de corte, e por isso, o processo de corte do compósito apresentou arrancamento de fibra (*fiber pull-out*) que, conseqüentemente, compromete a qualidade superficial da peça. Comparando-se com os resultados dos ensaios realizados por Ferreira et al., (1999) na usinagem do mesmo compósito, as ferramentas de corte tiveram comportamento equivalente.

5.5 – Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta de metal duro

Nesta etapa dos ensaios, utilizou-se a ferramenta de metal duro ISO-K10, e variou-se a velocidade de corte $V_c = 80; 120; 200; 350; 600$ m/min; com o objetivo de tentar explicar um fato não elucidado no trabalho realizado por Ferreira, (1999) quando da usinagem de carbono CRFC. Neste contexto será feita uma nova avaliação do comportamento do desgaste da ferramenta de metal duro ISO K10 em função da variação da velocidade de corte. Analisando as Figuras 5.9 e 5.10 verificou-se que à medida que a velocidade de corte foi aumentando até aproximadamente 350m/min, ocorreu uma redução na intensidade do desgaste de flanco da ferramenta (VBc).

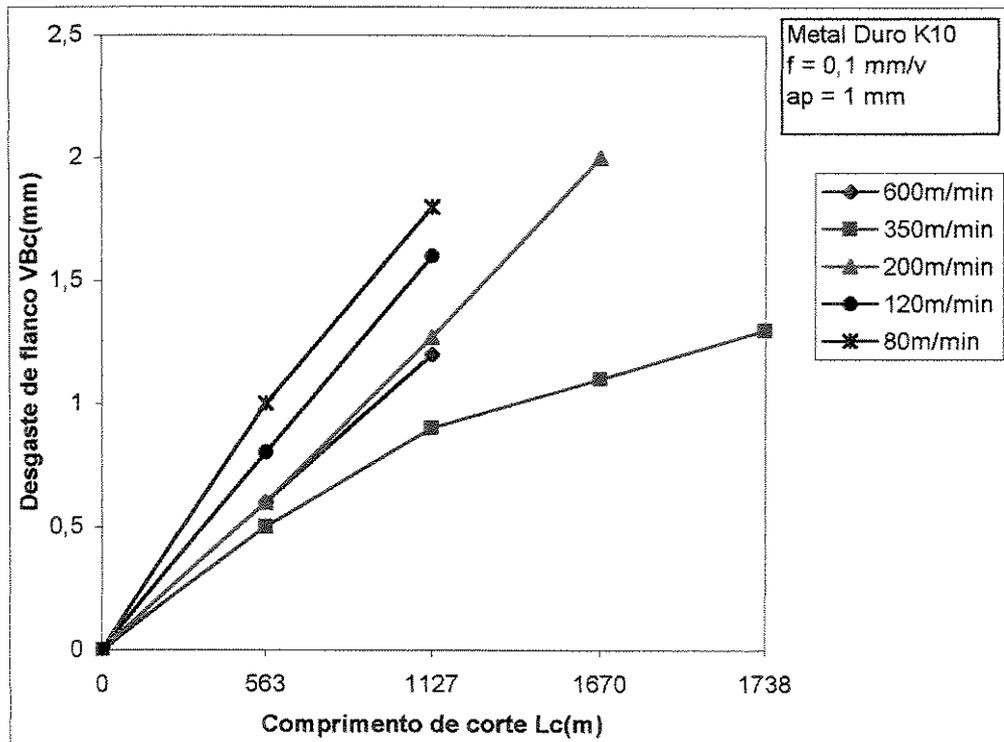


Figura 5.9 - Desgaste de flanco x da variação da velocidade de corte.

Este comportamento começou a se alterar, com tendência a aumentar o nível de desgaste na faixa de velocidade de corte (350 – 600)m/min mas, com menor incidência talvez pelo fato de que em velocidades maiores, o fluxo de cavaco e a velocidade da peça sobre a ferramenta dificulta a entrada de oxigênio, e assim o processo oxidativo ocorreria com menor intensidade e proporcional à velocidade de corte. Segundo (Savage, 1993) explica-se este fato, durante a usinagem do compósito CRFC, e com aumento da velocidade de corte, ocorrerá aumento de atrito e conseqüentemente a temperatura elevará na aresta de corte atingindo valores acima de 370°C. Este comportamento provocaria um processo oxidativo alterando as propriedades e características abrasivas do compósito.

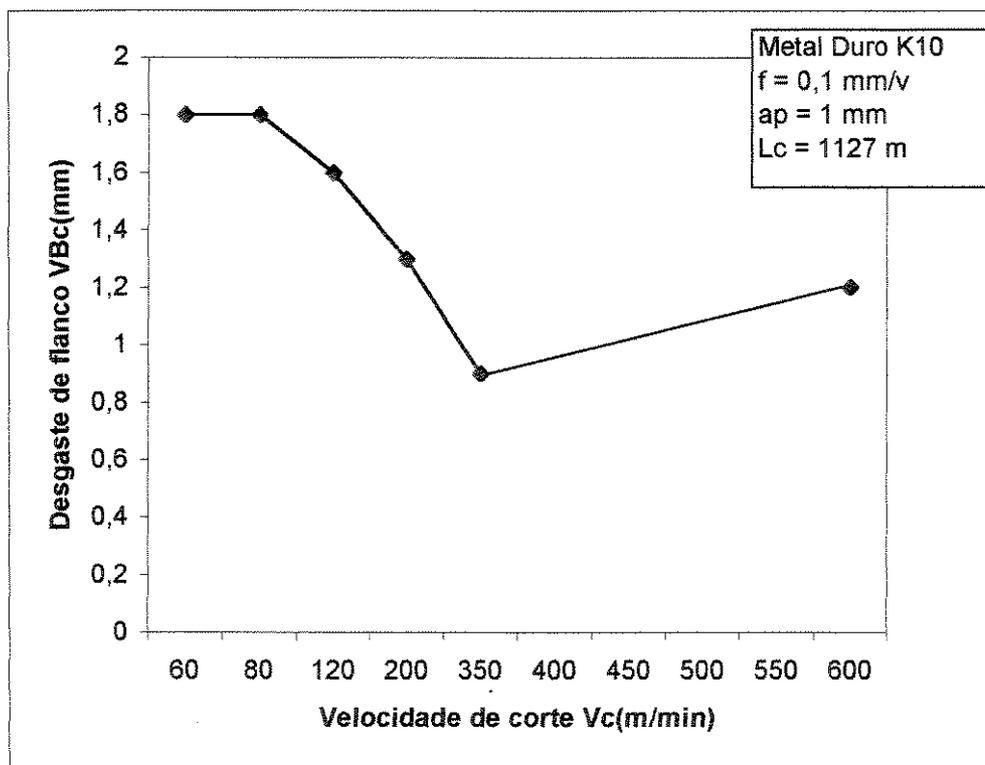


Figura 5.10 - Comportamento do desgaste de flanco x variação da velocidade de corte

5.6 - Esforços de corte

Ainda nesta fase dos ensaios e mantendo os mesmos parâmetros de corte foram monitorados e analisados também o comportamento dos esforços de corte, ou seja; forças de corte (F_c) e forças de avanço (F_f). Nas Figuras 5.11 e 5.12 observou-se que as forças de corte e avanço tiveram comportamento análogo às curvas de desgaste (VBc) x comprimento de corte (L_c), para as velocidades de corte ensaiadas. Explica-se este fato; devido ao aumento do desgaste de flanco da ferramenta, ocorreu proporcionalmente um aumento da área de contato ferramenta/peça, sendo que os esforços de corte estão diretamente relacionados com a intensidade de atrito. Os parâmetros de corte usados tais como; avanço f (0,1 mm/v) e profundidade de corte a_p (1,0 mm) são típicos para retirar pequenas quantidades de material, pois a operação de usinagem em compósitos no geral não tem objetivos de retirar grandes volumes de cavaco como na usinagem dos metais (Ferreira, 1992).

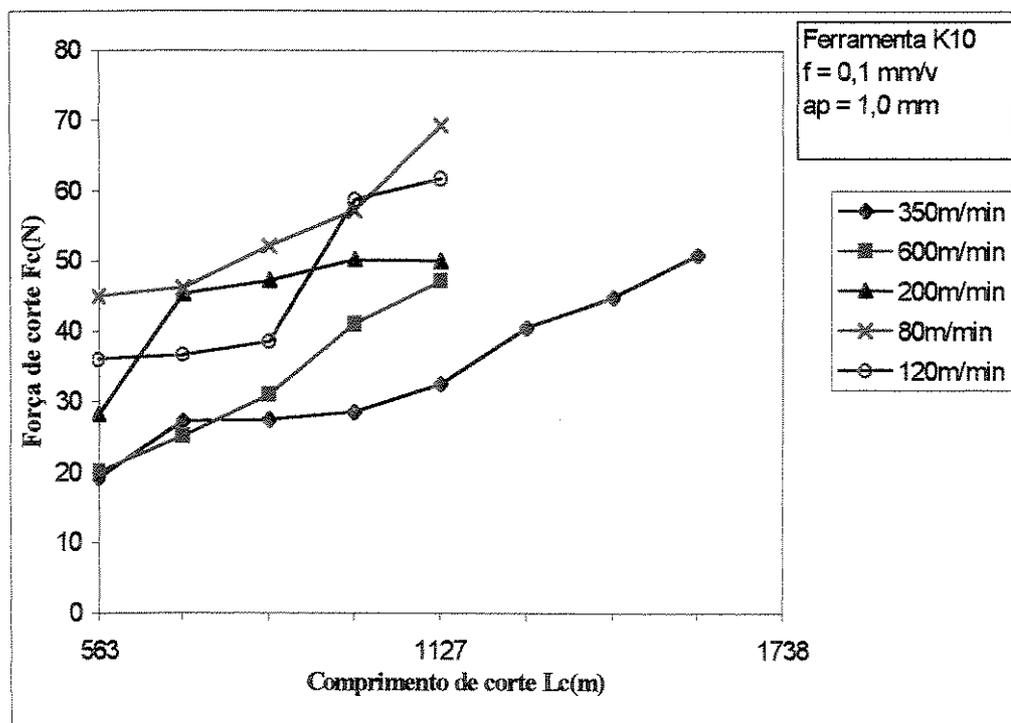


Figura 5.11 - Forças de corte x variação da velocidade de corte.

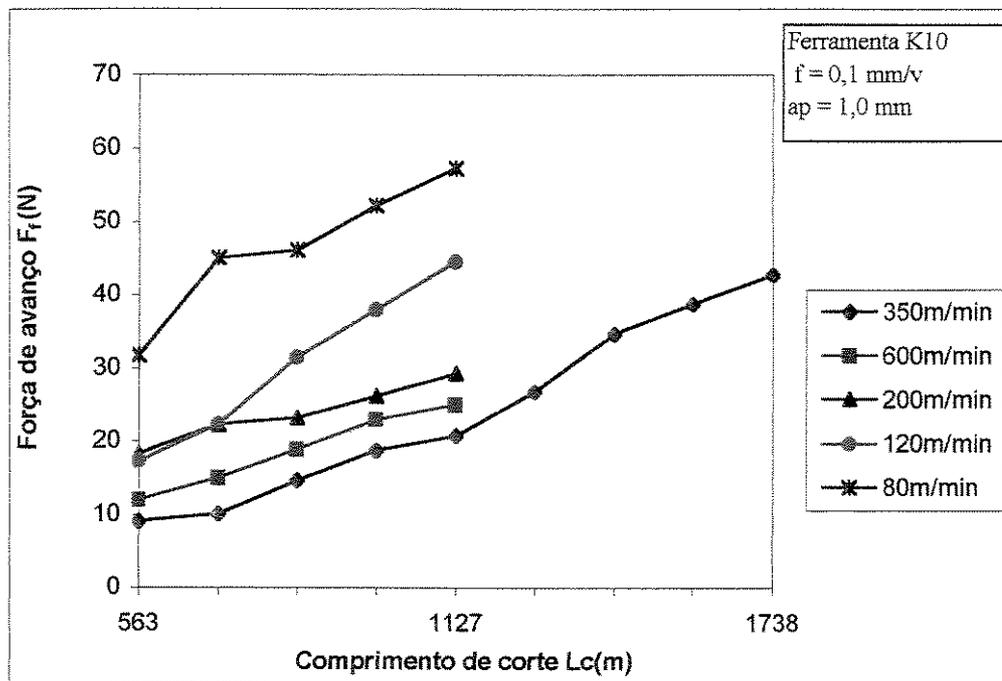


Figura 5.12 - Força de avanço x velocidade de corte

Os esforços de corte durante a usinagem do compósito CRFC mostraram-se relativamente baixos conforme Figura 5.13. Explica-se este comportamento devido ao fato do compósito CRFC apresentar baixa resistência ao cisalhamento e ser extremamente frágil ($\epsilon = 0,5\%$), sofrendo inúmeras rupturas durante o corte. O cavaco formado durante o processo de usinagem praticamente não sofre deformação plástica, apresentando-se efetivamente na forma de “pó”, ou seja o material compósito CRFC não oferece grande resistência ao corte, confirmando os resultados obtidos por Masuda et al. (1993).

Assim os valores absolutos das forças de usinagem não chegam a ser um parâmetro de restrição no torneamento do compósito CRFC (Ferreira, 1999). Analisando os resultados obtidos de esforços x velocidade de corte, pode-se observar que, os esforços de corte apresentaram-se com valores ligeiramente maiores do que os esforços de avanço. Explica-se isto devido à incidência do fluxo de cavaco, sobre a região delimitada da ferramenta, pelo avanço e

profundidade de usinagem, com esforços de corte maiores do que à resistência do material frente a área de contato da ferramenta (região de atrito)

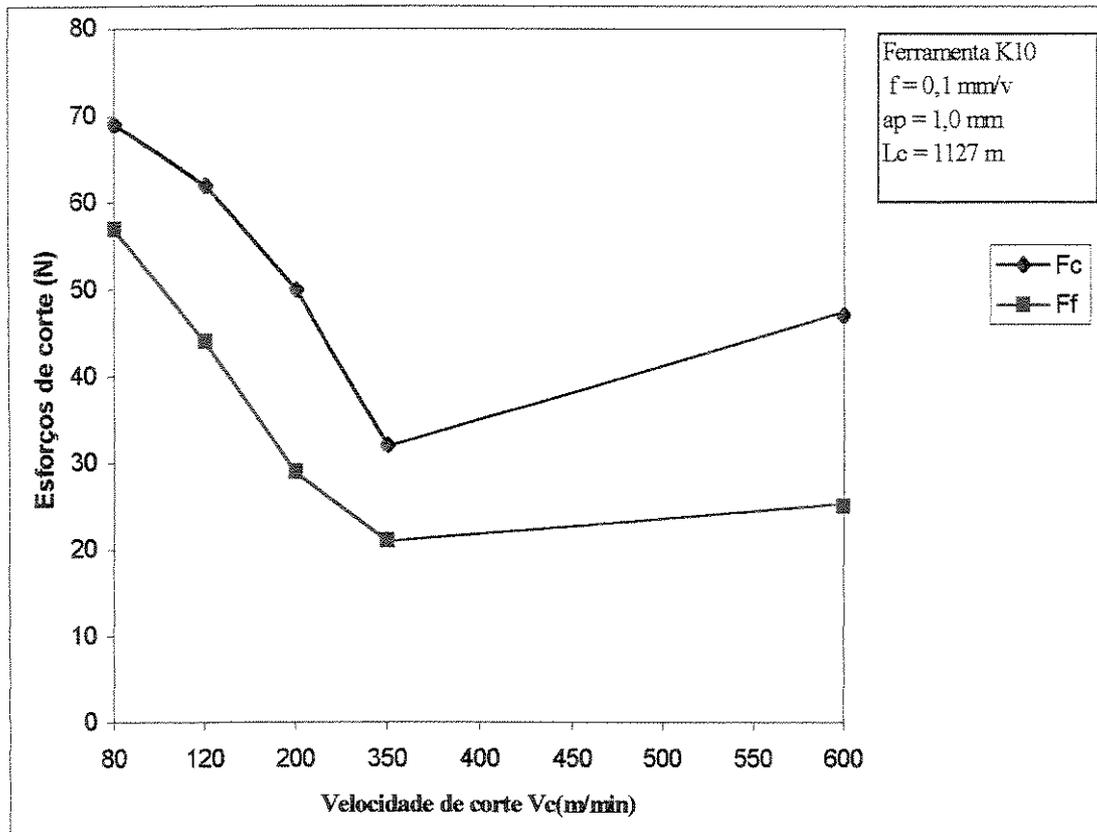


Figura 5.13 - Comportamento dos esforços de corte/avanço x velocidade de corte.

5.7 - Avanço e Profundidade de corte

Durante a usinagem dos materiais metálicos sabe-se que, à proporção que cresce o avanço, é verificado também um aumento no desgaste de flanco da ferramenta. Isto ocorre porque aumenta a quantidade de calor ao processo, provocada pelas elevadas deformações plásticas cisalhantes ocorridas na zona de cisalhamento do cavaco (Trent, 1984). O comportamento do desgaste de flanco (VBc) da ferramenta em função da variação do avanço (f), na usinagem do compósito CRFC é mostrado na Figura 5.14. Observa-se que ocorre um decréscimo na

decréscimo na intensidade do desgaste à medida que aumenta o avanço. Este comportamento ocorre devido à redução da abrasão ferramenta-peça por unidade do volume de cavaco removido.

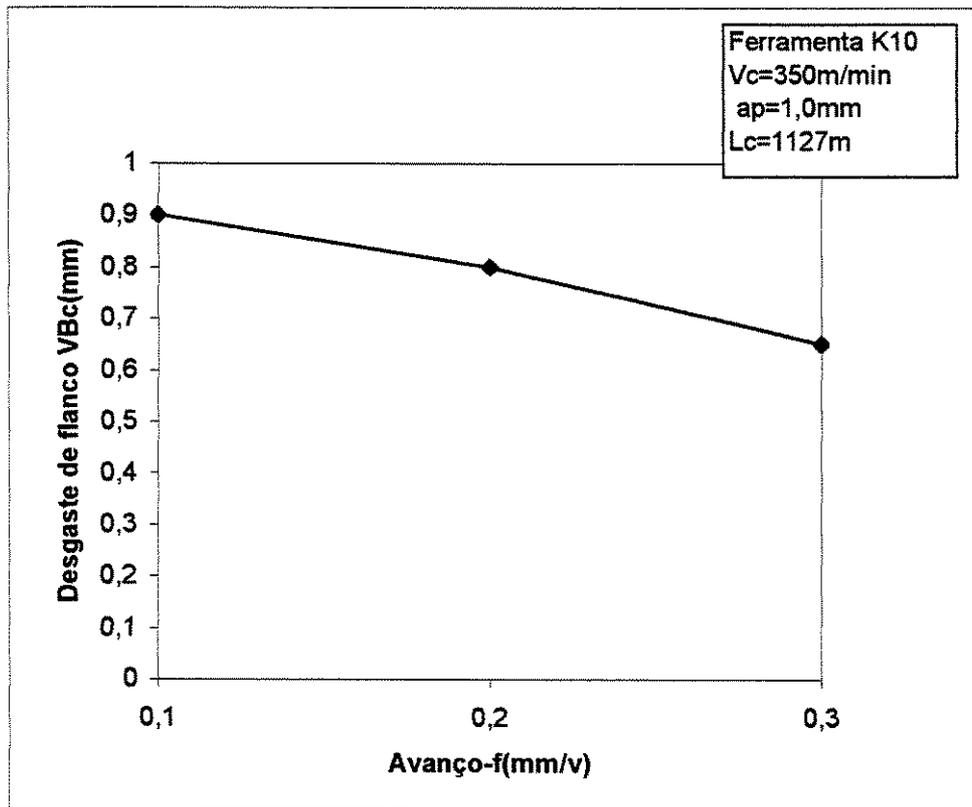


Figura 5.14 - Comportamento do desgaste de flanco x avanço.

A Figura 5.15 mostra a reação da ferramenta de corte através da componente força de corte (F_c) em função do aumento do avanço (f), onde o crescimento do esforço de corte é justificado quando aumenta-se a área da seção de corte do cavaco e, conseqüentemente, o volume de cavaco removido na unidade de tempo. Com o aumento do avanço tem-se uma melhor dispersão do calor gerado na usinagem para a peça, aliviando a ferramenta e diminuindo o seu desgaste. Estes resultados confirmam a tendência de diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento do avanço apresentada pelo compósito PRFC-FP (Ferreira, et al., 1997). Com o aumento do avanço pode ocorrer arrancamento de fibras da pré-forma do compósito CRFC, e surgimento

do desgaste de cratera na superfície de folga secundária da ferramenta de corte, conforme ilustrado na Figura 5.16.

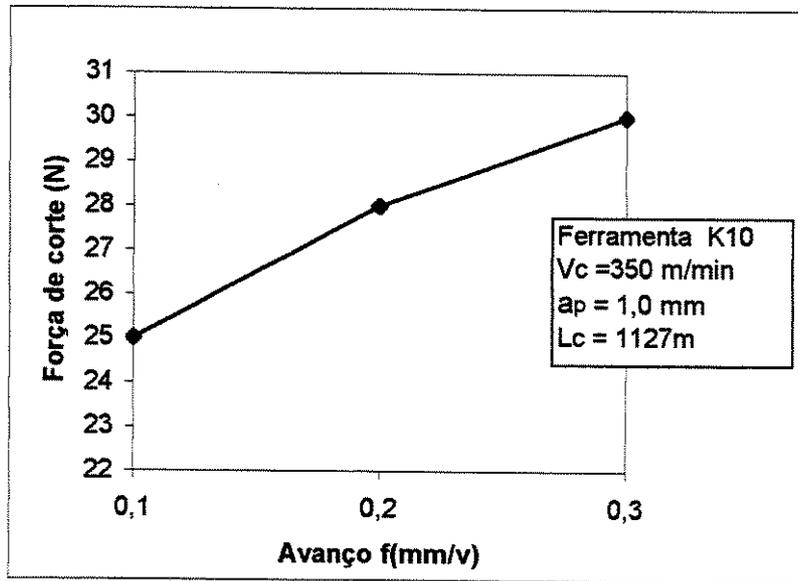


Figura 5.15 - Comportamento dos esforços de corte x avanço.

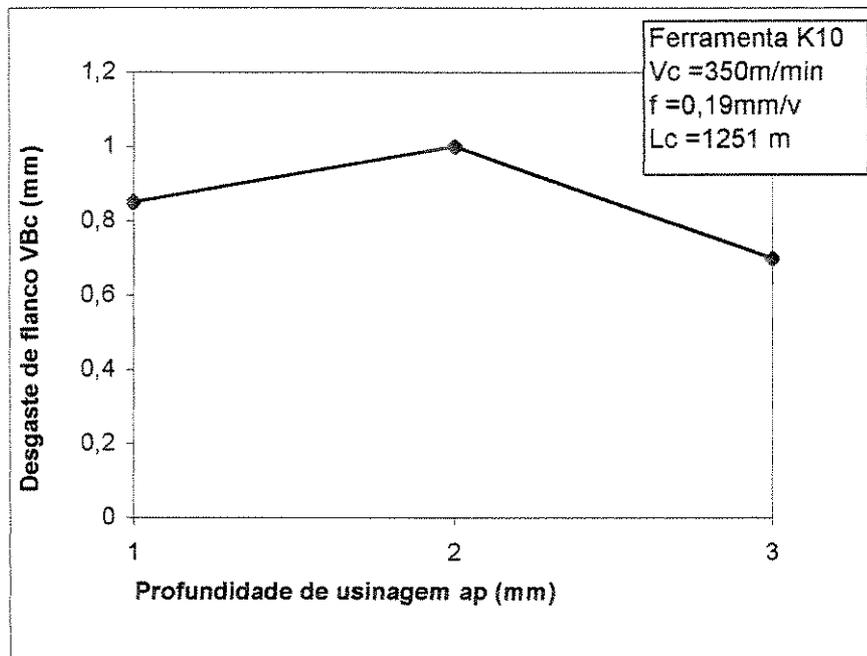


Figura 5.16 - Aresta da ferramenta de corte mostrando a formação do desgaste de cratera.

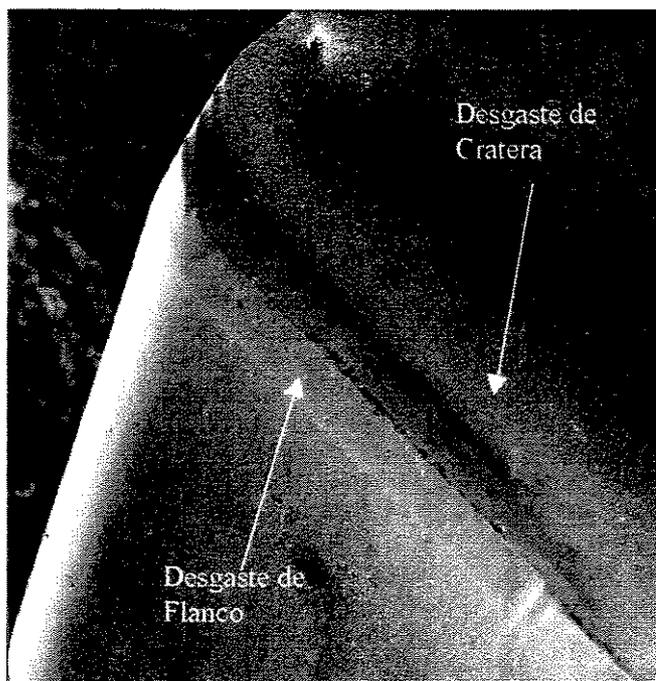


Figura 5.17 - Comportamento do desgaste de flanco x profundidade de corte.

Com relação ao comportamento da ferramenta quando submetida às variações da profundidade de corte (a_p), observou-se que o desgaste de flanco apresentou pouca variação quando (a_p) aumentou na faixa de (1,0 – 2,0) mm conforme visto na Figura 5.17. O aumento da profundidade de corte (a_p) na faixa de (2,0 – 3,0) mm não alterou esse comportamento significativamente. Segundo Diniz et al., (1999), porque a influência da mesma ao ser aumentada não altera a energia destinada ao corte por unidade de área, nem com a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um maior volume seja retirado através da utilização de uma maior porção da aresta de corte. Estas alterações provocadas na aresta principal da ferramenta, ou seja, criando uma nova inclinação do ângulo de saída da aresta (γ_o), a qual melhora a performance de corte da ferramenta, desta forma permitindo temporariamente a redução do desgaste de flanco da ferramenta conforme mostra a Figura 5.17.

Os esforços de corte são influenciados pelo aumento da profundidade de usinagem, devido ao aumento do volume de cavaco removido por unidade de tempo conforme ilustrado na Figura 5.18.

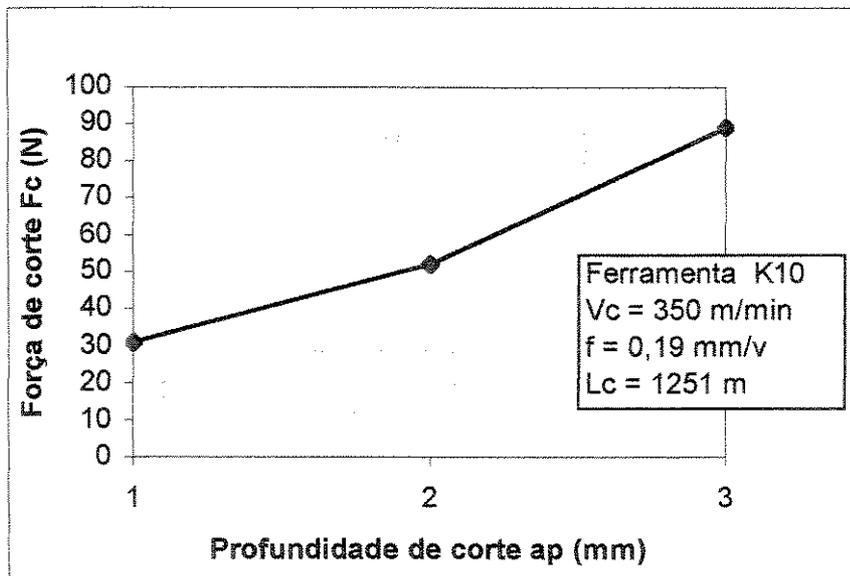


Figura 5.18 – Comportamento dos esforços de corte x profundidade de corte.

5.8 - Avaliação da influência da temperatura

Durante o processo de usinagem o atrito ferramenta/peça desenvolve gera calor, o que provoca danos à aresta de corte da ferramenta e, conseqüentemente, influencia na performance da ferramenta durante a usinagem. Na usinagem do material compósito CRFC, verificou-se que o desgaste da ferramenta é influenciado pela elevação da temperatura, provocado por suas características abrasivas, mas com algumas considerações quando foram aplicadas variações de velocidade de corte. Segundo (Savage, 1993) existe a possibilidade de estar ocorrendo o fenômeno de oxidação durante a usinagem do compósito CRFC ao atingir temperatura acima de 370°C e conforme Santhanakrishnan et al., (1993), observou se que durante a usinagem de compósitos PRFC as temperaturas de corte ultrapassam estes níveis. Então surgiu a necessidade de se constatar durante os ensaios experimentais de usinagem do compósito CRFC, a ocorrência ou não de oxidação com influência direta no comportamento do desgaste da aresta de corte.

Durante a execução dos ensaios de usinagem, foram realizadas algumas tentativas para monitoramento da temperatura, as quais poderiam confirmar as hipóteses acima apresentadas através da instalação de termopar sobre a superfície de saída da ferramenta, e posicionamento de termo-câmara sobre a aresta principal. Os resultados obtidos (< 100°C) não atingiram níveis suficientes para comprovar o início de um processo de oxidação, apesar dos mesmos apresentarem um comportamento análogo quando variaram-se os parâmetros de corte conforme mostrados na Figura 5.19. Explica-se esta disparidade ocorrida, devido ao fluxo de cavaco constante durante o processo de usinagem, prejudicando a eficiência do equipamento, desta forma interferindo de maneira incisiva na obtenção dos valores reais (temperatura) do processo de usinagem.

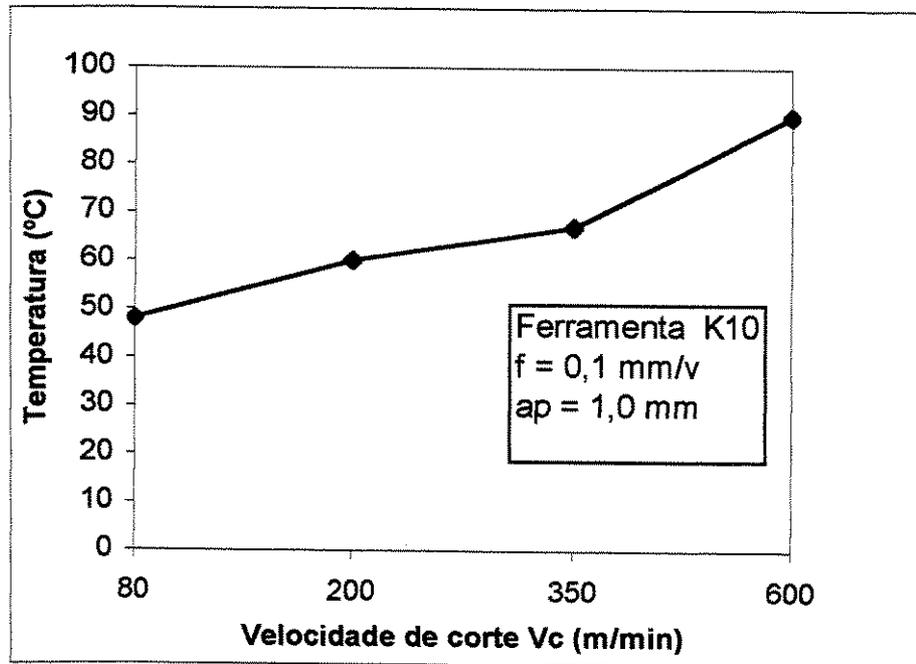


Figura 5.19 - Comportamento da temperatura em função da velocidade de corte (resultados obtidos através de termopar)

Analisando os resultados obtidos na Figura 5.20, apesar de serem valores representativos do comportamento e não os valores reais, observa-se que a temperatura é influenciada pela velocidade de corte, ou seja, à medida que aumentou a velocidade de corte, a temperatura também aumentou. Esta característica de comportamento mostra que possivelmente ocorra a oxidação do compósito durante a usinagem em temperaturas superiores a 370°C , mas ainda nesta fase dos ensaios não foi possível uma confirmação, nem com termopares, nem com auxílio da termo-câmera.

5.9 - Ensaaios para verificação do processo oxidativo do compósito CRFC

Na etapa seguinte dos ensaios, procurando por alternativas para esclarecer ou evidenciar a existência de um processo oxidativo do compósito CRFC durante a usinagem, optou-se pelos seguintes tipos de ensaios:

- 1) Injeção de gás argônio (Atmosfera protetora)
- 2) Injeção de mínimo volume (Magic Cut)
- 3) Inundação por óleo emulsionável (Óleo solúvel) – Cerâmicas CC650 e CC670
- 4) Inundação por óleo emulsionável (Óleo solúvel) – Metal Duro K10

5.9.1 - Atmosfera protetora com injeção de gás argônio

Nesta atividade foi executada com injeção de gás argônio durante a usinagem do compósito CRFC procurando manter o sistema ferramenta/cavaco numa atmosfera quase inerte, mantendo os parâmetros de corte que anteriormente teriam provocado o processo de oxidação ($V_c = 350$ m/min; $f = 0,1$ mm/v; $a_p = 1,0$ mm).

5.9.2 - Injeção de mínimo volume (Magic Cut)

Nesta atividade foi executada durante a usinagem do compósito CRFC, a aplicação do fluido de corte “Macron – A” através de injeção na forma gasosa sobre a aresta de corte da ferramenta, o qual dosava (60 ml/h), também procurando diminuir o atrito ferramenta/peça e diminuir a temperatura ($< 370^\circ\text{C}$), mantendo os parâmetros de corte que anteriormente teriam provocado o processo de oxidação ($V_c = 350$ m/min; $f = 0,1$ mm/v; $a_p = 1,0$ mm).

5.9.3 - Inundação por óleo solúvel - Cerâmica CC650/CC670

Nesta atividade da usinagem do composto CRFC, a inundação por meio de óleo solúvel sobre a aresta de corte das ferramentas cerâmicas foi aplicada procurando manter o sistema ferramenta/peça em regime de baixa temperatura ($< 370^{\circ}\text{C}$). Esta aplicação tem como objetivo evitar ou inibir o processo oxidativo e avaliar o comportamento do desgaste das ferramentas de cerâmicas CC650 e CC670, conforme ilustrado nas Figuras 5.20 e 5.21 respectivamente.

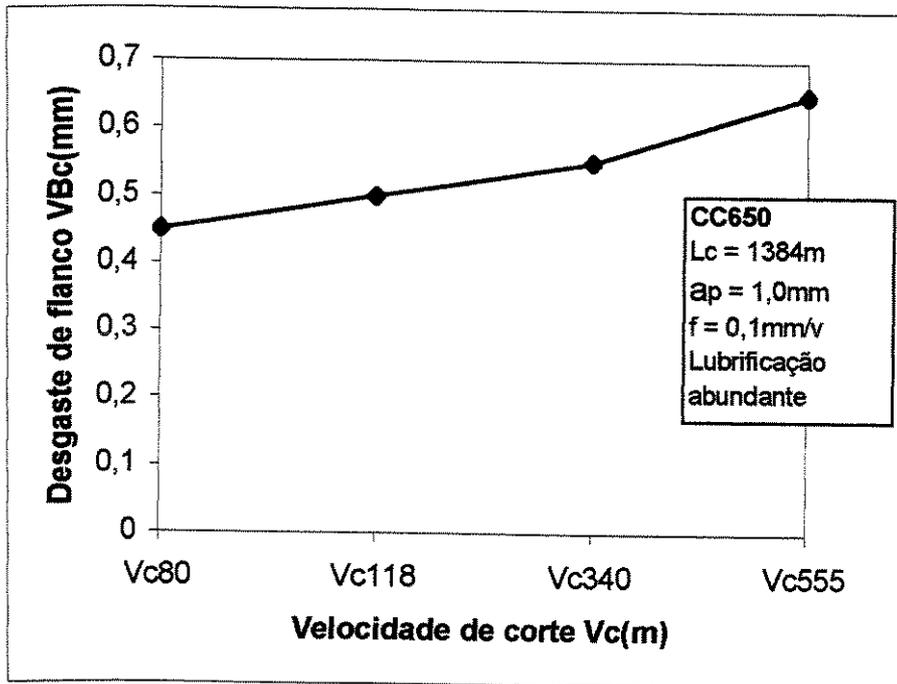


Figura 5.20 – Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte.

Os resultados obtidos com ferramentas de cerâmicas CC650 mostraram-se positivos em relação à inibição do processo oxidativo.

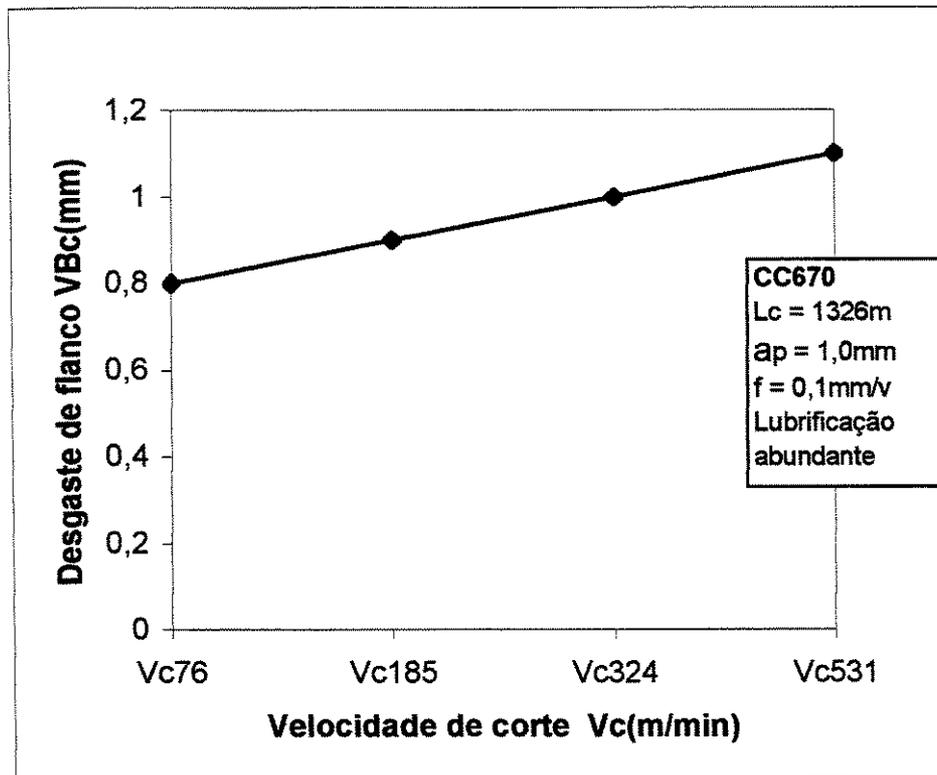


Figura 5.21 - Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte.

Analisando a ferramenta de cerâmica CC670, o comportamento do desgaste apresentou-se com resultados positivos durante a usinagem com óleo emulsionável em relação ao processo oxidativo, mas com incidência de desgaste mais acentuado quando comparado com a cerâmica CC650. A fase seguinte dos ensaios será elaborada com os mesmos critérios, mas substituindo as ferramentas por metal duro K10, com o objetivo de proporcionar mais resultados e com ferramentas diferentes, e assim obter uma melhor análise do processo oxidativo durante a usinagem do compósito CRFC.

5.9.4 - Inundação por óleo solúvel - Metal Duro K10

Nesta atividade da usinagem do compósito CRFC, a inundação por meio de óleo solúvel sobre a aresta de corte, foi aplicada procurando manter o sistema ferramenta/peça em regime de baixa temperatura ($< 370^{\circ}\text{C}$) para evitar o processo oxidativo, mantendo os parâmetros de corte que anteriormente teriam provocado este processo

($V_c = 350 \text{ m/min}$; $f = 0,1 \text{ mm/v}$; $a_p = 1,0 \text{ mm}$).

Durante a usinagem de peças derivadas de materiais compósitos em geral não é usado nenhum tipo de refrigerante, ou seja, estas operações devem sempre ser realizadas à seco. Este procedimento compromete as condições superficiais do material para as atividades posteriores. No entanto, como alternativa em um processo envolvendo um ensaio experimental, onde a necessidade de manter a temperatura na aresta de corte conforme especificado acima, tal procedimento torna-se pertinente. A Figura 5.22 apresenta o comportamento do desgaste de flanco com a aplicação de meios refrigerantes alternativos para uma primeira avaliação.

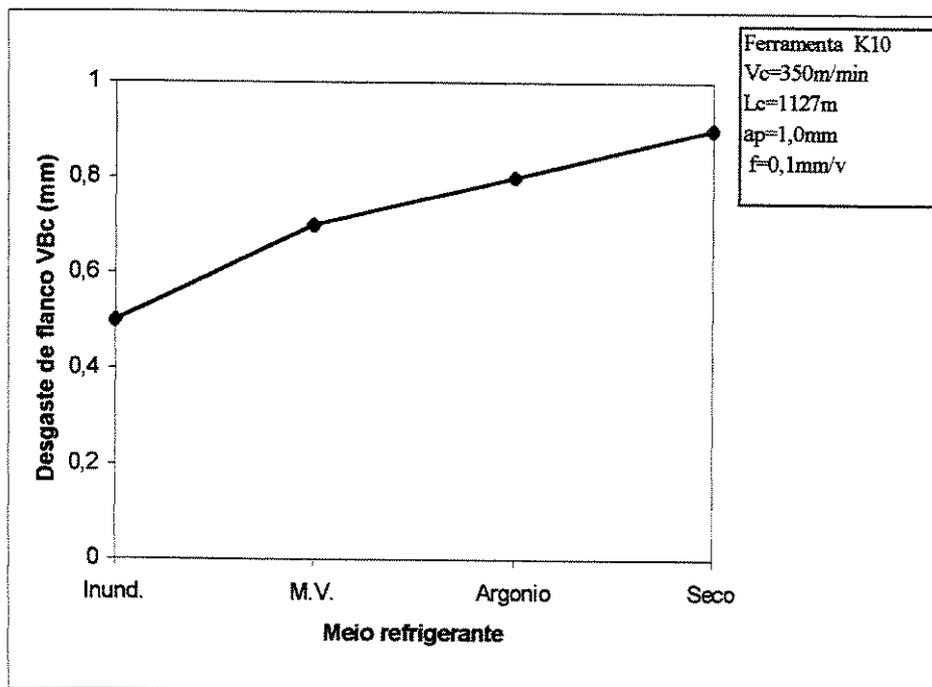


Figura 5.22 - Comportamento do desgaste de flanco x meios refrigerantes.

Analisando os resultados obtidos destas três atividades distintas, observou-se o comportamento do desgaste da ferramenta de metal duro ISO K10. A influência dos meios refrigerantes aplicados sobre a aresta de corte apresentaram-se indistintamente como efeito refrigerantes, porque quando comparados com os ensaios de usinagem a seco ocorreu uma redução na intensidade do desgaste de flanco das arestas ensaiadas. O processo que mostrou-se mais eficiente do ponto de vista de reduzir o desgaste foi a inundação por óleo solúvel, onde possivelmente também ocorreu uma queda de temperatura provocada pela refrigeração durante o processo.

Considerando a possibilidade de manter a temperatura na aresta de corte durante a usinagem, com valores inferiores à 370°C através do uso de inundação com óleo emulsionável, optou-se pela realização do ensaio de usinagem, agora variando-se a velocidade de corte em três níveis diferentes (88; 350; 628) m/min, com o objetivo de apresentar o comportamento do desgaste de flanco da aresta, após neutralizar os efeitos provocados pela oxidação conforme mostrados na Figura 5.23.

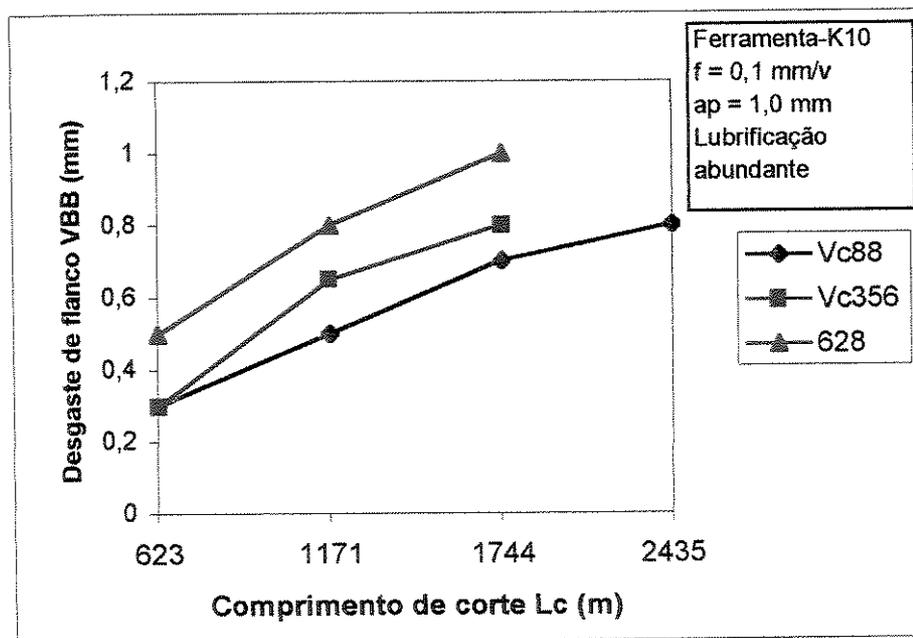


Figura 5.23 - Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte (c/ óleo)

Os resultados obtidos do ensaio da usinagem do compósito CRFC com inundação de óleo solúvel verificou-se que, o desgaste da aresta de corte evoluiu à medida que a velocidade de corte aumentou de 88 m/min para 628 m/min. Isto mostra que o desgaste por abrasão ferramenta/peça está associado agora ao aumento da velocidade de corte. Desta forma pode-se concluir que a temperatura na aresta de corte provavelmente não atingiu níveis próximos a 370°C, e conseqüentemente não ocorreu o processo de oxidação, visto que durante toda a extensão do ensaio não ocorreu em nenhum momento, sinais de redução ou inversão do comportamento do desgaste da aresta de corte em relação às velocidades de corte aplicadas. Apesar da ausência de oxidação, os níveis de desgaste reduziram em relação à usinagem a seco (Ver Figura 5.9) devido a influência do refrigerante aplicado conforme mostra a Figura 5.24.

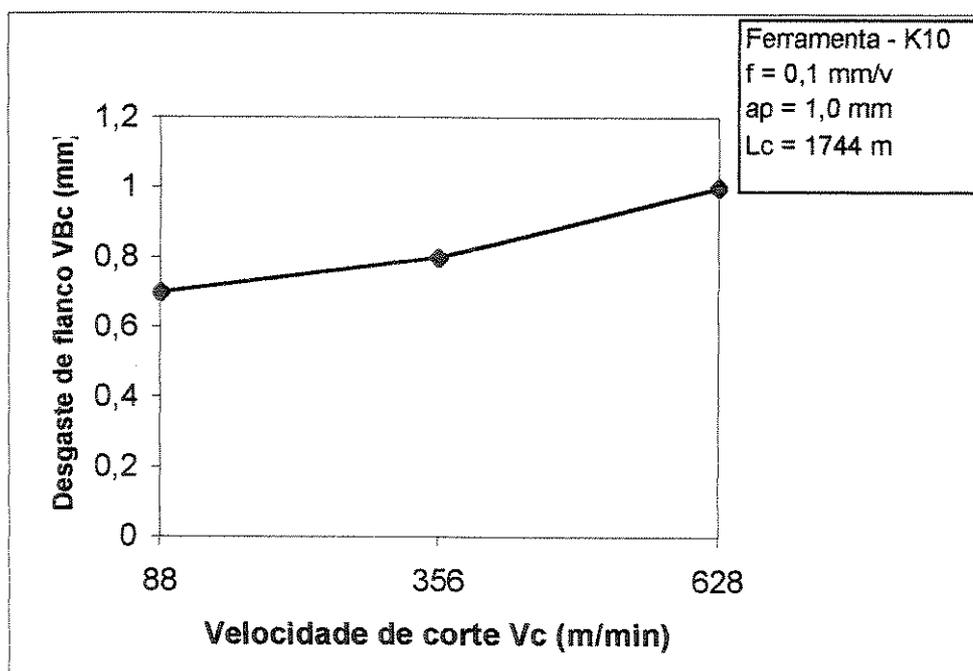


Figura 5.24 - Comportamento do desgaste de flanco x velocidade de corte com inundação de óleo solúvel.

Na Figura 5.25 é ilustrado o comportamento do desgaste de flanco, permitindo demonstrar uma análise comparativa dos resultados após a aplicação dos meios refrigerantes.

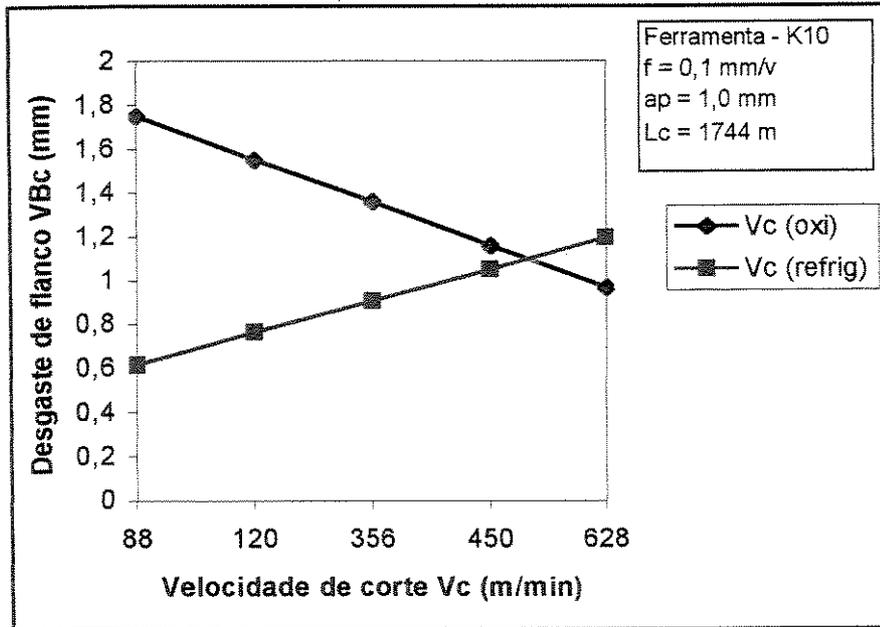


Figura 5.25 Análise comparativa dos resultados

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

As análises e verificações dos resultados obtidos neste trabalho experimental, permitem apontar as conclusões abaixo descritas.

Entre as ferramentas de corte ensaiadas, o diamante policristalino PCD apresentou melhor desempenho, e com menor nível de desgaste.

O surgimento de desgastes acompanhados de trincas verticais e horizontais, caracterizam a presença de atrito, gerando altas temperaturas na aresta da ferramenta, e esforços pulsantes em função da heterogeneidade do compósito, ocasionando a fadiga térmica e mecânica da ferramenta.

As ferramentas cerâmicas não apresentaram bom desempenho, apesar do desgaste de flanco moderado em relação a ferramenta de metal duro K10, mas os testes mostraram tendências de arrancamento das fibras durante o corte.

As análises das ferramentas ensaiadas mostraram predominância de desgaste por abrasão mecânica, mostrando-se mais acentuados com maiores avanços (f), provocando crateras sobre a superfície de saída da ferramenta.

A aplicação de meios refrigerantes durante a usinagem de compósitos, mostrou-se eficiente para inibir o processo oxidativo em ensaios experimentais mas, não aplicável para usinagem de peças em compósitos que serão submetidos a colagens posteriormente.

Durante a usinagem de compósitos CRFC, o cavaco em forma de pó gerado é altamente nocivo ao operador, à máquina-ferramenta e ao ambiente de trabalho, portanto, a prevenção para início dos trabalhos é fundamental.

O comportamento dos desgastes apresentados pela ferramenta de metal duro em usinagens de metais, não devem ser tomados como referência para a usinagem de compósitos CRFC, devido a influência da oxidação durante a usinagem.

A usinagem do compósito CRFC com aplicação de meios refrigerantes permitiu concluir que, com o aumento da velocidade de corte, mas com a inibição da temperatura, não ocorre o processo de oxidação, com isso acentuando o desgaste de flanco da ferramenta, reduzindo a vida da ferramenta.

O dinamômetro usado para monitoramento dos esforços de corte durante a usinagem, mostrou-se satisfatório, e atendeu às necessidades dos ensaios realizados, com restrições somente a duração dos intervalos de cortes, visto que a propagação de temperatura para a ferramenta influi no seu comportamento.

Sugestões para Trabalhos Futuros

As análises desenvolvidas durante toda a extensão deste trabalho, irão contribuir na realização de trabalhos dirigidos à usinagem de compósitos CRFC, mas para a continuidade e desenvolvimento dos trabalhos nesta linha de pesquisa, sugere-se algumas alternativas, as quais estão descritas abaixo:

Em função do desempenho, e do baixo índice de desgaste de flanco da ferramenta de diamante policristalino PCD, sugere-se estudos posteriores com ferramentas revestidas com diamante, visando seu baixo custo e evolução no parque industrial.

Visando a inibição de oxidação do compósito CRFC durante a usinagem, sugerem-se pesquisas alternativas em substituição aos meios refrigerantes (tipo MQL – Mínima Quantidade de Óleo), sem comprometer o compósito.

Para efeitos de comprovação, dos níveis a que a temperatura atinge durante a usinagem na aresta de corte, propõe-se estudos posteriores que permitam monitorar a temperatura, visto existir pouca informação a esse respeito.

Sendo o compósito CRFC material estratégico e de altíssimo custo, portanto, as informações que contribuirão para suas usinagens são de valiosa importância. Sendo assim sugere-se estudos, e a possibilidade de realização de trabalhos durante a usinagem e a fabricação de peças.

Considerando os eventuais efeitos causados pela usinagem, sugere-se analisar a qualidade e a integridade da superfície e sub-superfície da peça usinada devido à oxidação.

Verificando que as informações voltadas à usinagem de materiais compósitos ainda são poucas, sugere-se pesquisas à usinabilidade de outros compósitos.

Referências Bibliográficas

- Abrão, A. M., Aspinwall, D. K., A utilização de ferramentas cerâmicas na usinagem dos metais. IV Congresso de Eng. Mecânica Norte-Nordeste, Recife, 1996, v.1,p.243-248.
- A. B. Strong, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications (Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1989)
- Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N. K., Komanduri, On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates. International Journal on MachineTools and Manufacturing, v.35,n.5,p.701-716, 1995.
- Brinksmeier, E., Bartsch, S., Ceramic cutting tools – Materials Characteristics and load types determine wear mechanics. Annals of the CIRP, v. 37/1, p. 97-100, 1988.
- Brookes, K., J., A., World directory and handbook of hardmetals. International Carbide Data, Fifth Edition, 1993, 130p.
- Coelho, R. T., Aspinwall, D. K., Wise, M. L. H., Aplicação de materiais ultraduros como ferramentas de corte de geometria definida. Máquinas e Metais, n. 352, maio de 1995.
- Coelho, R. T., The machinability of aluminium-based SiC reinforced metal matrix composite (MMC) alloy with emphasis on hole production. U. K. School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham, 1994, 329p. PhD. Thesis.

- Coppini, N. L., Ferreira J. R., Levy Neto F., Pardini, L. C., Caracterização de compósitos de C/C tendo em vista o seu processo de usinagem. 50º Congresso Anual da ABM, SãoPedro-SP 1995, p.109-124.
- Coppini, N. L., Ferreira, J. R., Levy Neto, F., Pardini, L. C., (a) Properties of carbon fiber reinforced carbon composites regarding the machining process. CSME'1996-Mechanics in Design, Toronto, Canadá, 1996, p.993-942.
- Coppini, N. L., Ferreira, J. R., Levy Neto, F., Pardini, L. C., (b) Machining process and Superficial hardness of carbon composites. OMAE'96-15th Internacional Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Materials Engineering/ ASME, v.III, Itália, 1996, p.269-274.
- Costa, Dalberto D., Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos. Campinas: Faculdade de Enga. Mecânica, UNICAMP, 1993, 110p. Dissertação (Mestrado)
- Dennis, P. (a), Machining fibre-reinforced plastics. Industrial Diamond review, v.51, p.288-291,1991.
- Diniz A. E., Coppini N. L., Marcondes F. C., Tecnologia da Usinagem dos Metais, MM Editora, 242p., 1999.
- Ezugwu, E. O, Wallbank, J., Manufacture and propertiesof ceramic cutting tolls: A review.Materials Science and Technology, v.3/11, p.881-887, 1997.
- Ferraresi, D., Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda.,1997, 751p.
- Ferreira, G. E. Processamento, Caracterização mecânica e análise térmica de compósitos carbono/carbono Tridirecionais. S. J. Campos: ITA – Instituto de Aeronáutica,1994, 110p. Dissertação (mestrado)

- Ferreira, J. R. Características da usinagem de um compósito de resina fenólica reforçada Com fibras de vidro e carbono. Campinas: Faculdade de Enga. Mecânica, UNICAMP, 1992, 146p. Dissertação (Mestrado).
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Levy Neto, F., (a) Análise comparativa entre usinagem de compósito PRFC e usinagem convencional dos metais. XIV COBEM, em CD, COB116, Bauru-SP, 1997.
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Miranda, G. W. ^a, (d) Machining optimisation in carbon fibre optimisation in carbon fibre reinforced plastics. AMP'97 –Advances in Materials and Processing Technologies, Portugal, 1997, v. 1, p.220-227.
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Miranda, G. W. A, (e) Metodologia de otimização da utilização da ferramenta de corte na prática da usinagem. O Mundo da Usinagem, n.3, Sandvik Coromant, p.42-46, 1997.
- Ferreira, J. R. Torneamento de Materiais Compósitos Reforçados com Fibras de Carbono. . Campinas: Faculdade de Enga. Mecânica, UNICAMP, 1999, 196p. Tese (Doutorado).
- Fitzer, E., “The of Future of Carbon-Carbon Composites ; Carbon vol. 25, Nº 2, pp. 163-190, 1987.
- Hasegawa, Y., Hanasaki, S., Satonaka, S, Characteristics of tool wear in cutting GFRP. Proceedings of the 5th Internacional Conference on Production Engineering Tokyo, 1984, p.185-190.
- Hocheng, H, Leu, S. C., Machining characteristics of carbon fiber reinforced epoxy tube inTurning. Composites, n.3, p.136-140, May-June 1992.
- Heym, M., Fitzer, E., “Carbon Fiber Reinforced Carbon”, Processing and Uses of Carbon Fiber Reinforced Plastics; VDI-Verlag, pp. 85-105, 1981

Hunt, M. "Aerospace Aluminum" Materials Engineering. 1990: 27-30.

Kim, K. S., Lee, D. G., Kwak, Y. K., Namgung, S., Machinability of carbon fiber epoxy Composite materials in turning. Journal of Materials Processing Thecnology, v.32, p.553-570, 1992.

Komanduri, R., Machining fiber-reinforced composites. Mechanical Engineering, April 1993.

Komanduri, R., Machining of fiber reinforced composites. Machining Science and Technology, v.1, n.1, p.113-152, 1997.

Konig, W., Tecnologia de Fabricação Vol.1: Tornear, fresar, e furar. Aachen: 1981. Tradução: Prof. Dr. Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, UFSC, Florianópolis.

Konig, W., Wulf, Ch., Graß, P., Willerscheid, H., Machining of fibre reinforced plastics. Annals of the CIRP, v. 34/2, 1985, p. 537-548.

Koplev, A., Lystrup, Aa., Vorm, T., The cutting process, chips, end cutting forces in machining CFRP. Composites, 1983, v. 14, p.371-376.

Krishnamurthy, R., Fatigue of ceramic cutting tools. Machanical Behaviour of Materials-VI, Kyoto, 1991, v.2, p.339-344.

Krishnamurthy, R., Santhanakrishnan, G., Malhotra, S. K., Machining of polymeric Composites. Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, Chicago, 1992 p.139-148.

Krivov, G.,A., and Lupkin, B., V., Machining of polymer-composite materials, 1995

- Lange, F., F., Transformation toughening, Part 2: Contribution to fracture toughness. *Journal of Materials Science*, v.17, pp.235-239, 1982.
- Levy N., F., Pardini, L. C., Silva, J. L. G., Development of a tridirectional carbon fibre reinforced carbon composite for aerospace. *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, v.XVII, n°2, p.171-180, 1995.
- Mano, E., B., “Introdução a Polímeros”; Editora Edgar Blucher LTDA, 1985
- Marsh, H., et al., “Introduction to Carbon Science” Editor Prof. Harry Marsh, Butterworths, Londres, 1989.
- Masuda, M., Kuroshima, Y Chujo, Y., Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in Machining of carbon materials. *Wear*, v.169, p. 135-140, 1993.
- McAllister, L. E., Lachman, W. L. Fabrication of composites. *Handbook of Composites*, v. 4, Elsevier Science Publishers, 1983, Cap. III: Multidirectional Carbon/Carbon Composites p.109-176.
- M. Peters and H. Buhl, *Advanced Aerospace Materials*, ed. H. Buhl (Berlin: Springer-Verlag, (1992)
- NN, Herramientas de tornear. Catálogo de fabricante, Sandvik Coromant, 1993/1994.
- NN, *Modern metal cutting – A practical Handbook*. Sandvik Coromant, 1994.
- Otani, S., Estudo da conversão térmica de piches em mesofases e coques, precursores de Materiais carbonosos e grafiticos. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1991, 212p. Dissertação (Mestrado).

- Pardini, L. C., Structure and properties of Sic modified carbon reinforced carbon Composite. University of Bath, UK, 1994. Ph.D. Thesis.
- Puw, H. Y., Hocheng, H., Machinability test of carbon fiber-reinforced plastics in milling. *Materials & Manufacturing Processes*, v.8,n.6, p.717-729, 1993.
- Richards, N., Aspinwall, D., Use of ceramic tools for machining nickel based alloys. *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, v.29, n.4, p.575-588, 1989.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K., Investigation into the machining of carbon fibre reinforced plastics with cemented carbides. *Journal of Materials Processing Thecnology*, v.30, p.263-275, 1992.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K. (a) Preliminary investigations on machining of advanced fibrous composites. *Advanced Materials: Performance Through Technology Insertion*, Anaheim, USA, May 1993, v.38.II, p.1700-1709.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K. (b) Mchanics of tool wear during Machining of advanced fibrous composites. *Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials*, Gaithersburg, USA, 1993, p.489-500.
- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K. ©, Investigation on the dynamics of Machining of composites. *ICCM/9, v III: Composites Modelling and Processing Science*, Madrid, 1993, p.608-615.
- Savage, G., *Carbon/carbon composites*. London: Chapman & Hall, 1993, 389p.
- Shaw, M. C., *Metal cutting principles*. New York: Oxford University Press, 1984, 594 p.

Spur, G., Wunsch, U. E., Turning of fiber reinforced plastics. Manufacturing Review, v.1, n.2p. 124-129, June 1988.

Spur, G., Wunsch, U. E., Turning of fibre reinforced thermosetting plastics. Kunststoffe German Plastics, v.76, p.8-11, 1986.

Takeshita, H., Wehara, K., Cutting mechanism of some composite materials. 2nd International Metal Cutting Conference, Tokyo University, Japan, 1985.

Thomas, C. R. Essentials of carbon/carbon composite. Cambridge: The Royal Society Chemistry, 1993, 233p.

Welpmann K. and Peters M., Advanced Aerospace Materials, Berlin – Springer – Verlag, 1992

Weinert, K, König, W., A consideration of tool wear mechanism when machining metal matrix composites (MMC). Annals of the CIRP, v,42/1, p.95-98, 1993.

Bibliografia Complementar

Abrão, A. M., Aspinwall, D. K., Pastilhas de CBN e cerâmicas facilitam e melhoram a usinagem de materiais duros. Máquinas e Metais, p.22-28, outubro de 1995.

Araújo, U. C., Dificuldades e Cuidados no processo de furação em carbono. Máquinas e Metais. Setembro de 1989.

Buckley, J. D., Edie. D. D. Carbon/Carbon materials na composites. USA: Noyes Publications, 1993.

- Colding, B., Koing, W, Vality of the Taylor equation in metal cutting. *Annals of the CIRP*,v.19, p.793-812, 1971.
- Cook, N. H., Tool wear and tool life. *Journal of Engineering for Industry*, November, p.931-938, 1973.
- Coppini, N. L., Ferreira, J. R., Custo de usinagem na seleção de ferramentas no torneamento Compósitos PRF, *Máquinas e Metais*, n,375, Abril 1997, p.270-277.
- Coppini N. L., Ferreira, J. R. (a), Turning of carbon and glass fiber hybrid cloth composite material. *Proceedings of the Internacional Conference on Machining of AdvancedMaterials*, Gaithersburg, USA, 1993 p.447-453.
- Coppini N. L., Ferreira, J. R. (b), Tool cutting behavior in and glass fiber reinforced plasticTurning. *CANCAM'93- Canadian Congress of Applied Mechanics*, p.33-34.
- Ferreira, G., Levy N., F. et al, Estudo preliminar do processo de obtenção de conjugados Carbono/Carbono. *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Polímeros*, São Paulo,1993, p.270-274.
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Levy Neto, F., (b) Characteristics of carbon-carbon composite Turning. *AMME'97- Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, Poland, 1997, p.71-74.
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Miranda, G. W. ^a, (c) Desempenho de ferramentas de corte no torneamento de compósito reforçado com fibras de carbono, *CIDIM'97-III Congresso Ibero-americano de Ingeniería Mecánica*, Anais em CD, La Habana/Cuba, 1997.
- Ferreira, J. R. Coppini, N. L., Levy Neto, F. (a), Performance of tools in carbon-carbon Composites machining. *ICCE/5-Fifth Internacional Conference on Composites Engineering*, Las Vegas/USA, 1998, p.285-286.

- Ferreira, J. R., Coppini, N. L., Levy Neto, F.(b), Particularidades da usinagem de um compósito de carbono reforçado com fibras de carbono (CRFC). VCEM-NNE- Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Fortaleza-CE, Out/1998, v.IV, p.316-323.
- Ferreira, J. R., Coppini, N. L. (a) Escolha da ferramenta no torneamento de resina reforçada com fibras vidro e carbono.RBCM-Journal of the Braz. Soc.Mechanical Sciences, v.XV, n.2, p.112-123, 1993.
- Ferreira, J. R., Coppini, N. L. (b), Torneamento de material compósito reforçado com fibras de vidro e carbono. Anais do XII COBEM, Brasília, 1993, v.III, p.1627-1630.
- Gonçalves, A., Análise experimental da estabilidade e resistência de cilindros de Carbono/epóxi submetidos a cargas compressivas uniaxiais. S. J. Campos ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1997, 85p. Dissertação (Mestrado).
- ISO 3685, Tool life testing with single-point turning tools. Switzerland, 1993, 49p.
- Kanda, K., Takehana, S., Yoshida, Watanabe, R., Takano, S., Ando, H, Shimakura, F.,Application of diamond-coated cutting tools. Surface & Coatings Technology, v.73p.115-120, 1995.
- Lachman, W. L. Multidirectionally reinforced carbon/carbon composites. Proceedings of the International Conference on Composite Materials, Ed. Metallurgical Society of the American Institute of Mining, 1978, p. 1302-1319.
- Machado, A., R., Silva, M. B., Usinagem dos metais. Apostilado Curso de Pós-Graduação Depto. Eng. Mecânica, UFU, Uberlândia-MG, 1994. Marcondes, F. M., A história do metal duro. Sandvik Coromant, 1990.
- Narutaki, N., Usuki, H, Yamane, Y., Ito, T., Wear characteristics and cutting performance of Diamond coated ceramic tools. Surface Modification Technologies, Birmingham, U.K., 1991, p.259-271.

- Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S. K., High speed steel tool wear studies in machining of glass-fibre reinforced plastics. *Wear*, v. 132, p.327-336, 1989.
- Takeyama, H., Lijima, N., Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of Ultrasonic machining, *Annals of the CIRP*, v. 37/1, p.93-96, 1988.
- Caprino, G., Tagliaferri, V., Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics. *Internat. Journal on Machine Tools and Manufacturing*, v.35, n.6, p.817-829, 1995.
- Chandrasekharan, V., Kapoor, S. G., Devor R. E., A mechanistic approach to predicting the Cutting forces in drilling: with application to fiber-reinforced composite materials. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, v.117, p.559-570. November 1995.
- Cheng, H., Dharan, C. K. H., Delamination During Drilling in Composite laminates. *Journal of Engineering for Industry. Transactions of the ASME*, v.112, p.236-239, August 1990.
- Hocheng, H., Puw, H. Y., On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and Thermoplastics. *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, v.32, n.4, p.583-592, 1992.
- Hocheng, H, Puw. H. Y., Machinability of fiber-reinforced thermoplastics in drilling. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, v.115, p.146-149, January 1993.
- Konig, W., Crojager, L., Spur G., Tonshoff, K., Vigneau, M., Zdeblick, W., Machining of New Materials. *Annals of the CIRP*, v.39/2, p.673-681, 1992.
- Konig, W., Graß, P., Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets *Annals of the CIRP*, v.38/1, 1989, p. 119-124.

Konig, W., Neises, A, Wear mechanism of ultrahard, non-metallic cutting materials. *Wear*, v.162-164. p.12-21, 1993.

Konig, W., Wagemann, A, Machining of ceramic components: process-technological Potentials. *Proceedings of the International Conference on Machining of Advanced Materials*. Gaithersburg, USA, 1993, p.3-16.

Lins, S. C., Chen, I. K., Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed. *Wear*, v.194, p.156-162, 1996.

Nakayama, K., Minoru, A., Kanda, T., Machining characteristics of hard materials. *Annals of the CIRP*, v.37/1, 1988, p. 89-92.

Narutaki, N., Yamane, Y., Hayashi, K., High speed machining of inconel 718 with ceramic Tools. *Annals of the CIRP*, v.42/1, p103-106, 1993.

Tagliaferri, V., Capino, G., Diterlizzi, A, Effect of drilling parameters on the finish and Mechanical properties of GFRP composites. *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, v.30, n.1, p.74-84, 1990.

Anexo

A - Desenvolvimento de um dinamômetro para monitoramento dos esforços da usinagem em compósitos - CRFC

A.1 - Introdução

A usinagem de materiais compósitos CRFC (torneamento) diferem substancialmente no comportamento do desgaste das ferramentas e na intensidade de seus esforços de corte, quando comparados com a usinagem de materiais metálicos (ferrosos e ã ferrosos). Suas características singulares, e até o momento pouco exploradas do ponto de vista de usinagem, requerem uma análise detalhada durante os ensaios experimentais visto que, tratar-se de um material compósito de custo elevado para a sua obtenção, e crescente ascensão na aplicação em novos projetos onde a conformidade geométrica e dimensional têm de ser preservada no produto final.

O monitoramento do esforços de usinagem (forças de corte, forças de avanço) será de grande importância para a complementação desta análise visto que, as variáveis adotadas durante os ensaios (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte), e as variáveis obtidas durante os ensaios (temperatura, desgaste das ferramentas), têm relação direta com os esforços de usinagem sobre a ferramenta. Desta forma optou-se pela aplicação de um instrumento para a monitoração dos esforços obtidos mas, adequado aos níveis de esforços a serem monitorados, ou seja, dimensionado estruturalmente para não permitir a excitação de sua frequência natural, provocando vibrações desnecessárias durante o processo de usinagem.

Este instrumento (dinamômetro) foi desenvolvido baseando-se na estrutura de uma junta de barras flexíveis horizontais e verticais, dimensionadas e distribuídas com condições de registrar

simultaneamente através de strain-gages, deformações estas provocadas pela reação dos esforços de corte acima citados.. A Figura I.1 ilustra a configuração proposta

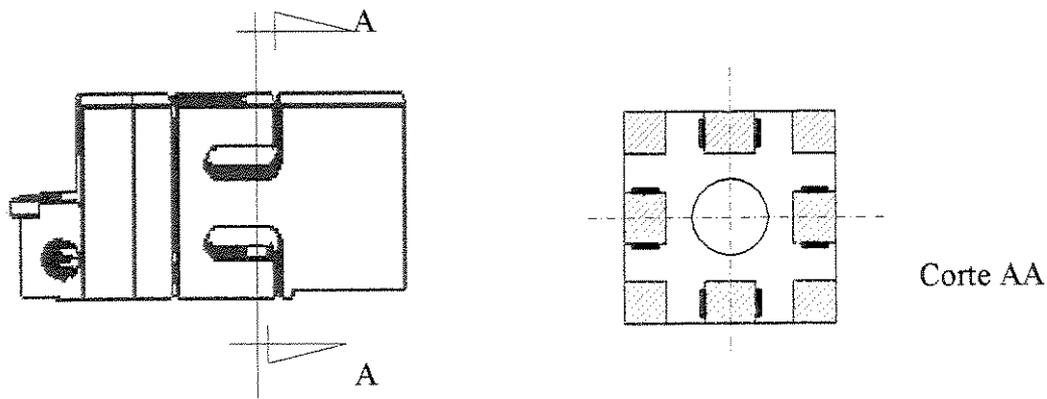


Figura I.1 – Ilustração mostrando a junta flexível e os extensômetros.

As especificações preliminares para o projeto deste dinamômetro serão:

- 1) Tipo de material.
- 2) Condições de fixação da peça e do instrumento.
- 3) Faixa de esforços de corte pretendidas (mínima e máxima).
- 4) Quantidade de esforços simultâneos.
- 5) Máquina ferramenta a ser empregada.
- 6) Matéria prima do instrumento (dinamômetro).

O material da peça a ser usinado consiste de um bloco cilíndrico vazado internamente de CRFC (hexagonal) com as seguintes dimensões:

$\phi_{ext.}$ - 310 mm

$\phi_{int.}$ - 180 mm

L - 180 mm

A fixação da peça na máquina deverá ser feita com auxílio de dispositivo de contrapressão interno, ou seja permitindo entrada e saída da ferramenta livre, controle e espaço operacional do sistema peça-ferramenta conforme ilustrado na Figura I.2.

Montagem do dispositivo

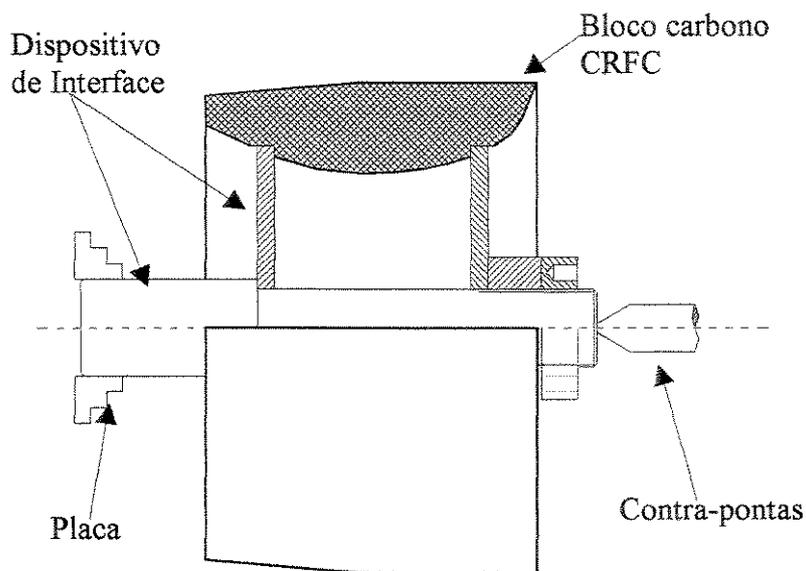


Figura.I.2 - Esquema de montagem do dispositivo de interface peça/máquina

Considerando resultados obtidos anteriormente (Ferreira, 1997 e 1999) durante a usinagem em compósitos PRFC e CRFC, foram adotados como referências os seguintes valores de esforços de corte admissíveis:

Capacidade $\Rightarrow 1,0 \text{ N} \Leftrightarrow 1300 \text{ N}$

Os esforços a serem monitorados durante o experimento simultaneamente deverão ser:

Forças de corte – F_c

Forças de avanço – F_a

A máquina ferramenta será um torno horizontal (universal), sendo a fixação da peça feita com placa (3 castanhas), contra-pontas e auxílio do dispositivo de fixação da peça. As faixas de

rotações por minuto(rpm) e avanços (mm/rot.), serão adotadas conforme necessidade do experimento e disponibilidade da máquina-ferramenta. A matéria prima para a fabricação do dinamômetro deverá ser especificada de tal modo a atender às características funcionais do instrumento, ou seja elasticidade (efeito mola) e estruturais (rigidez).

A.2 – Requisitos que devem satisfazer os dinamômetros

De um modo geral, os dinamômetros devem satisfazer os seguintes requisitos, conforme (Ferraresi, 1970):

- Sensibilidade
- Precisão
 - Erro de leitura
 - Erro de fidelidade
 - Erro de Mobilidade
 - Erro de histerese
 - Erro sobre zero
- Rigidez
- Exatidão de reprodução das forças variáveis com o tempo.
- Insensibilidade quanto a variação de temperatura e à umidade

A.3 - Considerações para definição da geometria do dinamômetro

Adotando-se critérios básicos necessários para usinagem em torneamento cilíndrico externo, este instrumento deve considerar tal geometria e dimensões em sua concepção que permita sua fixação adequada, e ao mesmo tempo proporcione extremidade em balanço onde estarão posicionados a cabeça indexável para fixação da ferramenta de corte, e a junta flexível para acumular as deformações oriundas dos esforços de usinagem, e permitir o posicionamento dos extensômetros(strain-gages). A Figura I.3 apresenta a configuração preliminar proposta para atender aos requisitos básicos do dinamômetro.

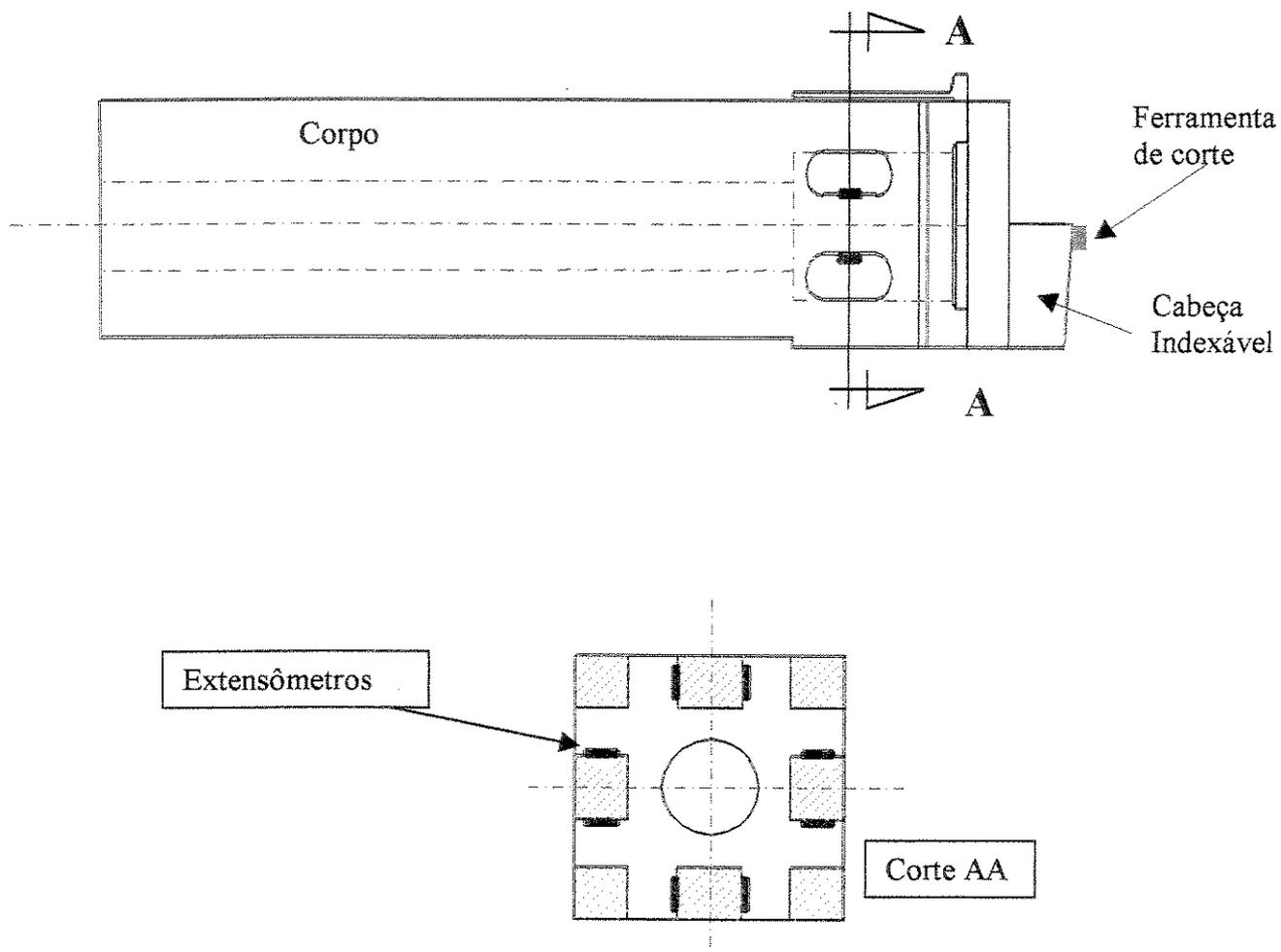


Fig. I.3 - Configuração preliminar do dinamômetro

A extremidade para fixação da ferramenta de corte na cabeça indexável, será dimensionada de tal forma a permitir o perfeito assentamento da pastilha, e ao mesmo tempo adequar os ângulos de inclinação necessários para a atividade desejada. Outro ponto importante a ser ressaltado no posicionamento da ferramenta de corte, é o alinhamento coincidente da aresta de trabalho com a linha média do sistema, quer seja na direção vertical(y) ou na direção horizontal(x) conforme ilustrado na Figura I.4. Este procedimento visa a neutralizar os esforços de torção na região da célula flexível, o qual induziria a coleta de sinais não condizentes e influenciados por esforços não desejados.

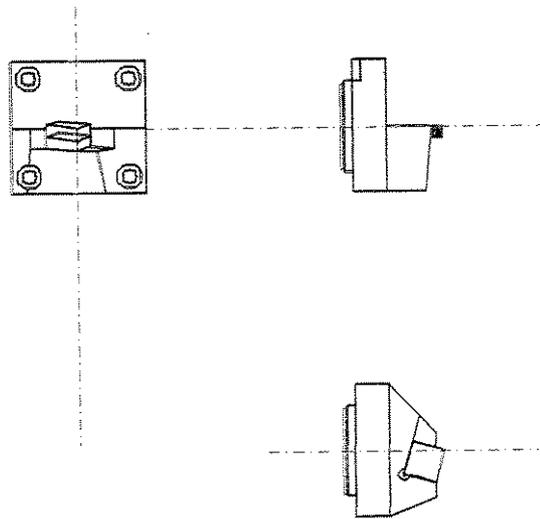


Fig. I.4 - Configuração da cabeça indexável

A concepção da junta flexível na extremidade do corpo do suporte será definida com os seguintes critérios:

- Extensão longitudinal máxima = 54,5 mm
- Aquisição de sinais simultâneos(x, y)
- Definição das vigas para posicionamento dos extensômetros(verticais e horizontais).
- Permitir acoplamento da cabeça indexável.

A Figura I.5 ilustra a extremidade do corpo do dinamômetro, onde está localizada a junta flexível.

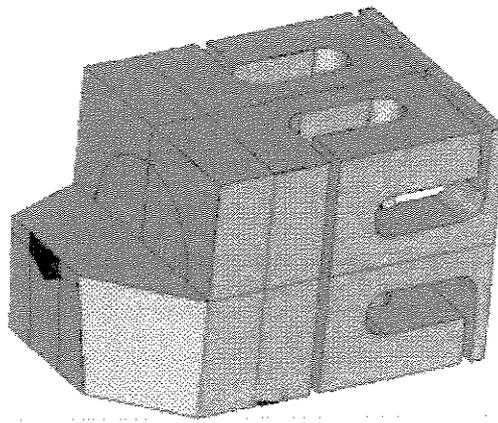


Fig. I.5 - Configuração geométrica do suporte (com junta flexível)

A.4 - Dimensionamento estrutural do dinamômetro

Considerando a usinagem como sendo torneamento cilíndrico externo, a haste do dinamômetro deverá estar engastada perpendicularmente no carro transversal do torno, onde teremos uma seção do corpo do instrumento a qual estará em balanço e comportará a junta flexível com os respectivos extensômetros, portanto deveremos considerar para efeito de dimensionamento e cálculo estrutural como sendo uma viga engastada(mola) conforme ilustração da Figura I.6.

A aquisição dos dados obtidos, quer seja esforços de corte(F_c), ou esforços de avanço(F_a) durante a usinagem, será feita simultaneamente em duas vigas paralelas entre si, as quais permitirão monitorar o comportamento dinâmico, mostrando durante a usinagem se os esforços estariam provocando torção na região da junta flexível, e também distribuir os esforços de modo a proporcionar equilíbrio, visto que a aresta da ferramenta de corte estará posicionada na linha neutra da junta flexível, tanto na direção dos esforços(F_c) e (F_a).

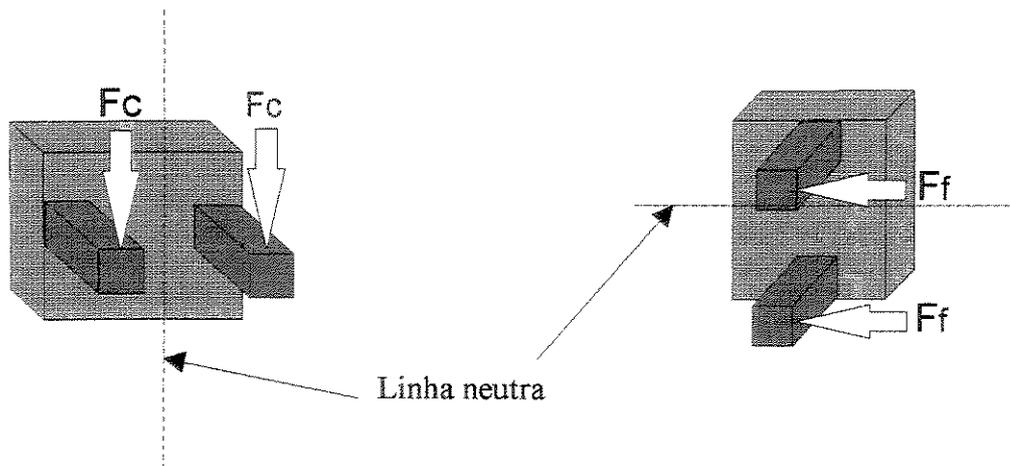


Figura I.6 – Ilustração das forças de corte/avanço sobre a junta flexível

A.5 - Estabelecimento das condições limites de trabalho do dinamômetro

Considerando os parâmetros já aplicados na usinagem do CRFC Hexagonal anteriormente (Ferreira, 1999), para o desenvolvimento deste trabalho serão mantidos os valores mostrados na tabela abaixo, visto que os resultados a serem alcançados têm como objetivo comparar e avaliar o comportamento das ferramentas de corte aplicar na usinagem (torneamento) do compósito carbono/carbono (CRFC) na forma hexagonal.

Tabela n.º I.1 - Parâmetros de corte utilizados durante o trabalho.

	f (mm/volta)	ap (mm)	Fc (kgf)	Fa (kgf)
Condição mínima	0,1	1	05	05
Condição máxima	0,3	3	130	100

Durante o desenvolvimento do dinamômetro procurou-se levar em conta os requisitos apresentados anteriormente ou seja, rigidez e sensibilidade para definição do melhor dimensionamento da região de medida que, neste equipamento deve funcionar como uma mola elástica e ao mesmo tempo no caso de torneamento, o comportamento da “rigidez” deve ser equivalente à de uma ferramenta de barra para operação normal de torneamento, e também limitar o dimensionamento sem comprometer o requisito “sensibilidade” do instrumento. Desta forma as dimensões encontradas foram:

Condições de trabalho:

- comprimento da mola: 15mm
- seção transversal da mola: (10x10)mm \Rightarrow Área = 100mm² (2x)
- distância do engaste até a aresta da ferramenta de corte = 75mm
- flecha máxima(calculada) = 0,42 mm na extremidade da aresta.
- material especificado: Aço SAE 4340 - Temp. Rev. (42 – 46)Rc
- extensômetros elétricos tipo “J”- unidirecionais, mod. EA-30-500BH-120 (M.M.)

A.6 – Posicionamento dos extensômetros

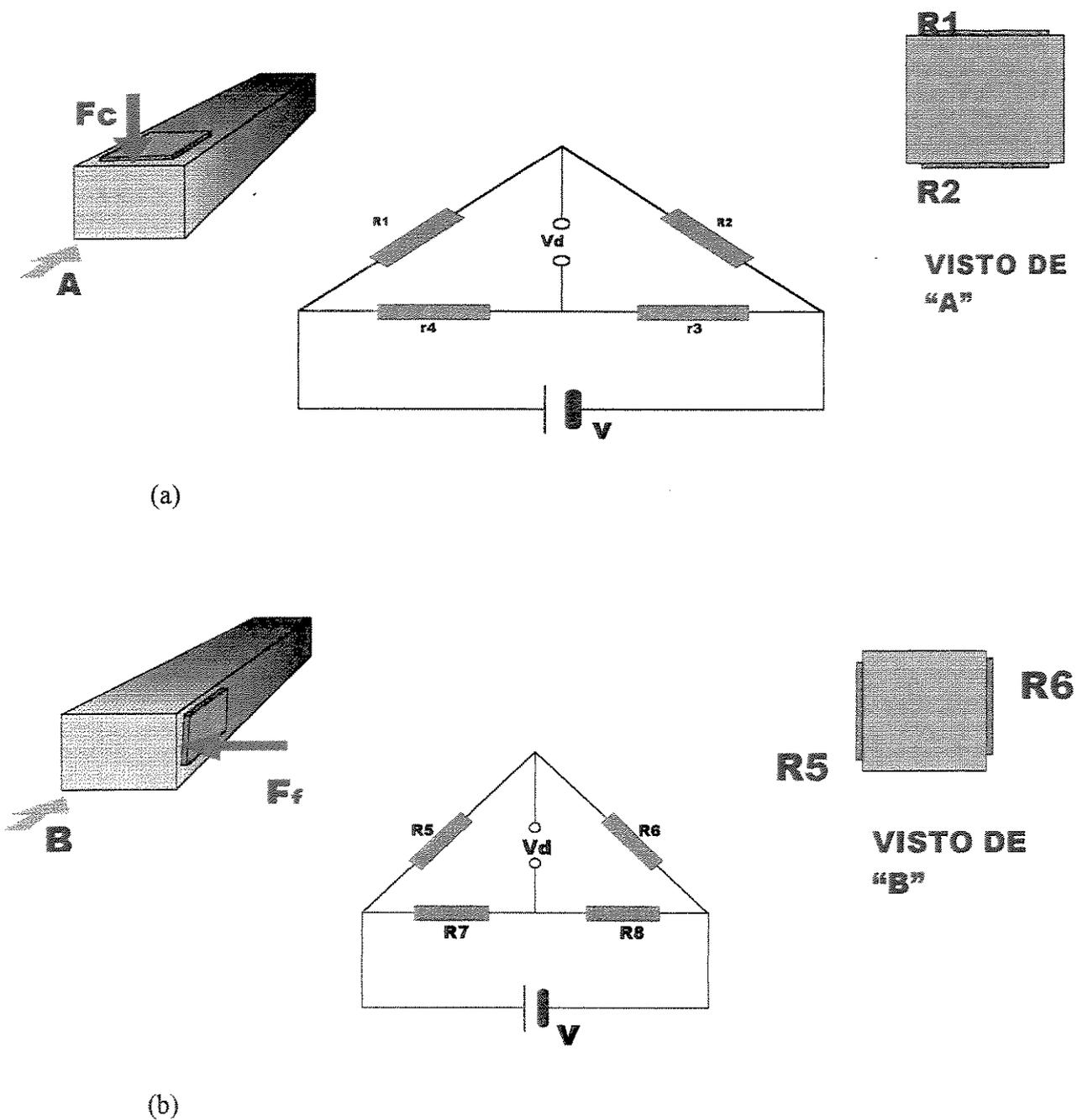


Figura I.7 (a)(b) apresenta a disposição dos extensômetros na região de medida; R1 e R2 para detecção da força de corte F_c ; R5 e R6 para força de avanço F_a respectivamente.

O instrumento desenvolvido para monitoramento dos esforços de corte das ferramenta ensaiadas neste trabalho, é formado por uma junta flexível que se deforma sob a ação das forças de usinagem. Esta deformação é detectada por extensômetros elétricos, colados em regiões devidamente posicionados, onde simultaneamente irão registrar os sinais elétricos detectados. Os extensômetros estão ligados em circuitos de ponte de wheatstone, de maneira que as variações das resistências elétricas, devido às variações de seus comprimentos, são acusadas pelos desequilíbrios das pontes.

A alimentação dos circuitos assim como a saída do sinal, é efetuada através de pontes amplificadoras. Tratando-se de medidas estáticas das forças de usinagem, a leitura pode ser efetuada diretamente nas pontes amplificadoras.

A.7 – Análise estrutural da junta flexível do dinamômetro

Para efeito de avaliação do cálculo e dimensionamento estrutural, antes de iniciar a fabricação do dinamômetro, foi desenvolvida uma simulação através dos métodos de elementos finitos (software Cosmos), onde foi possível visualizar os deslocamentos (flechas), e tensões atuantes conforme os esforços foram sendo aplicados respectivamente.

1- Análise

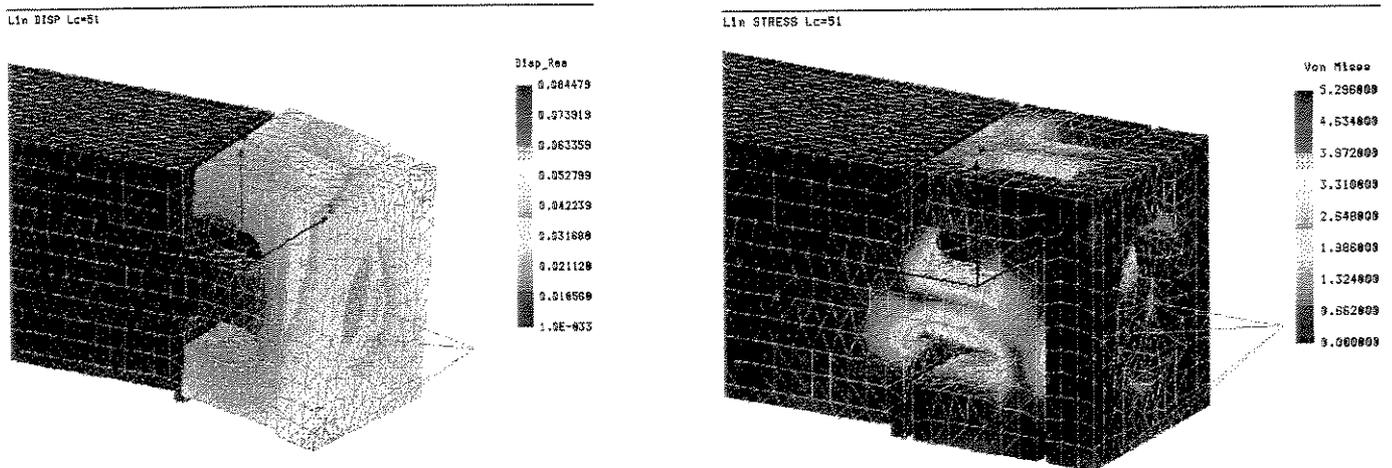


Fig. I.8 - Comportamento estrutural com aplicação de esforços de 32,5Kgf(Fc) e 25Kgf(Fa) respectivamente

2 – Análise

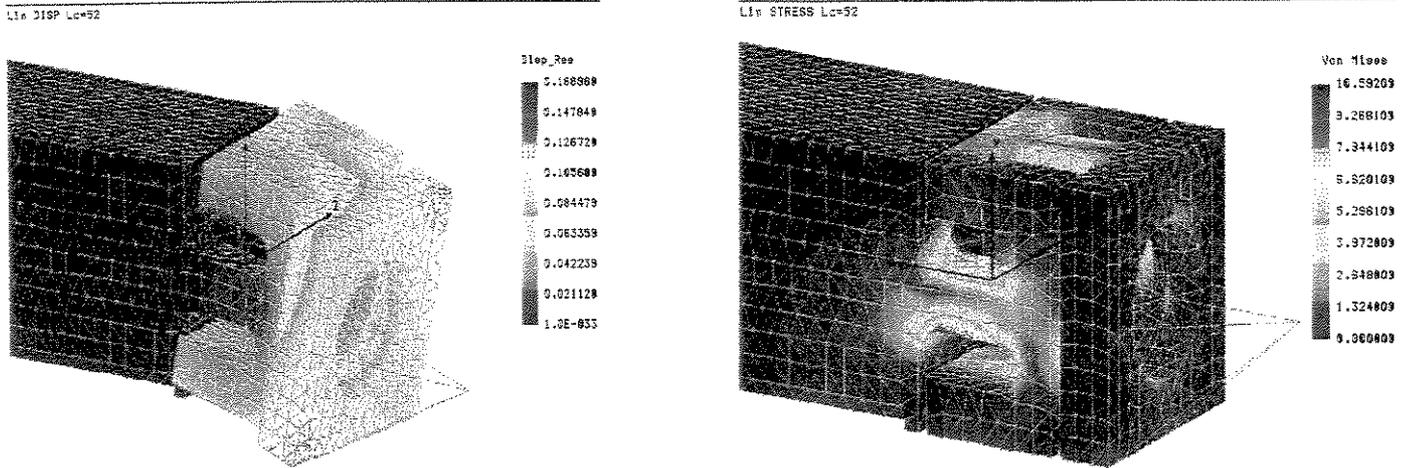


Fig. I.9 - Comportamento estrutural com aplicação de esforços de 65Kgf (Fc) e 50Kgf(Fa) respectivamente

3- Análise

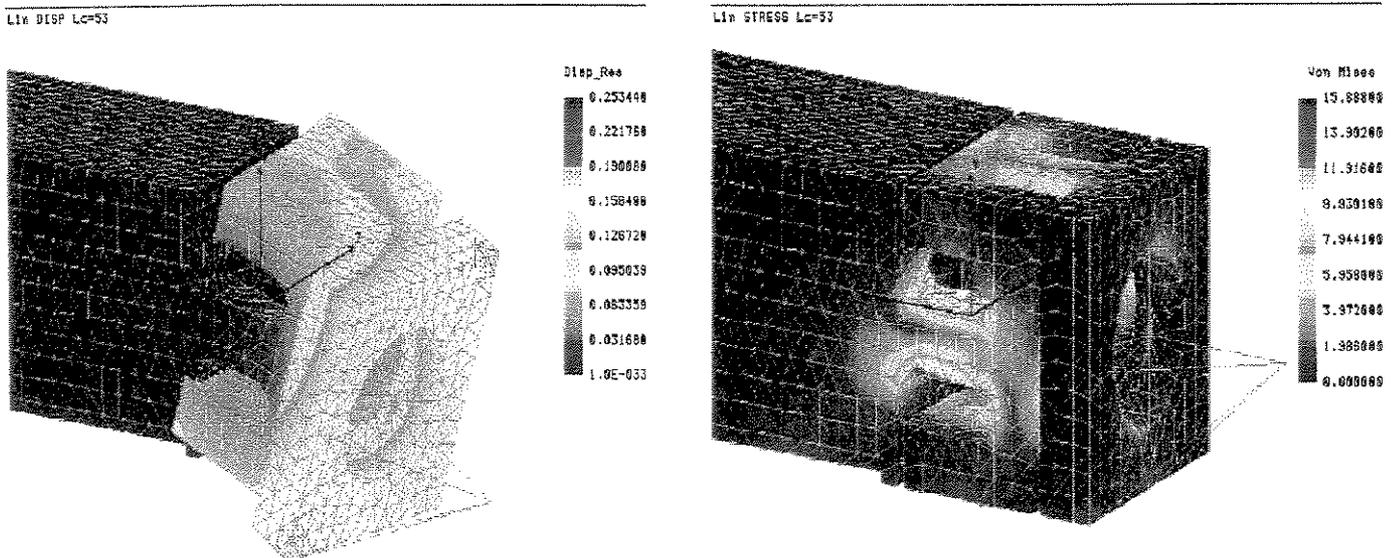


Fig. I.10 - Comportamento estrutural com aplicação de esforços de 97,5Kgf(F_c) e 75Kgf(F_a) respectivamente

4- Análise

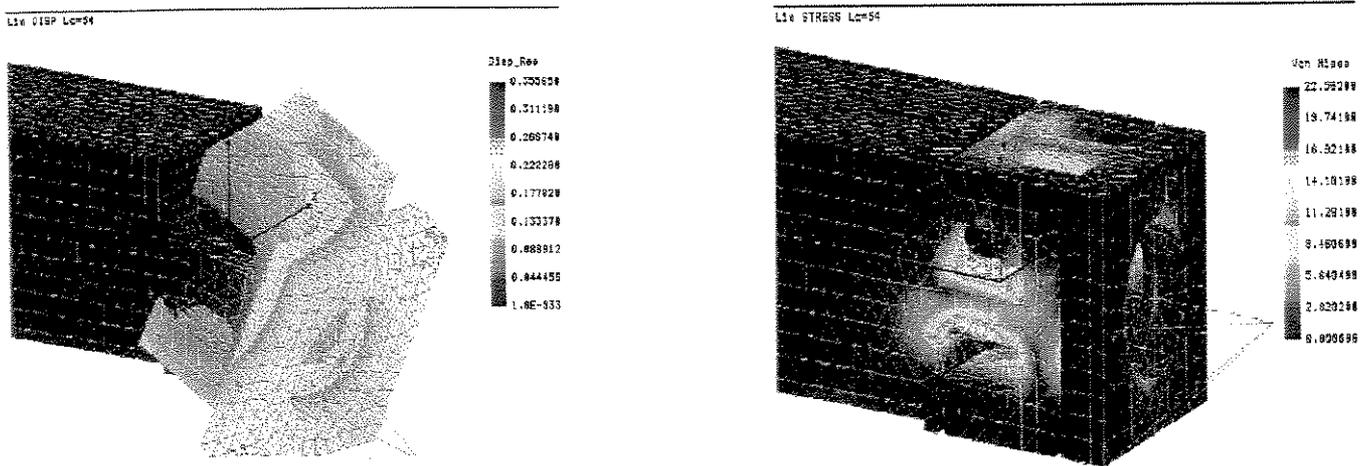


Fig. I.11 - Comportamento estrutural com aplicação de esforços de 130Kgf(F_c) e 100Kgf(F_a) respectivamente

A.8 - Calibração estática do dinamômetro

Após a fabricação e inspeção dimensional, o dinamômetro foi submetido à calibração, e desta forma avaliou-se os resultados obtidos e a sua performance, permitindo conhecer a resposta do mesmo em termos de rigidez e linearidade, confirmando sua capacidade em atender as especificações, as quais foi dimensionado. Usando um sistema estático com aplicação de cargas variando de (0 – 130)kgf, e usando uma cabeça para calibração substituindo a cabeça indexável, a qual permitiu a aplicação das cargas verticais e horizontais(ã simultâneas) simulando esforços de corte(F_c), e os esforços de avanço(F_f) conforme apresentado na Figura 4.12.

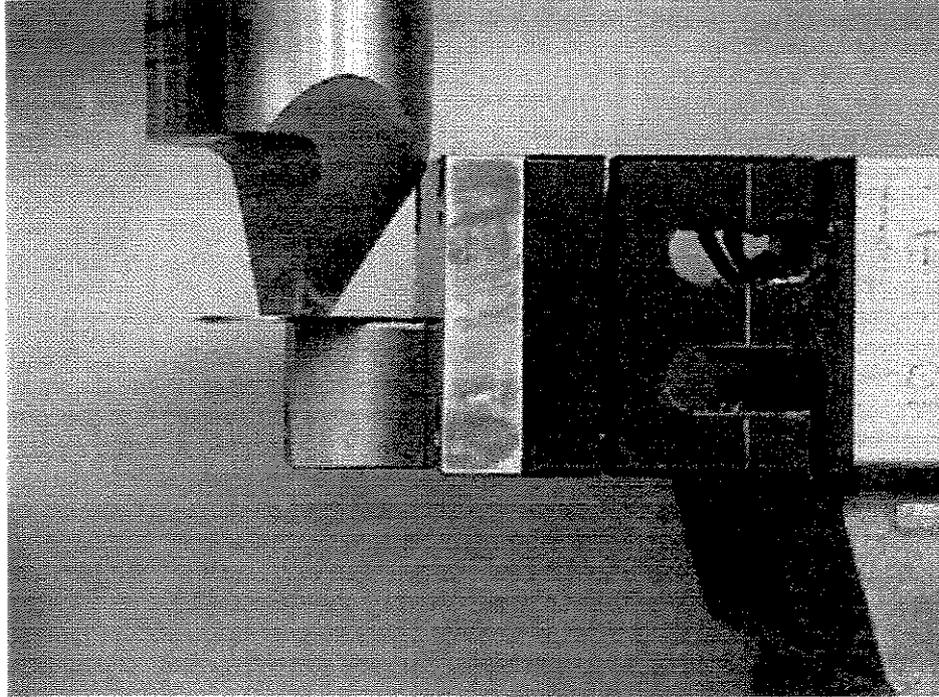


Fig.I.12 - Montagem do dinamômetro para ensaio de aplicação de cargas

As cargas aplicadas para calibração (F_c) foram escalonadas com espaçamento de 10 kgf, até o patamar de 130 kgf e retornando a zero, em seguida aplicação de carga total até 130 kgf, e retorno novamente ao zero. Na Figura 4.13 apresenta-se um dos gráficos, no qual é comprovado seu comportamento. Este procedimento foi repetido para aplicações de cargas (F_r), em seguida foram avaliados os resultados obtidos, definidas as constantes de conversão de μ e para newton (N), e o equipamento então foi considerado qualificado para uso.

Aplicação de Carga - Fase 01

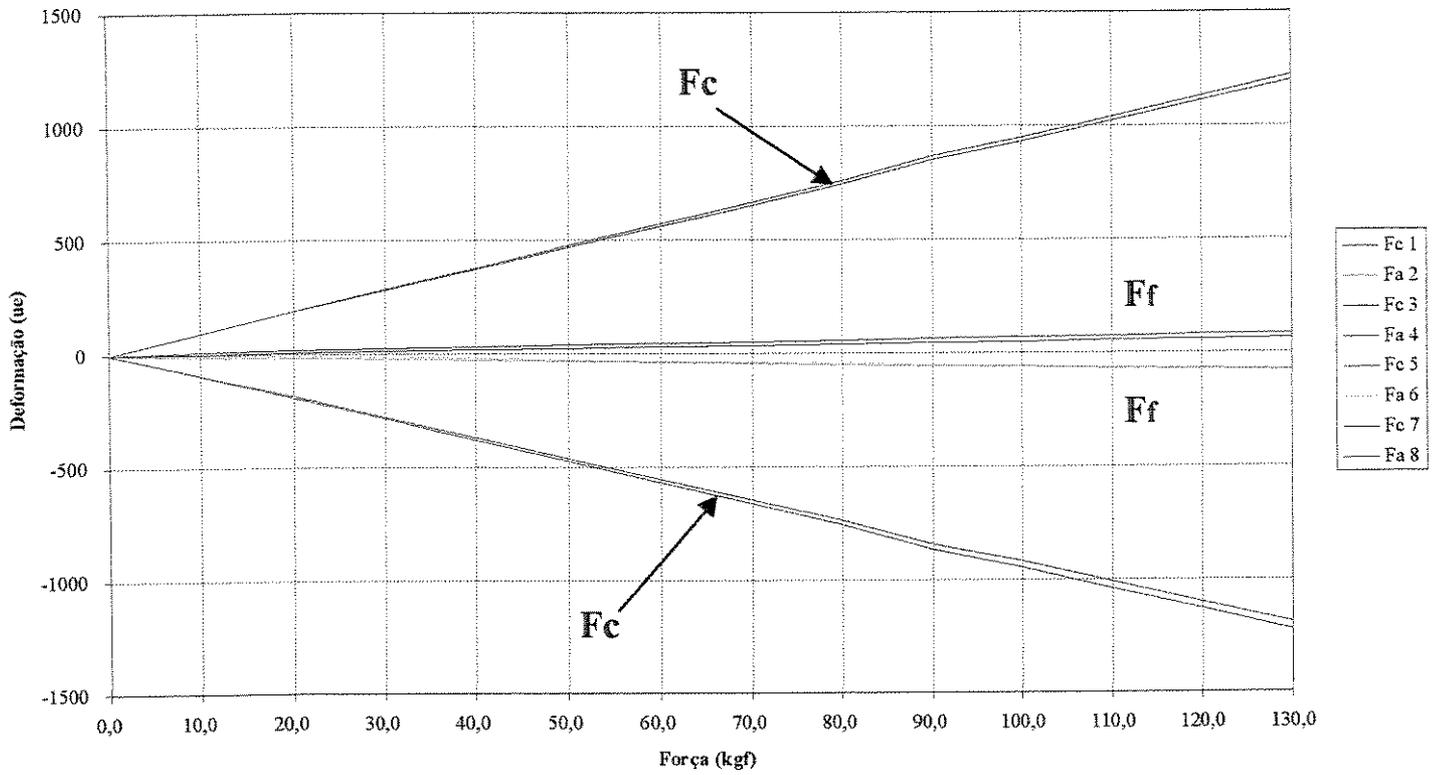


Figura I.13 – Gráfico ilustrando a linearidade do dinamômetro durante a calibração.