

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR João Roberto Ferreira  
E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 06 / 11 / 92

---

ORIENTADOR  
*Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini*  
Matric. 04418-1  
Dep. de Eng.º de Fabricação  
FEM/UNICAMP

CARACTERÍSTICAS DA USINAGEM DE UM COMPÓSITO  
DE RESINA FENÓLICA REFORÇADA COM FIBRAS DE  
VIDRO E CARBONO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Tese de: Mestrado


Título da tese: CARACTERÍSTICAS DA USINAGEM DE UM COMPÓSITO  
DE RESINA FENÓLICA REFORÇADA COM FIBRAS DE  
VIDRO E CARBONO.

Autor: João Roberto Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini†

Aprovado por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Frascino M. de Almeida

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Olívio Novaski

Campinas, 06 de novembro de 1.992.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

À minha esposa Regina, e a minha filha Vivian, pela  
compreensão e abdicação das horas de lazer.

À toda minha família, pela grande força em todos os  
momentos.

À Deus, pela presença constante.

Eu dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Ao DPR/IEM/EFEI, pelo empenho na formação de seu corpo docente.

Ao Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, mais que um orientador, um colega de trabalho.

Aos professores do DEF/UNICAMP, em particular ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pelas discussões sobre o trabalho.

Aos funcionários do DEF/UNICAMP, em particular aos Engs Felipe e Niderauer, aos técnicos Claudomiro e Aristides, e as secretárias Marília e Luciene, pelo suporte dado.

Aos colegas de Pós Graduação, pelo apoio humano e técnico.

Ao aluno Frederico Ueda, pelo auxílio dado na parte experimental.

Ao IAE/CTA, pelo apoio no fornecimento do material compósito, especialmente aos Engs. Adriano Gonçalves e Homero P. Silva.

À FINEP pelo apoio financeiro.

À DÍFER diamantes Industriais, pela doação de ferramentas.

À WINTER do Brasil, especialmente na pessoa do Eng. Roberto Barros, pelo auxílio dado no corte dos corpos de prova.

À SKF Ferramentas e à BRASIMET, pelo fornecimento e revestimento das brocas.

À SANDVIK do Brasil, pelo fornecimento de ferramentas.

# CARACTERÍSTICAS DA USINAGEM DE UM COMPÓSITO DE RESINA FENÓLICA REFORÇADA COM FIBRAS DE VIDRO E CARBONO

## RESUMO

Este trabalho consiste na realização de experimentos para analisar o comportamento de ferramentas de diversos materiais no torneamento de compósitos de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono, moldadas nas formas de laminados e bobinados. As ferramentas utilizadas foram: cerâmica pura ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$ ), cerâmica mista ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ ), SIALON ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Si}_3\text{N}_4$ ), cerâmica reforçada com whiskers ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}$ ), metal duro ISO K10, nitreto de boro cúbico (CBN), e diamante (PCD). Durante os ensaios foram observados os desgastes das ferramentas, a rugosidade superficial da peça, e a força de avanço, em função do comprimento (tempo) de corte, da velocidade de corte, e da orientação das fibras no compósito. Uma das mais importantes conclusões deste trabalho é que a rugosidade superficial do compósito aumenta de maneira progressiva com o desgaste da ferramenta, viabilizando somente o emprego da ferramenta de diamante em torneamento de acabamento. Em operação de desbaste o metal duro apresenta-se como a melhor solução, pois apesar de sofrer desgaste superior ao diamante é mais barato e dispensa cuidados operacionais especiais.

# MACHINING CHARACTERISTICS OF CARBON AND GLASS FIBER REINFORCED FENOLIC RESIN COMPOSITE

## ABSTRACT

Some experiments were carried out to study the performance of many different tool materials, like pure ceramic ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$ ), mixed ceramic ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ ), SIALON ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Si}_3\text{N}_4$ ), whiskers reinforced ceramic ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}$ ), cemented carbide ISO K10, cubic boron nitride (CBN), and diamond (PCD). They were tested in turning of carbon and glass fiber reinforced fenolic resin composite. Two different workpiece shapes were used, laminated plate and filament wound tube. During the experiments, tool wear, surface roughness, and machining forces behaviour were observed, under several cutting lengths (or cutting times), cutting speeds, and fiber directions in the composite. The experimental results showed that, due to the great influence of tool wear in workpiece surface roughness, only diamond tools are technically suitable to be used in finish turning. In rough turning, the cemented carbide tools proved to be the best solution. Although, it presented larger wear than diamond, the relationship cost and benefit showed to be much lower and, besides, it is not necessary special operational care.

## SIMBOLOGIA

- $a_p$  - Profundidade de corte [mm]  
 $\alpha$  - Ângulo de posição das fibras [graus]  
 $\alpha_0$  - Ângulo de folga da ferramenta [graus]  
 $\alpha_w$  - Ângulo de bobinamento do tubo [graus]  
 $b$  - Largura de corte [mm]  
 $C_{af}$  - Custo de afiação da ferramenta [\$]  
 $C_f$  - Custo da ferramenta [\$]  
 $C_{ft}$  - Custo da ferramenta por vida [%]  
 $C_p$  - Custo de usinagem por peça [\$]  
 $C_{pf}$  - Custo do porta-ferramenta [\$]  
 $\Delta l_f$  - Variação do comprimento de avanço [mm]  
 $E$  - Equivalente mecânico do calor [Kcal/min]  
 $\epsilon$  - Deformação [%]  
 $\epsilon'$  - Ângulo de ponta da ferramenta [graus]  
 $f$  - Avanço de corte [mm/rot]  
 $F_c$  - Força de corte [kgf]  
 $F_f$  - Força de avanço [kgf]  
 $F_p$  - Força passiva [kgf]  
 $\gamma_0$  - Ângulo de saída ortogonal da ferramenta [graus]  
 $h$  - Espessura de corte [mm]  
 $\lambda_s$  - Ângulo de inclinação da aresta da ferramenta [graus]  
 $l_c$  - Comprimento de corte [m]  
 $l_f$  - Comprimento de avanço [mm]  
 $n_1$  - Número de afiações da ferramenta  
 $n_2$  - Número de vidas da ferramenta

$n_3$  - Número de vidas do porta-ferramenta  
 $Q$  - Quantidade de calor gerado [Kcal/min]  
 $r$  - Raio de ponta da ferramenta [mm]  
 $\rho$  - Densidade [g/cm<sup>3</sup>]  
 $Ra$  - Rugosidade superficial média [ $\mu$ m]  
 $R_{m\acute{a}x}$  - Rugosidade superficial máxima [ $\mu$ m]  
 $Sh$  - Salário do operador [\$]  
 $Sm$  - Salário da máquina [\$]  
 $\sigma_t$  - Limite de resistência à tração [kgf/mm<sup>2</sup>]  
 $T$  - Vida da ferramenta [min]  
 $t_a$  - Tempo de aproximação e recuo da ferramenta [min]  
 $t_c$  - Tempo de corte [min]  
 $t_{ft}$  - Tempo de troca da ferramenta [min]  
 $t_i$  - Tempos improdutivos [min]  
 $t_p$  - Tempo de preparação da máquina [min]  
 $t_s$  - Tempos secundários [min]  
 $t_t$  - Tempo total de confecção por peça [min]  
 $V_c$  - Velocidade de corte [m/min]  
 $X$  - Ângulo de posição da aresta da ferramenta [graus]  
 $Z$  - Número de peças do lote.



## SIGLAS

AM - Alto Módulo de Elasticidade  
AR - Alta Resistência à Tração  
 $Al_2O_3$  - Óxido de Alumínio  
CBN - Nitreto de Boro Cúbico  
GE - General Eletric  
MD - Metal Duro  
PCD - Diamante Policristalino  
PRF - Plástico Reforçado com Fibra  
PRFV - Plástico Reforçado com Fibra de Vidro  
PRFC - Plástico Reforçado com Fibra de Carbono  
PRFK - Plástico Reforçado com Fibra de Kevlar  
 $Si_3N_4$  - Nitreto de Silício  
SiC - Carboneto de Silício  
TiC - Carboneto de Titânio  
TiN - Nitreto de Titânio  
 $ZrO_2$  - Óxido de Zircônio

# ÍNDICE

	PÁGINA
Dedicatória	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Simbologia e Siglas	v
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II	
MATERIAIS COMPÓSITOS E SUAS PROPRIEDADES .....	3
2.1 - Generalidades .....	3
2.2 - Tipos de Materiais Compósitos .....	4
2.3 - Principais Tipos de Reforços .....	6
2.4 - Principais Matrizes Poliméricas .....	18
2.5 - Processos de Fabricação de Materiais Compósitos .	24
2.6 - Propriedades dos Materiais Compósitos .....	31
CAPÍTULO III	
USINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS .....	36
3.1 - Introdução .....	36
3.2 - Furação de Materiais Compósitos .....	37
3.3 - Ensaio em Corte Ortogonal .....	43
3.4 - Mecanismo de Corte em Compósito	
Reforçado com Fibra de Vidro .....	50

3.5 - Torneamento de Materiais Compósitos .....	58
3.6 - Outros Processos de Usinagem de Materiais Compósitos .....	65
 CAPÍTULO IV	
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	71
4.1 - Materiais .....	71
4.2 - Ferramentas e Dispositivos .....	77
4.3 - Equipamentos e Instrumentos .....	80
4.4 - Métodos Experimentais .....	81
 CAPÍTULO V	
RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	88
5.1 - Torneamento do Compósito de Tecido Bobinado .....	88
5.2 - Furação do Compósito de Tecido Laminado .....	102
5.3 - Torneamento do Compósito de Tecido Laminado .....	105
5.4 - Influência da Disposição das Fibras no desgaste das Ferramentas .....	116
5.5 - Viabilidade Técnica-Econômica para Escolha da Ferramenta .....	119
 CAPÍTULO VI	
CONCLUSÕES .....	124
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	126

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	127
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....	131
ANEXO I	
RELAÇÃO DE FIGURAS .....	133
RELAÇÃO DE TABELAS .....	138
ANEXO II	
TABELAS DE DADOS DOS EXPERIMENTOS .....	140

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

O emprego de materiais compósitos à base de plásticos reforçados com fibras tem crescido notavelmente nos últimos anos, especialmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, e automobilística. A sua alta resistência específica permite substituir peças de materiais metálicos com propriedades mecânicas similares, mas deixando-as consideravelmente mais leves. Como consequência do aumento e da diversificação do emprego dos materiais compósitos, cresce cada vez mais a necessidade de usiná-los, para satisfazer as exigências com relação à precisão dimensional e à qualidade superficial dos componentes.

Os plásticos reforçados com fibras são moldados, e a massa mais importante de sua aplicação até nossos dias é na forma de placas, lâminas, e chapas. Nelas incide principalmente operações de corte e furação. Pouco encontra-se em pesquisa e desenvolvimento, relatado ou publicado sobre outras operações como: torneamento, fresamento, retificação, e etc. O objetivo geral deste trabalho é contribuir para aplicações alternativas dos plásticos reforçados com fibras, na fabricação de peças e componentes com geometrias diversas, diferentes das acima citadas.

Considerandos estes aspectos, o trabalho apresenta um estudo das características de usinabilidade de um compósito de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono, confeccionados nas formas de placas laminadas e tubos bobinados.

Depois de uma breve revisão sobre as propriedades dos materiais compósitos e seu processamento por usinagem, este trabalho apresenta o estudo do comportamento de diversos materiais de ferramentas como: cerâmica pura ( $Al_2O_3+Zr_2O_3$ ), cerâmica mista ( $Al_2O_3+TiC$ ), SIALON ( $Al_2O_3+Si_3N_4$ ), cerâmica reforçada com whiskers ( $Al_2O_3+SiC$ ), metal duro ISO K10, nitreto de boro cúbico (CBN), e diamante (PCD), em operação de torneamento.

A evolução do desgaste das ferramentas, da rugosidade superficial da peça, e da força de avanço, serão avaliadas em relação à variação da velocidade de corte e ao comprimento (tempo) de corte usinado. Num estágio de preparação dos corpos de prova de tecido laminado, será realizado um ensaio de furação comparando o desempenho de duas brocas de aço rápido com e sem cobertura de nitreto de titânio. Na operação de torneamento deste compósito será estudado a influência da orientação das fibras na rugosidade superficial da peça e no desgaste das ferramentas, comparando a sua abrasividade com a do compósito de tecido bobinado.

De posse dos resultados obtidos, apresenta-se neste trabalho a escolha da melhor ferramenta para a operação de torneamento de desbaste e acabamento do compósito, baseando-se num estudo de viabilidade técnica e econômica do processo de usinagem.

O trabalho está dividido em seis capítulos, quais sejam:

- Capítulo 1 - Introdução;
- Capítulo 2 - Materiais Compósitos e suas Propriedades;
- Capítulo 3 - Usinagem de Materiais Compósitos;
- Capítulo 4 - Procedimentos Experimentais;
- Capítulo 5 - Resultados e Discussões;
- Capítulo 6 - Conclusões.

## CAPÍTULO II

### MATERIAIS COMPÓSITOS E SUAS PROPRIEDADES

#### 2.1 - GENERALIDADES

Desde a sua criação o homem tem se utilizado de materiais para garantir a sua sobrevivência e seu conforto. No início foram utilizados os materiais disponíveis, tais como: pedra, barro, madeira, ossos, e etc.

A curiosidade e a inteligência humana possibilitaram a transformação de matérias primas naturais em materiais sintéticos, que passaram a suprir as necessidades desejadas. O processo de seleção de materiais para determinadas aplicações envolve um compromisso entre as propriedades desejadas, e as características específicas dos materiais disponíveis. A medida que as aplicações tornam-se mais sofisticadas, fica mais difícil um único material satisfazer todas as expectativas. Este dilema levou o homem a conjugar diferentes materiais, através de suas propriedades, para alcançar as características finais desejadas.

Embora o processo de conjugação de materiais com diferentes características químicas tenha entrado em evidência tecnológica na metade do século XX, este tipo de alternativa já era utilizado desde os primórdios da humanidade, quando do uso de vegetais fibrosos no barro para confecção de tijolos [1].

Os materiais compósitos ou conjugados para aplicações mais sofisticadas, só apareceram em larga escala com o advento da produção comercial de algumas resinas plásticas. A partir de 1940,

após o desenvolvimento da fabricação de fibras de vidro, o uso de materiais compósitos teve um grande impulso e deu origem a atual era dos materiais compósitos avançados. Tendo hoje uma importante aplicação dentro da engenharia, principalmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística, naval, e eletro-eletrônica [2].

## 2.2 - TIPOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Os vários tipos de materiais compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes, e com a geometria ou forma das fases presentes. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Componentes na forma de fibras longas ou curtas, laminados, partículas, podem ser incorporados proporcionando diferentes estruturas aos compósitos [3].

Os materiais têm sido convencionalmente classificados de acordo com sua natureza química e física em: cerâmicos; metálicos; e poliméricos [2]. Os materiais cerâmicos tem como características principais a elevada resistência ao calor e sua extrema fragilidade, sua estrutura pode ser constituída de ligações iônicas e covalentes. As cerâmicas constituídas de óxidos possuem em sua grande maioria ligações iônicas. As fibras de vidro, fibras cerâmicas, são alguns dos componentes de materiais compósitos fabricados a partir desta classe de cerâmicas. As cerâmicas constituídas de ligações covalentes são chamadas de cerâmicas covalentes. Os principais exemplos são: fibras de carbono; fibras



de grafita; carbeto de silício; nitreto de boro; e nitreto de titânio. Esta classe de cerâmica destaca-se pela sua elevada resistência mecânica à elevadas temperaturas [2].

Os materiais metálicos apresentam como características gerais, excelentes ductilidades e condutividades térmica e elétrica. Os átomos estão unidos em sua estrutura através de ligações metálicas, caracterizadas pela existência de elétrons livres. Metais como tungstênio, cromo, e ligas de alumínio e titânio, são os principais exemplos de aplicações em compósitos. A grande limitação do uso de metais em compósitos é a sua elevada densidade, pois restringe seu uso em grandes estruturas aeronáuticas e aeroespaciais [1].

Os materiais poliméricos destacam-se pela sua baixa densidade e fácil conformação, além da elevada resistividade elétrica. Sua estrutura é constituída de macromoléculas formadas à partir de ligações covalentes e coesas entre si por fracas interações intermoleculares. Esta última característica estrutural limita a temperatura de uso dos polímeros, comparando-se com os outros tipos de materiais. Na maioria das aplicações em forma de compósitos os polímeros atuam como matriz aglomerante do reforço. Assim as resinas termofixas como: poliéster insaturado, epóxi, fenólica, servem como matrizes para materiais compósitos reforçados com fibras de vidro e fibras de carbono. Uma exceção é a fibra de kevlar, que embora polimérica, é utilizada como reforço em matrizes poliméricas [4].

Os materiais compósitos geralmente tem sua composição constituída pela combinação de materiais: cerâmicos e poliméricos; cerâmicos e metálicos; poliméricos e metálicos; e, cerâmicos;

metálicos; e poliméricos. As possíveis combinações na estruturação dos compósitos, dependem de suas propriedades desejadas . O uso de materiais poliméricos em compósitos é quase que estritamente em função de sua leveza e sua fácil conformação. Assim, resinas poliméricas são usadas para aglomerar e estruturar compósitos de fibras de alta resistência mecânica. As fibras podem ser fabricadas a partir de materiais cerâmicos como o vidro e o carbono, ou de materiais metálicos como o aço, o tungstênio revestido com boro, e etc [2].

O componente de reforço no compósito pode estar na forma particulada, na forma de laminado, ou de fibras. O maior volume de aplicação de reforços em compósitos avançados envolve fibras, filamentos ou monofilamentos. O aspecto unidirecional da fibra permite a fabricação da estrutura do compósito através das facilidades têxteis que as fibras podem ser submetidas, como tecidos, mantas, fios, e etc. A maior parte dos compósitos apresenta uma matriz contínua que aglomera o reforço fibroso [5].

## 2.3 - PRINCIPAIS TIPOS DE REFORÇOS

### 2.3.1 - INTRODUÇÃO

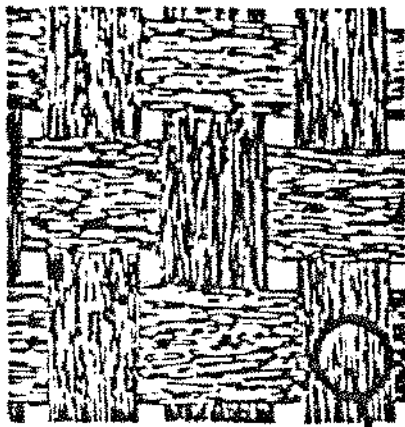
Os reforços são denominados como constituintes, que de uma maneira ou de outra, modificam determinadas propriedades da matriz polimérica. Desde simples composições minerais que são incorporadas aos polímeros, até fibras de ultra resistência, podem ser considerados reforços. As fibras pela sua característica

unidirecional incrementam acentuadamente a maior parte das propriedades mecânicas em determinadas direções [6].

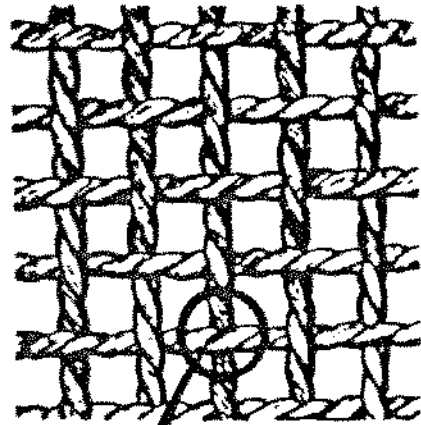
Os reforços podem ser classificados de acordo com sua natureza e suas características geométricas. Quanto a natureza os reforços podem ser: extremamente duros para promover aumento à dureza e a resistência à abrasão; resistente à ruptura para proporcionar elevada resistência à tração, à flexão, e ao cisalhamento; rígidos para incrementar o módulo de elasticidade; extremamente tenaz para aumentar a resistência ao impacto; e, resistente termicamente para aumentar a estabilidade térmica. Ambos os reforços são envolvidos por uma matriz polimérica contínua. Enquanto que os reforços fibrosos e laminados apresentam o reforço como uma fase contínua e anisotrópica, os reforços particulados proporcionam fase descontínuas e isotrópicas [2,3]. As formas de reforços mais utilizadas nas indústrias aeronáutica e aeroespacial são mostradas na figura 2.1.

Quanto à natureza, os reforços particulados podem ser classificados como: naturais; artificiais; e sintéticos. Os naturais são beneficiados à partir da natureza e geralmente são minerais. Dentre eles destacam-se: quartzo; talco; alumina; argila; e etc. Os artificiais são aqueles obtidos a partir de modificações dos naturais. O principal exemplo é o carbonato de cálcio precipitado. Os sintéticos incluem desde elastômeros sintéticos até esferas de vidro ocas [2].

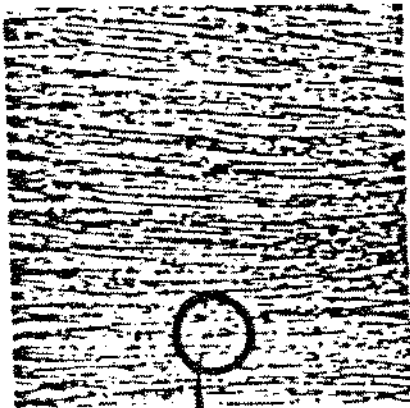
Assim como os reforços particulados, as fibras podem ser classificadas quanto a sua natureza em: naturais; artificiais; e sintéticas. Dentre as fibras naturais, destacam-se: as fibras de juta, fibras de madeira, e etc. As fibras sintéticas por sua vez



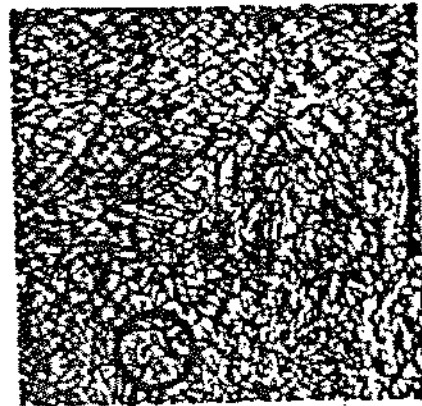
TECIDO



TECIDO DE FIO TORCIDO



MECHAS



FIBRA PICADA

Figura 2.1- Principais formas de reforço [4].

são as mais utilizadas para reforços de matrizes poliméricas. Destacam-se: as fibras de vidro; as fibras de carbono e grafita que apresentam excelentes propriedades mecânicas aliadas ao baixo peso; as poliméricas obtidas a partir de poliamidas aromáticas (kevlar); e, as fibras curtas obtidas através de whiskers de carbeto de silício [2].

Os reforços fibrosos mais utilizados nas indústrias aeronáuticas e aeroespaciais são: as fibras de carbono, fibras de vidro, e fibras de kevlar, que a seguir serão descritas detalhadamente [1,5].

### 2.3.2 - FIBRA DE VIDRO

As fibras de vidro são muito aplicadas em reforço de resinas termofixas. As fibras longas e/ou contínuas proporcionam os maiores valores de resistência mecânica. As fibras de vidro são fabricadas a partir de uma composição de óxidos que quando fundidos, proporciona a formação do vidro. Os principais constituintes do vidro são: sílica ( $\text{SiO}_2$ ); alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ); óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ); óxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ); óxido de sódio e de potássio ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ); e, outros componentes em menor quantidade. Dependendo da presença e da concentração pode-se fabricar fibras com maior ou menor resistência.

O primeiro vidro desenvolvido especialmente para a produção de fibras contínuas, foi o vidro E. Este vidro passou a ser padrão para vários tipos de aplicações. O vidro E não tem uma composição única, mas sim várias composições dependendo da concentração de

seus constituintes, como pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição do vidro E [7].

Constituintes	Faixa de Composição ( % em peso )
$\text{SiO}_2$	52-56
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12-16
CaO	16-25
$\text{B}_2\text{O}_3$	5-10
MgO	0-6
$\text{Na}_2\text{O}$ e $\text{K}_2\text{O}$	0-3
Outros	0-1

Com a evolução da fibra de vidro, outras fórmulas foram desenvolvidas visando aumentar algumas propriedades mecânicas. Foi então desenvolvido o vidro S, cuja inicial é designada pela sua elevada resistência sob tração, 33% superior à do vidro E. Suas aplicações são voltadas para o setor aeroespacial na fabricação de peças de elevado desempenho. Sua composição típica é: 65% de  $\text{SiO}_2$ ; 25% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; e 10% de MgO; além das minoritárias impurezas. Composições especiais de vidro para aplicações no setor eletro-eletrônico foram desenvolvidos e designados como vidro D. Estas fibras destacam-se pela menor densidade e, principalmente, pela menor constante dielétrica [2]. A tabela 2.2 mostra uma comparação de propriedades para os três tipos de vidros apresentados na forma de fibras. Uma das grandes deficiências das fibras de vidro é seu baixo módulo de elasticidade, quando

comparado com as fibras de carbono e fibras de boro. Assim, vários desenvolvimentos de fibra de vidro foram e são utilizados para aumentar seu módulo de elasticidade [2].

Tabela 2.2- Propriedades típicas dos vidros E, S, e D [2].

VIDRO	Resistência Tração (MPa)	Módulo Elast. (GPa)	Alongamento (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. Amolecimento (°C)
E	3450	72,4	4,8	2,54	824
S	4600	93,1	5,4	2,49	970
D	2410	—	4,7	2,16	771

As fibras de vidro podem ser encontradas sob várias formas para aplicação. Uma das formas mais convencionais é a fibra constituída de filamentos contínuos contendo diâmetros variando de 0,003 a 0,02 mm. Os filamentos contínuos podem ser aglomerados paralelamente uns aos outros formando as mechas. Os aglomerados de filamentos podem ser torcidos formando os fios. Tanto as mechas como os fios podem ser utilizados para a fabricação de tecidos (Figura 2.1) [1].

A fibra de vidro é largamente utilizada na confecção de peças onde não há grande responsabilidade estrutural, porém onde há esforço e compressão, como na fabricação de dutos e canaletas. As principais características da fibra de vidro em comparação com as demais fibras aplicadas na indústria aeronáutica são: baixo custo; baixa rigidez; alta densidade; alta durabilidade; baixa resistência específica; melhor usinabilidade que o carbono; e etc [6].

### 2.3.3 - FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono foram usadas em 1880 como filamento de lâmpada elétrica. Entretanto durante a década de 1960 sua utilização passou a ser muito importante como reforço em compósitos estruturais. O interesse pelas fibras de carbono como reforço mecânico, aconteceu em função de sua elevadíssima resistência mecânica [7].

O princípio de fabricação das fibras de carbono utiliza um precursor orgânico, geralmente fibras de celulose (RAYON) ou de poliácridonitrila (PAN), que é controladamente carbonizado passando a ter uma estrutura grafítica (Figura 2.2). A transformação da cadeia puramente carbônica ocorre através da pirólise, inicialmente à 700°C e posteriormente entre 1400°C e 1700°C, resultando num conteúdo de 95 a 99% de carbono. Se a pirólise prosseguir à 2200°C uma fibra com estrutura completamente grafítica será obtida [2].

Embora os nomes "carbono" e "grafita" sejam indistintamente usados, para indentificar as fibras constituídas de átomos de carbono unidos covalentemente, existe uma diferença entre fibras de carbono e fibras de grafita. Tipicamente as fibras de carbono com precursor PAN possuem de 93 a 95% de carbono em sua constituição, enquanto que fibras de grafita possuem acima de 99%. A diferença básica é a temperatura na qual as fibras são fabricadas ou tratadas termicamente. As fibras de carbono baseadas em PAN são produzidas à cerca de 1315°C, enquanto que as fibras de grafita de elevado módulo de elasticidade são grafitizadas entre 1900°C e 3000°C [2].



As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência, e alta rigidez. Somente três materiais precursores são utilizados comercialmente: RAYON; PAN; e o piche de asfalto. A primeira geração de fibras de carbono foi baseada no RAYON como precursor. A segunda geração de fibras de carbono foi baseada em PAN como precursor. Sua aplicação comercial cresceu em função da combinação de custos relativamente baixos e boas propriedades físicas. Na sua forma mais comum, estas fibras tem uma resistência mecânica variando entre 2400 e 3300 MPA, um módulo de elasticidade entre 230 e 400 GPA, e uma resistência ao cisalhamento entre 90 e 117 MPA [7].

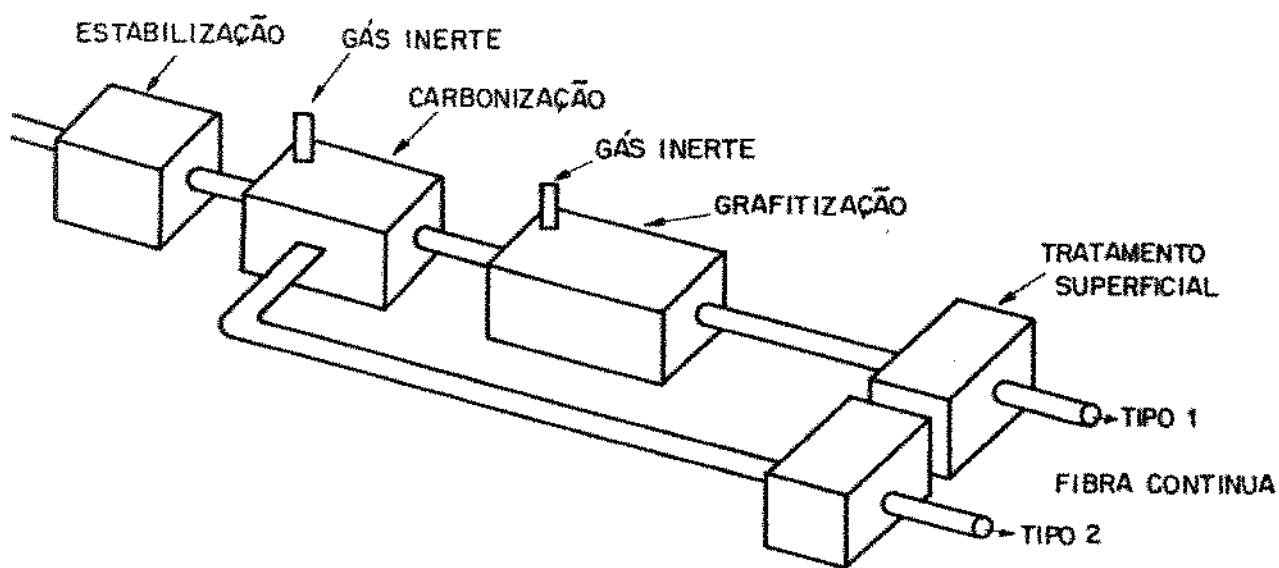


Figura 2.2- Esquema representativo da fabricação de fibras de carbono a partir de fibras precursoras [2].

As fibras de carbono PAN são encontradas comercialmente na forma de fios e mechas contendo milhares de filamentos. Na sua forma contínua as fibras de carbono são utilizadas em processos de

moldagem como: impregnação manual; bobinamento de fibras "filament winding"; câmara de vácuo; câmara de pressão; e etc. As fibras de carbono podem ser encontradas na forma picada "chopped" para moldagem por compressão e injeção. Na forma de tecidos, as fibras de carbono são encontradas puras e pré-impregnadas. A terceira e a mais recente geração de fibras de carbono é baseada em piche como precursor. As fibras fiadas a partir do piche tem pouca ou nenhuma orientação preferencial e, portanto, possuem baixa resistência e módulo de elasticidade. Por outro lado, o piche é um precursor de menor custo, comparado ao RAYON e o PAN [7].

#### 2.3.4 - FIBRA DE KEVLAR

Durante a década de 1970 a Du Pont lançou comercialmente uma fibra orgânica de elevada resistência específica sob tração. Esta fibra passou a ser conhecida pelo nome comercial de KEVLAR. Esta fibra consiste de uma poliamida aromática extrudada e fiada sob condições especiais. A baixa densidade, a elevada resistência à tração, e o baixo custo relativo destas fibras, produzem estruturas tenazes e com elevada resistência ao impacto. Seu módulo de elasticidade é cerca da metade da fibra de carbono [4].

Existem basicamente dois tipos de kevlar: kevlar 29 e kevlar 49. O primeiro foi projetado para proteção balística, cordas, cabos, e tecidos recobertos para peças infláveis. O segundo é mais usado em compósitos na forma pura ou pré-impregnada. A tenacidade dos compósitos fibrosos a partir do kevlar 49 é bastante superior àqueles fabricados a partir das

fibras de boro e carbono. Uma comparação entre resistência específica e o módulo específico da fibra de kevlar com as outras fibras pode ser observada na Figura 2.3 [1].

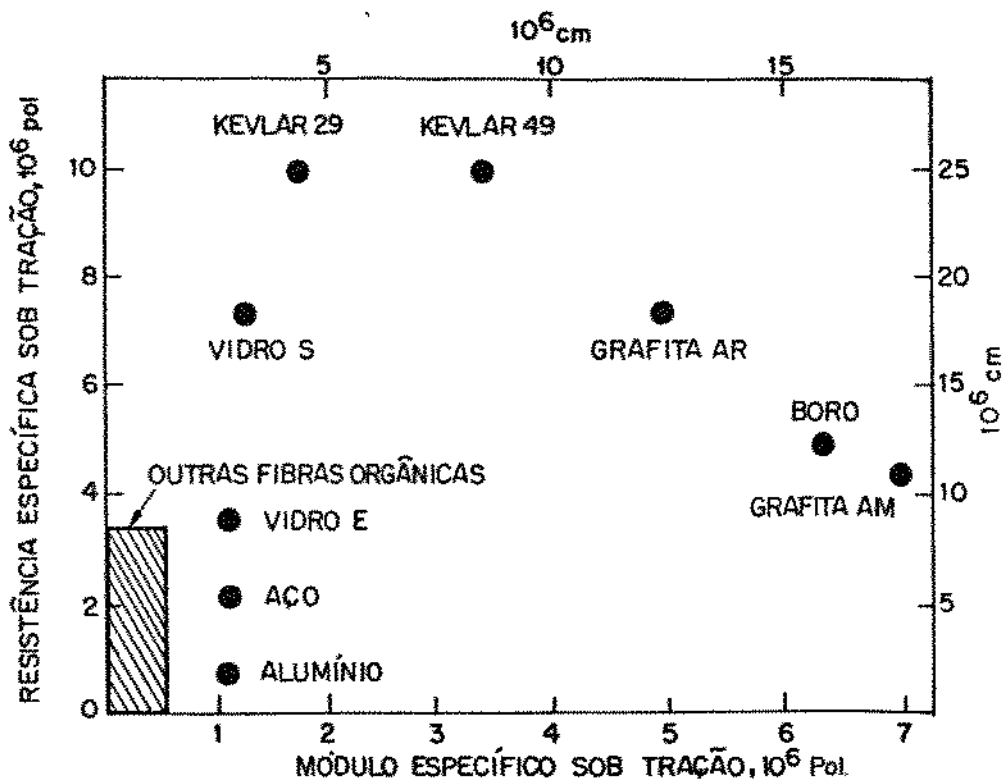


Figura 2.3 - Comparação da resistência específica e do módulo específico para várias fibras [1].

As fibras de kevlar podem ser processadas pelos mesmos métodos que as fibras de vidro e carbono utilizam-se para produzir compósitos. Moldagem em câmara de vácuo de pré-impregnados, é o mais frequentemente utilizado na indústria de aeronaves. Um exemplo de aplicação de compósitos à base de kevlar, é na fabricação de vasos de pressão de alto desempenho, confeccionados através do processo de bobinamento de fibras "filament winding" [2].

### 2.3.5 - FIBRA DE BORO

As fibras de boro tem sido utilizadas como reforço em matrizes poliméricas para aplicações sofisticadas. Suas características de fabricação são completamente diferentes dos processos convencionais. Na realidade a fibra não é unicamente constituída de boro, a fibra por si, é um sistema conjugado com boro envolvendo filamentos metálicos de elevada resistência mecânica. Em suma a fibra de boro consiste em envolver um filamento metálico, geralmente tungstênio, depositado através de um processo denominado deposição química de vapor [2].

A fibra de boro embora apresente elevada resistência mecânica sob tração, atingindo 2758 MPA para uma espessura de 0,1 mm, sua densidade de  $2,75 \text{ g/cm}^3$  é superior as outras fibras, e seu custo elevado é superior à fibra de carbono. O módulo de elasticidade de uma maneira geral é em torno de 400 GPA, independente do diâmetro da fibra. Na temperatura ambiente a fibra de boro é relativamente inerte, à elevadas temperaturas o boro reage com a maioria dos metais, como: ferro; cobalto; níquel; alumínio; e etc [1].

### 2.3.6 - REFORÇOS HÍBRIDOS

O uso de mais de um tipo de fibra em compósitos gera sistemas híbridos. Assim, os compósitos híbridos que combinam dois ou mais tipos diferentes de fibras numa matriz comum, expandem a faixa de propriedades que podem ser alcançadas com compósitos

avançados. Geralmente os compósitos híbridos favorecem à redução de custo, principalmente quando um dos tipos de fibras tem custo muito elevado, como por exemplo a fibra de carbono. As combinações no geral incluem fibras contínuas ou picadas, de vidro, carbono, kevlar ou boro, em matrizes termofixas ou termoplásticas. A hibridização do compósito visa atender as exigências do projeto [1].

A tabela 2.3 ilustra o desempenho de compósitos com matriz polimérica. Destaca-se que no sistema apresentado o custo da fibra de vidro é bastante inferior ao da fibra de carbono. Aumentando-se a proporção de fibra de carbono em relação à fibra de vidro observa-se uma melhoria na maior parte das propriedades mecânicas.

Tabela 2.3- Propriedades de compósitos híbridos constituídos de fibras de carbono e vidro em matriz de poliéster [2].

CARBONO/ VIDRO (%)	Resistên- cia Tra- ção (MPa)	Módulo de Elast.Tra- ção (GPa)	Resistên- cia Fle- xão (MPa)	Módulo de Elast.Fle- xão (GPa)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
0/100	605	40	945	35,4	1,99
25/75	641	63,9	1062	63,4	1,88
50/50	690	89,6	1220	78,6	1,80
75/25	807	123	1262	112,0	1,66

A combinação de fibras de carbono com fibras de vidro é uma excelente mistura. O vidro é menos dispendioso e tem de 1/3 a 1/6 do módulo de elasticidade das fibras de carbono. Por sua vez,

melhoram o desempenho à fadiga, aumentam a condutividade térmica, e a usinabilidade [2,4,6]. O reforço utilizado na parte experimental deste trabalho é um tecido híbrido de fibras de vidro e carbono com especificação no item 4.1.

## 2.4 - PRINCIPAIS MATRIZES POLIMÉRICAS

### 2.4.1 - INTRODUÇÃO

A principal função da matriz é dispersar ou aglomerar os esforços, e quando submetida a uma tensão deve deformar o necessário a fim de distribuir e transferir as tensões para o componente de reforço. A escolha de uma matriz para uma aplicação estrutural, deve ser limitada inicialmente ao nível de deformação que ela sofre em relação ao reforço. Quando submetida à uma solicitação, a deformação da matriz deve ser compatível com a deformação máxima do reforço [2].

As matrizes são constituídas na maioria das vezes de materiais termofixos e termoplásticos. As matrizes termofixas são materiais poliméricos que apresentam boa estabilidade quando aquecida. Para os compósitos avançados a maior parte das matrizes poliméricas são à base de resinas termofixas, destacando-se as resinas epóxi, poliéster, e fenólica [5].

As matrizes poliméricas termoplásticas embora reduzam o custo de fabricação do compósito, não tem sido usadas em compósitos avançados, pois tem como limite a temperatura de uso. As resinas termoplásticas amolecem sob ação do calor e sofrem

degradação térmica à elevadas temperaturas, entretanto, existe uma grande ênfase de estudos no sentido de aumentar sua resistência térmica [3].

#### 2.4.2 - RESINA POLIÉSTER

As resinas poliéster usadas para plásticos reforçados são geralmente preparadas pela reação de ácidos dibásicos insaturados com glicóis, seguido de um sistema de cura que é uma etapa fundamental para que a matriz termofixa seja formada. A resina poliéster pode proporcionar diferentes graus de flexibilidade, dureza, e tenacidade à matriz do compósito. As resinas de poliéster depois de curadas, apresentam boas propriedades elétricas e oferecem boa resistência à corrosão, e à ataques químicos. Por outro lado, a resina pura é relativamente fraca e quebradiça [7].

O reforço mais usado em matrizes de poliéster é a fibra de vidro, podendo ser moldados nos mais diferentes métodos de fabricação de compósitos. A maior parte das resinas de poliéster depois de curadas, poderão ser submetidas continuamente à temperaturas de 150°C, e intermitente à 175°C por períodos de até 10 minutos, sem perder sua resistência mecânica [2].

#### 2.4.3 - RESINA EPÓXI

As resinas epóxi são formadas através de duas reações.

Primeiro, um polímero linear é obtido pela reação entre epíclorohidrina com um di-alcool. Após sua incorporação nas fibras é realizada a segunda reação, ou seja, de cura, com o auxílio de um agente conhecido como endurecedor. O processo de cura ocorre através da presença de substâncias químicas, que reagem com os grupos epóxi e hidroxilas entre as cadeias adjacentes. Quantidades significativas entre 10 e 15 % em peso, são necessárias de agentes de cura, tais como, aminas ou ácidos anídros. Estes agentes de cura passam a fazer parte da estrutura após a cura. Portanto, o tipo e a quantidade do agente de cura contribui decisivamente para propriedades da resina epóxi curada [7].

As resinas epóxi possuem importantes propriedades que à destacam entre as resinas termofixas. As resinas epóxi exibem as seguintes características [2]:

- Grande variedade de formas como a resina é encontrada, ou seja, desde baixas viscosidades até sólidos de alto ponto de fusão, favorecendo qualquer forma de aplicação;
- Dependendo do tipo de endurecedor as resinas podem ser curadas rapidamente ou lentamente em qualquer temperatura entre 5 a 180°C, apresentando em trabalho estabilidade térmica até a temperatura de 250 °C;
- As resinas epóxi, depois de curadas, são tenazes devido as características únicas de sua estrutura molecular, exibindo elevadas propriedades mecânicas devido à sua baixa contração e estrutura resultante não tensionada;
- As resinas epóxi possuem excelente estabilidade dimensional;
- As resinas epóxi absorvem baixa quantidade de água, que pode ser prejudicial à elevadas temperaturas;



- O processo de cura das resinas epóxi é geralmente mais complexo do que para a resina poliéster. A cura é realizada em etapas variando tempo e temperatura. O aumento da temperatura de cura diminui a resistência à tração e o módulo de elasticidade da resina.

#### 2.4.4 - RESINA FENÓLICA

A resina fenólica é uma das matrizes poliméricas mais importantes em volume de aplicação. Sua principal desvantagem perante as resinas de poliéster e epóxi é que durante a cura ocorre a evolução de água como subproduto. Portanto, sua aplicação em compósitos é mais complexa, pois a retirada de água passa a ser um importante fator durante o processo de fabricação. O principal prejuízo é o tempo necessário para a retirada de água, estendendo o ciclo de cura [1].

As resinas fenólicas são obtidas a partir da condensação de fenóis ( $C_6H_5OH$ ), e aldeídos do tipo formaldeído (HCHO). A natureza química do fenol e do aldeído utilizado, o tipo e a quantidade de catalizador, o tempo e a temperatura de reação influenciam diretamente as características da resina fenólica obtida. Um dos principais parâmetros de controle da fabricação da resina é a razão entre as quantidades de fenol e de formaldeído. A reação de fenol e formaldeído proporciona um pré-polímero que é usado para impregnar os reforços. São oferecidos comercialmente em forma de pó, incorporados com fibras ou em tecidos impregnados. Em função da liberação de vapor de água, as pressões de moldagens são mais

elevadas que as das outras resinas a fim de eliminar bolhas [2].

As resinas fenólicas são encontradas sob duas formas: resina RESOL, ou de um estágio, onde existe um excesso de formaldeído sobre a quantidade de fenol; e resina NOVALACA, ou de dois estágios, onde existe um excesso de fenol sobre a quantidade de formaldeído. Sendo que, as resinas fenólicas do tipo Novalaca apresentam melhores características para o processo de impregnação [2].

Em geral, as resinas fenólicas não são atacadas pela maioria dos solventes orgânicos, ácidos fracos, e bases. As resinas fenólicas são baixas condutoras de calor, e a resina pura possui uma condutibilidade térmica da ordem de  $4 \times 10^{-4} \text{ Cal/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Em razão de suas características térmicas atraentes, as resinas fenólicas tem sido usadas como barreira térmica em mísseis e aeronaves supersônicas [1].

Os compósitos que utilizam resina fenólica apresentam elevada resistência e excelente desempenho à elevadas temperaturas de serviço. As resinas fenólicas suportam temperatura de  $250^\circ\text{C}$  por várias centenas de horas sem perder a resistência mecânica. A tabela 2.4 ilustra o desempenho de uma resina fenólica reforçada com tecido de fibra de vidro.

Pode-se observar que as quedas das resistências à tração e flexão não são tão grandes à uma temperatura de  $250^\circ\text{C}$  por 30 minutos. Por outro lado a resistência à compressão é bastante afetada pela exposição à elevadas temperaturas.

A figura 2.4 mostra esquematicamente o comportamento de várias resinas com a variação da temperatura. Destacando-se o bom desempenho da resina fenólica com o aumento da temperatura.

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas de compósitos de tecidos de fibra de vidro impregnados com resina fenólica [2].

PROPRIEDADES	TEMPERATURA AMBIENTE	TEMP.de 250°C (Após 30 min)
Resistência sob tração (MPa)	380	330
Módulo de elast. à tração (GPa)	25	22
Resistência sob compressão (MPa)	585	380
Módulo de elast. à compressão (GPa)	30	24
Resistência sob flexão (MPa)	544	420
Módulo de elast. à flexão (GPa)	27	25
Densidade ( g/cm <sup>3</sup> )	1,88	—

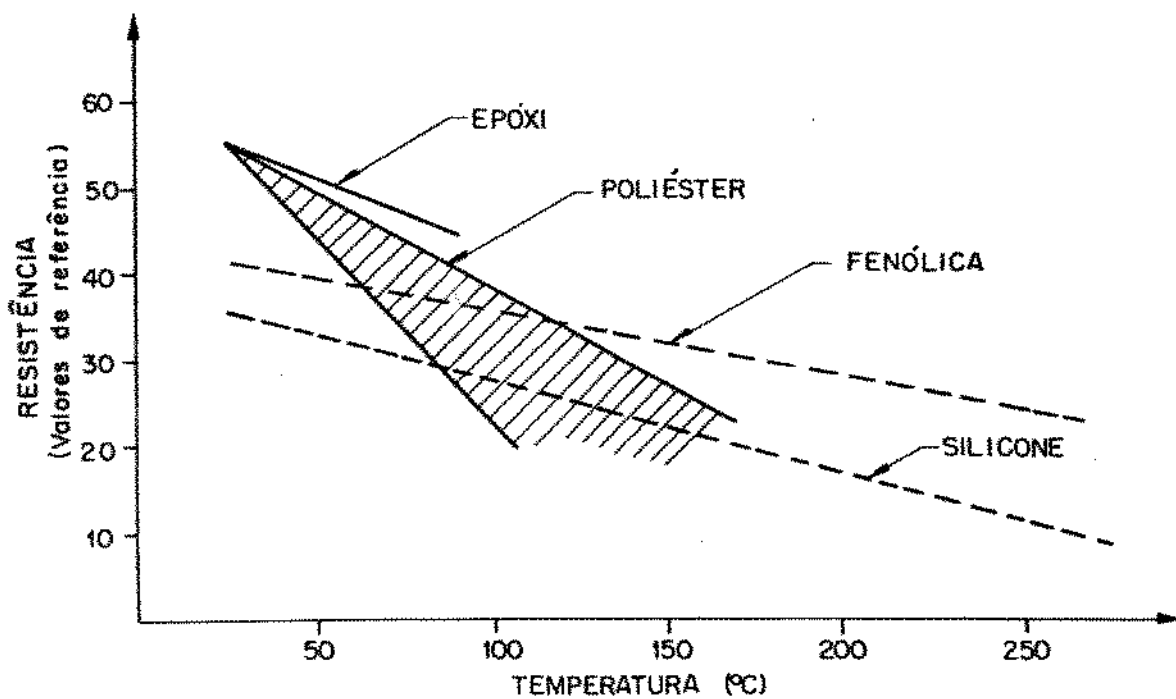


Figura 2.4 - Influência da temperatura na resistência mecânica das resinas termofixas [1].

Uma grande atenção tem sido dada para a síntese de polímeros com elevada estabilidade térmica ao ar, levando em consideração que uma das principais limitações para o uso das matrizes poliméricas em compósitos avançados é o fator temperatura.

## 2.5 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.5.1 - INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas do material compósito são fortemente influenciadas pelo processo utilizado para sua fabricação, além de fatores como: resistência à ataques químicos; resistência à intempéries; o próprio peso; o acabamento da peça; e etc. Devido ao elevado número de fatores que determinam as características finais de uma peça de material compósito, é de maior importância conhecer e saber planejar as etapas do ciclo de fabricação de um compósito, destacando-se [1]:

- Escolha do tipo de ferramental mais adequado;
- Controle da vida da matéria prima;
- Controle da atmosfera no local de trabalho;
- Preparação e ciclo de cura;
- Desmoldagem;
- Operação de usinagem e acabamento;
- Etc.

As duas etapas que mais caracterizam o processo de fabricação de um compósito reforçado com fibra é a laminação e a

cura. A laminação consiste do arranjo das fibras e da resina no molde. A cura consiste da secagem ou polimerização da resina para proporcionar uma colagem permanente entre as fibras [3,5]. A seguir serão descritos os principais processos de fabricação de materiais compósitos.

#### 2.5.2 - IMPREGNAÇÃO MANUAL

O Processo de impregnação manual "Hand Lay Up", é uma técnica onde o reforço fibroso é impregnado pela resina manualmente sobre a superfície do molde aberto. Geralmente, a resina epóxi ou poliéster, é impregnada com um sistema de cura adequado para o endurecimento na temperatura ambiente. A resina é espalhada sobre o reforço através de pincel, espátula, ou com um sistema de injeção "spray". Camadas de reforços são incorporadas uma a uma após o encharcamento adequado pela resina, sendo que, o número de camadas depende da espessura desejada. Após atingida a espessura desejada a peça é deixada curar na temperatura ambiente ou levada a uma autoclave. Apesar de muito trabalhosa, a impregnação manual oferece o máximo em flexibilidade de projeto e o mínimo de equipamento. As técnicas de impregnação manual são adequadas para aplicações em que não sejam prejudicadas pela baixa produção, ou de que outras formas de produção fossem proibitivas ou economicamente inviáveis [1,4,7]. Neste trabalho, os corpos de prova em forma de placas foram laminados manualmente.

Compósitos confeccionados com impregnação manual utilizando-se reforços com fibras picadas podem ser fabricados com

auxílio do sistema de injeção "Spray Up" (figura 2.5).

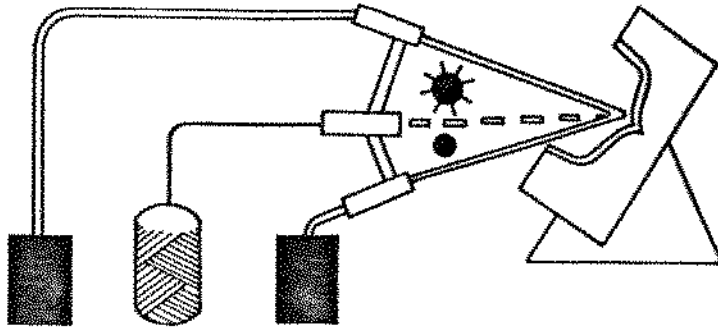


Figura 2.5 Esquema do processo de injeção "Spray Up" [2].

O método consiste em espalhar resina e reforço picado ao mesmo tempo na superfície do molde aberto, através de um sistema de revólveres especiais (sistema "Spray Up"). A fibra é alimentada na forma de mecha contínua e é picada justamente antes de ser incorporada. O tempo de aplicação e de impregnação do reforço é reduzido. A principal dificuldade deste método é que a resina deve ser alimentada pelo sistema de injeção sem o sistema de cura, caso contrário poderá obstruir os orifícios do revólver. A resina e o sistema de cura devem se encontrar na superfície do moldado [2].

### 2.5.3 - MOLDAGEM EM CÂMARA DE VÁCUO E PRESSÃO

Os processos de moldagem em câmara de vácuo ou em câmara de pressão, são os mais versáteis processos de fabricação de compósitos com reforços fibrosos. A técnica consiste em pré-impregnar mantas ou tecidos com a resina e o sistema de cura, e moldá-los na forma desejada através do auxílio de vácuo ou

pressão. A cura do impregnado moldado é geralmente realizado em autoclaves adequadas. Tanto a aplicação de vácuo como de pressão, além de proporcionar a espessura e o formato desejado, favorecem a eliminação de ar aprisionado [1,7]. A figura 2.6 ilustra a moldagem sob câmara de vácuo (2.6-a) e de pressão na autoclave (2.6-b).

Fig. 2.6-a.

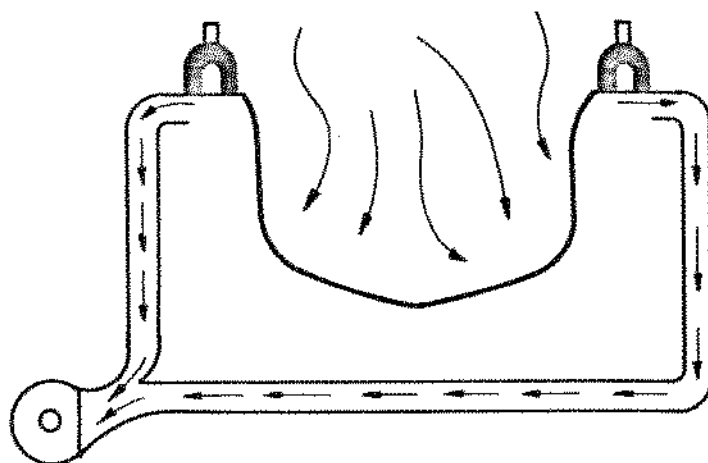


Fig. 2.6-b:

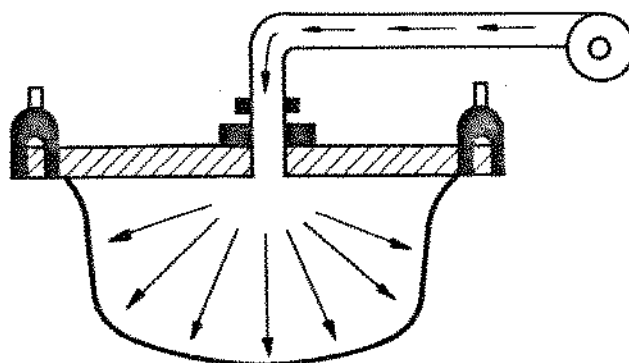


Figura 2.6- Esquema de moldagem por câmara de vácuo (Fig. 2.6-a), e por câmara de pressão (fig. 2.6-b) [2].

A moldagem em câmara de pressão permite fabricar moldados com estrutura mais rígida, pressões acima de 200 MPa podem ser aplicadas, proporcionando maior resistência ao moldado do que aquele obtido em câmara de vácuo [2].

#### 2.5.4 - BOBINAMENTO DE FIBRAS ("FILAMENT WINDING")

O método de bobinamento de fibras "filament winding", tem como principal objetivo utilizar o reforçamento através de fibras contínuas. Assim, consegue-se otimizar a resistência da fibra. Mechas ou filamentos são enrolados em torno de um mandril com a geometria desejada, após passarem num banho de resina ativada para a cura. As mechas ou os filamentos podem ser dispostos em vários ângulos e em várias camadas. Após atingida a espessura desejada o mandril recoberto é deixado curar na temperatura ambiente ou dentro de uma estufa [3,7]. A figura 2.7 ilustra a fabricação de uma peça utilizando-se o método de bobinamento de fibras. Este processo de fabricação de compósito foi utilizado para obtenção dos corpos de prova bobinados.

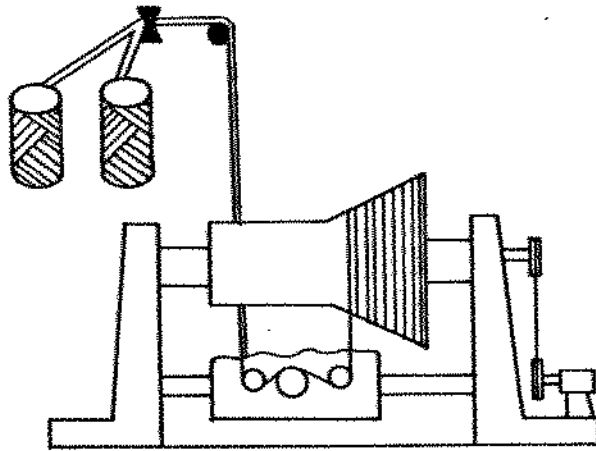


Figura 2.7 - Esquema do processo de bobinamento de fibras "Filament Winding" [7].



### 2.5.5 - IMPREGNAÇÃO CENTRÍFUGA

A impregnação centrífuga "Centrifugal Casting", é um método para produzir peças cilíndricas ocas, como tubos. Uma manta de fibras picadas é posicionada dentro de um mandril oco, e uma espécie de revólver é responsável pela alimentação de resina dentro do mandril. A medida que o mandril oco gira a resina e a manta são forçadas contra a parede interna do mandril. A alimentação da resina ativada dentro do mandril é feita com todo o sistema dentro de uma estufa, de acordo com figura 2.8. Assim a medida que a manta adere à parede do mandril junto com a resina, o compósito sofre o processo de cura [2].

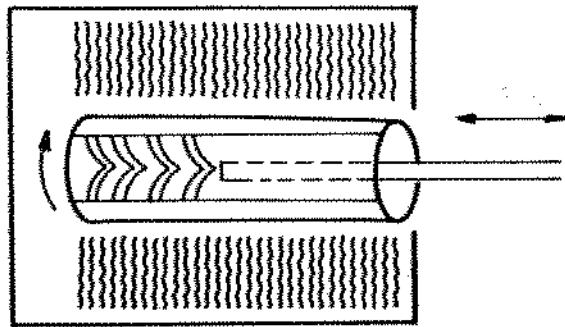


Figura 2.8 - Impregnação Centrífuga [2].

### 2.5.6 - PRÉ-IMPREGNADOS

A impregnação de resina ao reforço pode ser otimizado através de um processo de pré-impregnação, que se resume em aplicar resina com a devida proporção de catalizador homogeneamente em toda a extensão do reforço. Esse reforço pré-impregnado com resina é conhecido como PRE-PREG, e se

apresenta pronto para ser moldado. Os pre-pregs podem ser encontrados na forma de rolos, fitas, laminados, e etc.

Devido ao fato da resina já conter catalizador, a cura é função apenas da temperatura. Por esse motivo o material deve ser guardado à baixas temperaturas ( $-18^{\circ}\text{C}$ ). Mesmo assim se desenvolve uma pequena reação da resina, restringindo o tempo de uso deste material entre 3 a 6 meses [4].

As principais vantagens dos pré-impregnados sobre os outros compósitos são [1]:

- Os pre-pregs são pré-formulados e não exigem a incorporação de qualquer outro aditivo durante a moldagem;
- A qualidade do produto é reproduzível pois a quantidade de resina pré-impregnada é previamente controlada;
- A relação resina/reforço também é controlada, e permite uma ampla faixa de reforço de 20 a 80 %;
- A produção de moldados é simplificada, pois os pre-pregs estão prontos para serem moldados;
- Não há perda de material durante a moldagem;
- Técnicas automatizadas de produção podem ser utilizadas.

Os pre-pregs podem ser moldados através de uma variedade de métodos de fabricação, incluindo por exemplo: moldagem em câmara de pressão ou câmara de vácuo; moldagem por compressão; bobinamento de fibras "filament winding", e etc. Os pre-pregs são muito utilizados para moldar peças de fuselagem de aviões, helicópteros, e outros veículos aeroespaciais [1]. O tecido utilizado para confecção dos corpos de prova deste trabalho foram pré-impregnados.

## 2.6- PROPRIEDADES DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

A combinação de propriedades físicas, mecânicas, e químicas dos componentes de um compósito para proporcionar as características desejadas ao produto final, deve ser realizada conhecendo-se muito bem as propriedades de cada componente. Muitas vezes as características são até mesmo opostas, como no caso dos materiais metálicos e materiais poliméricos, onde o primeiro é bom condutor elétrico, enquanto o segundo é isolante.

A origem da conjugação de materiais em sua maior parte teve como aplicação aspectos estruturais. Neste contexto a resistência mecânica tornou-se um dos principais requisitos para a utilização de materiais compósitos. Para aplicações estruturais, as propriedades mecânicas que se destacam são: resistência, ao escoamento, à ruptura sob tração, à flexão, à compressão, e ao cisalhamento; rigidez ou módulo de elasticidade; e, ductilidade sob impacto [2].

Dentre os materiais mais tradicionalmente utilizados em aplicações estruturais encontram-se os metais. A elevada resistência à tração desta classe de materiais aliada a sua ductilidade, a qualifica como uma das mais adequadas à participar da constituição dos compósitos como reforço. Isto pode ser comprovado observando a tabela 2.5. A fibra de tungstênio apresenta um dos maiores valores de resistência à tração dentre os materiais apresentados, sua resistência à tração só se equivale ao da sílica fundida.

Apesar das qualidades desejadas das fibras metálicas, estes materiais tem sido pouco utilizados em materiais compósitos avançados. A principal razão deste fato é que as densidades são as

mais elevadas dentre todos os materiais. Isto dificulta a utilização destes materiais em estruturas leves, principalmente em veículos aeronáuticos e aeroespaciais [4].

Tabela 2.5 - Características de materiais utilizados para aplicações estruturais [2,3,7].

MATERIAL	Resist. Tração (MPa)	Módulo Elast. (GPa)	Densidade <sub>3</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Resist. Espec. <sub>3</sub> (m.10 <sup>3</sup> )	Módulo Espec. <sub>3</sub> (m.10 <sup>3</sup> )
Liga de magnésio	380	45	1,83	208	24,6
Liga de alumínio	690	69	2,77	250	24,9
Liga de titânio	1311	117	4,57	287	25,6
Liga de ferro	2070	203	8,03	258	25,3
Fibra de tungstênio	4485	414	19,3	232	21,4
Fibra de vidro E	2415	72	2,55	947	28,2
Fibra de boro	2760	414	2,33	1184	177,7
Sílica fundida	4485	69	2,19	2048	31,5
Fibra de carbono	2500	400	1,66	1500	240
Fibra de carbeto de Si	2415	448	3,46	698	129,5
Fibra de kevlar	3792	62	1,44	2633	43,0
Fibra de alumina	1379	379	3,70	373	102,4

A influência do peso do material sobre suas propriedades mecânicas é levada em consideração desde o início da fabricação dos compósitos avançados. Desde então, a resistência mecânica passou a estar intimamente vinculada ao peso do material. A quantificação deste parâmetro é estabelecido através do quociente da resistência mecânica e do módulo de elasticidade pela densidade

do material. Este parâmetro é conhecido como resistência específica e módulo específico. Através da tabela 2.5 pode-se observar que embora a fibra de tungstênio apresente a maior resistência à tração dentre os materiais em questão, sua resistência específica é inferior à maior parte deles.

A fibra de carbono destaca-se entre os materiais apresentados pelo seu elevado módulo específico. Os valores específicos da resistência à tração e do módulo de elasticidade tem feito com que a fibra de carbono, a fibra de boro, a fibra de vidro, e a fibra de kevlar, sejam os principais reforços utilizados em fabricação de compósitos para estruturas aeronáuticas e aeroespaciais [1,4,7].

Existem muitos fatores que afetam direta ou indiretamente as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Estes fatores podem estar relacionados com os reforços e matrizes empregadas, orientação e proporção de fibra/resina, processo de fabricação, temperatura e pressão de moldagem, e etc [1].

A figura 2.9 mostra uma comparação entre alguns materiais compósitos e metálicos no que tange a resistência à tração e a densidade. Um material compósito pode ser duas vezes mais resistente que o aço e cinco vezes mais leve, e ser seis vezes mais resistente que o alumínio com a metade do peso. Daí justifica-se a grande vantagem dos materiais compósitos em relação aos materiais metálicos em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais.

Num material compósito, as fibras são as responsáveis pela sua alta resistência e rigidez, tendo a matriz polimérica apenas a função de aglomerante. A figura 2.10 ilustra a comparação do limite de resistência à tração em relação à deformação, entre

diversas fibras e uma resina aglomerante.

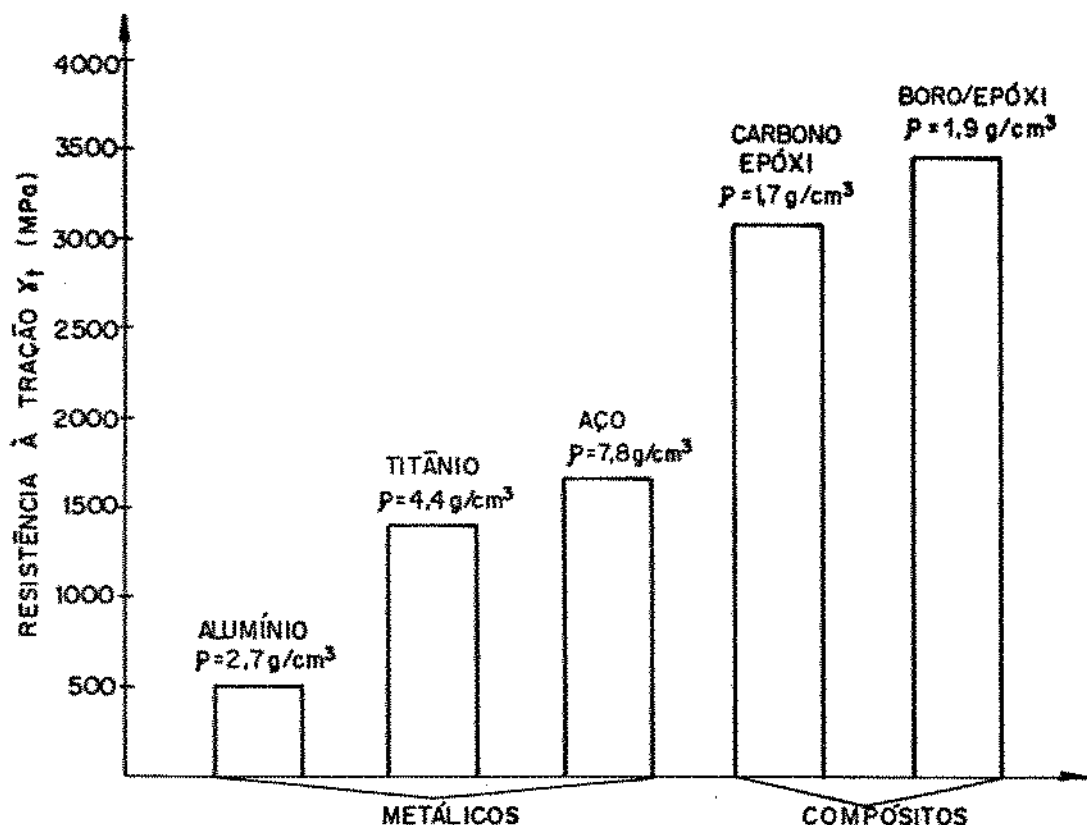


Figura 2.9 - Resistência à tração ( $\sigma_t$ ) e densidade ( $\rho$ ) de materiais compósitos e metálicos [1].

Com relação ao custo dos materiais compósitos, está em grande parte associado ao tipo de fibra/resina empregada, e a sua tecnologia de fabricação. A figura 2.11 ilustra os custos relativos de alguns compósitos fibrosos e materiais metálicos, comparados com o compósito de boro/epóxi, que possui o custo mais elevado entre os materiais especificados [1].

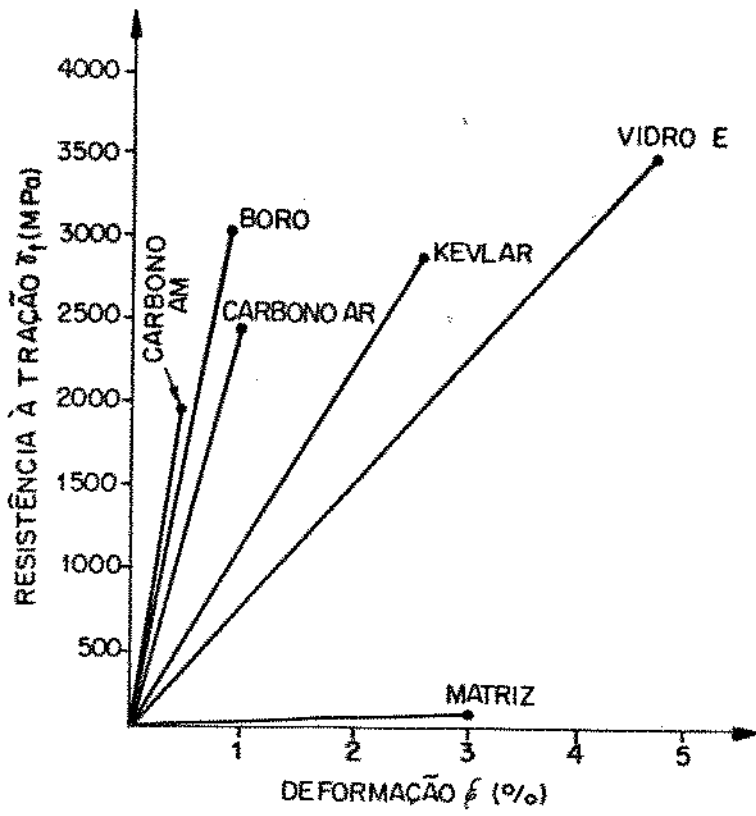


Figura 2.10 - Resistência à tração em função da deformação [1].

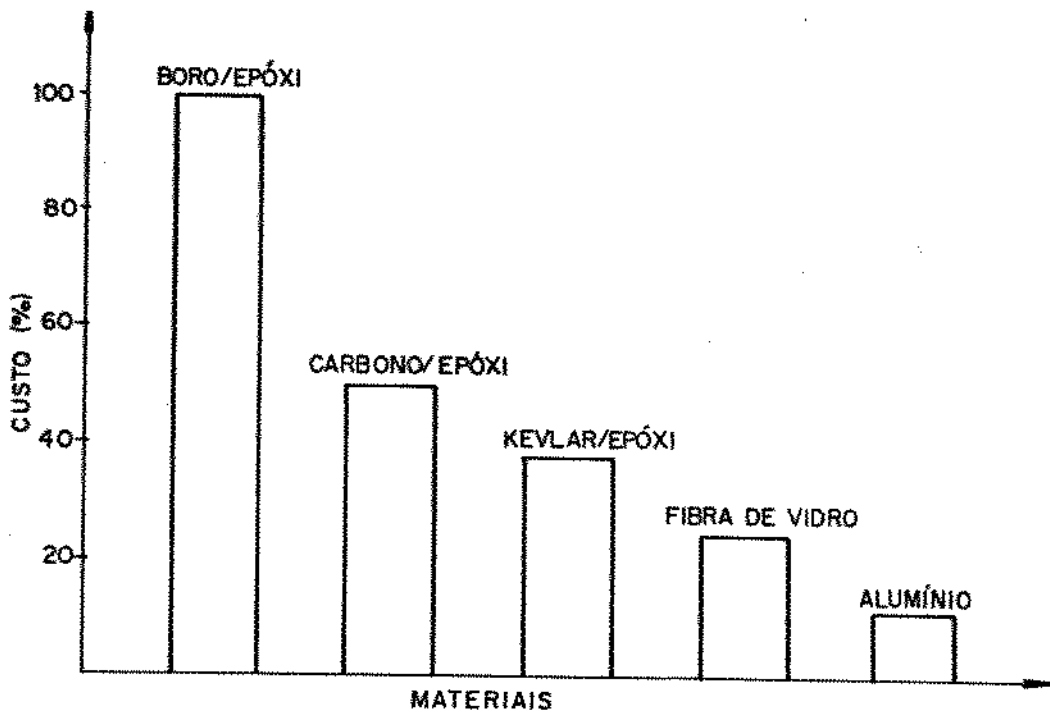


Figura 2.11 - Custos relativos de alguns materiais [1].

## CAPÍTULO III

### USINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos tem aumentado seu campo de aplicação dentro da engenharia, principalmente na área aeroespacial, onde há necessidade de materiais com elevada resistência específica, destacando-se entre esses materiais os plásticos reforçados com fibra de vidro e carbono. Apesar do processo de moldagem desses materiais ser bastante flexível com relação as geometrias das peças obtidas, tem crescido a necessidade de uma operação posterior de usinagem para se conseguir maior precisão dimensional e melhor acabamento superficial [8,9,10].

Os materiais compósitos à base de plásticos reforçados com fibras são abrasivos, principalmente os reforços de fibra de carbono, que tem seu processamento por usinagem bastante dificultado pela sua alta abrasividade. O mecanismo de corte dos materiais compósitos difere de outros materiais convencionais, pois sua estrutura é anisotrópica, tendo a composição e a disposição das fibras grande influência sobre os parâmetros de usinagem. Portanto, a especificação da ferramenta e das condições de corte é de suma importância no processo de corte desses materiais [9,11,12].

Os principais processos de usinagem utilizados no corte de materiais compósitos incluem: corte de contorno, furação,



escariamento, torneamento, fresamento, e etc. A usinagem de compósitos à base de plásticos reforçados com fibra implica em requisitos e condições essencialmente diferentes daqueles usados em metais. Os materiais compósitos são usináveis apenas dentro de um limite de temperatura, a baixa condutividade térmica do material favorece o acúmulo de resina na área de corte durante a usinagem. Uma vez que existe pouca dissipação de calor pelo material, a maior parte do calor é retirado pela própria ferramenta [6].

As características de usinagem dos compósitos variam de peça para peça, devido a influência dos métodos de fabricação, sendo assim, ter conhecimento de como o material se comporta durante a usinagem é da maior importância na fabricação dos componentes. A usinagem de tecido de vidro e 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 [8,12,13].

### 3.2 - FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.2.1 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO

A crescente aplicação dos materiais compósitos na indústria aeronáutica e aeroespacial, gera a necessidade de se conhecer e

dominar as técnicas de furação destes materiais, tendo como consequência um maior desenvolvimento na área de ferramentas. O processo de furação em materiais compósitos é muito utilizado, principalmente em montagens de componentes [6,8].

As peças de compósitos fabricadas à base de fibra de carbono são rígidas e frágeis, portanto, se no processo de furação não forem cortadas de forma correta as fibras quebrarão ou serão puxadas para fora do diâmetro, causando delaminações. O risco de delaminações é maior na saída da ferramenta da peça, exigindo uma ferramenta especial e condições específicas de corte. Segundo ARAÚJO [11], a ferramenta deve estar em alta rotação, na ordem de 10.000 a 15.000 rpm, e avanço de 10 a 15 mm/min.

Para a realização de uma furação em peça de compósito à base de fibra de carbono, é necessária a análise de como se comportam os materiais usados na fabricação das ferramentas, com relação à vida das mesmas. Isso pode ser exemplificado com testes realizados na EMBRAER, com uma broca de 10 mm de diâmetro. Segundo ARAÚJO [11], para ferramentas de aço rápido (AISI M2, M10, M35, e M42) o resultado obtido foi baixo, não ultrapassando cinco furos. O uso de ferramentas com tratamentos superficiais não apresentou ganhos consideráveis na vida das mesmas. O melhor desempenho foi apresentada pela ferramenta com revestimento de nitreto de titânio (TiN), fazendo cerca de dez furos. O material mais utilizado mundialmente na fabricação de ferramentas para furação em carbono é o metal duro classe ISO K10. Com ele é possível fazer cerca de 100 furos sem necessidade de reafiação da ferramenta e sem delaminações no furo, conforme mostra a figura 3.1.

Está em desenvolvimento uma ferramenta de metal duro

inteiriça, que tem soldado na ponta um inserto de diamante policristalino (PCD). Os primeiros testes tem apresentado uma vida da ferramenta ao redor de 1.000 furos, sem delaminar a fibra de carbono [11].

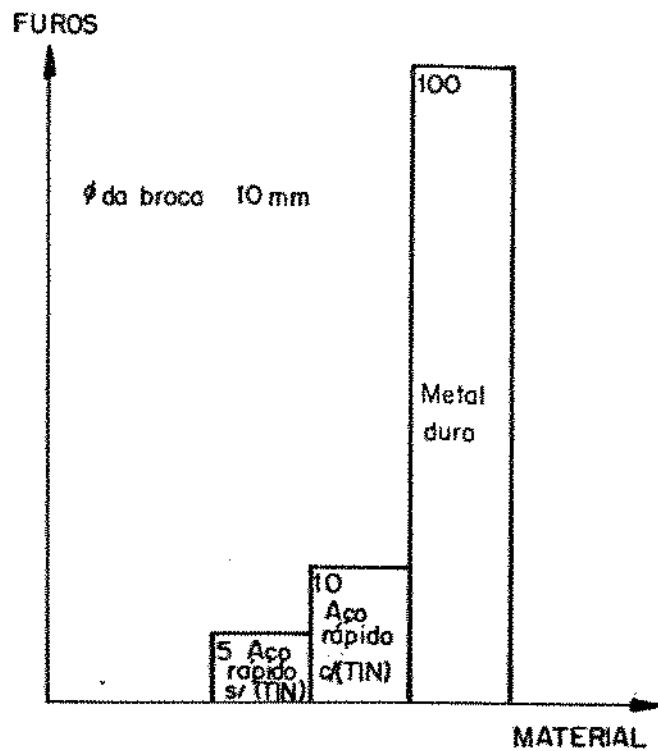


Figura 3.1- Número de furos por material de ferramenta [11].

Como em todas as operações de fabricação, as ferramentas para furação de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono são também conhecidas como brocas, embora com características especiais. O tipo mais comum é a broca de metal duro inteiriço, com ângulo de hélice  $30^\circ$ , ângulo ponta de  $135^\circ$ , e afiação em cruz. O uso desta broca é limitado, pois precisa que a fibra de carbono esteja combinada com outro material [11].

Uma outra broca também utilizada é a do tipo espada, igualmente feita em metal duro inteiriço. Ela difere da ferramenta

comum, pois corta na borda do furo a ser feito (Figura 3.2). Para usa-la é necessária uma bucha externa, para evitar o alargamento do furo.

O tipo mais usado de broca para a furação de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono é o asa de morcego ou rabo de peixe (Figura 3.3). Este tipo de ferramenta apresenta um ótimo rendimento, boa qualidade dimensional do furo e não causa delaminação, sendo feita em metal duro. Esta também se caracteriza por cortar somente com a borda, não permitindo que o material seja empurrado, como faz a broca comum, evitando assim a delaminação na saída da ferramenta da peça [1].



Figura 3.2- Broca tipo espada [1].

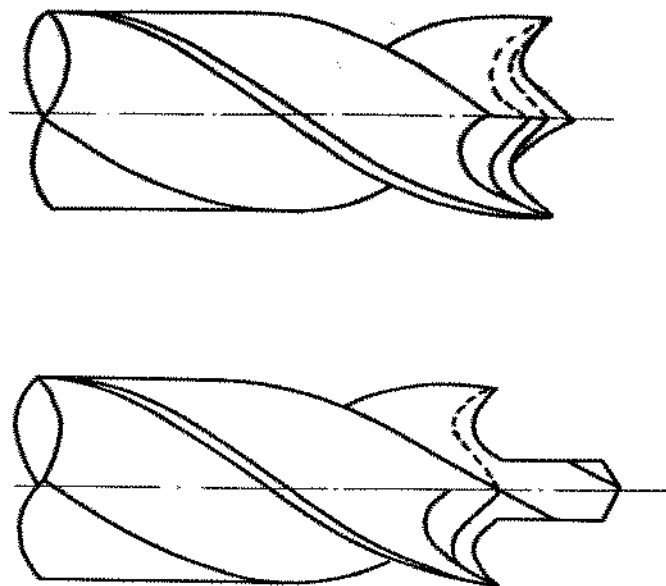


Figura 3.3 - Broca tipo asa de morcego [1].

### 3.2.2 - COMPORTAMENTO DO DESGASTE DA FERRAMENTA EM RELAÇÃO AO TIPO DE FIBRA

Um ensaio de furação realizado por TAKESHITA [8], experimentou três tipos de materiais:

- Plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV);
- Plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC);
- Plástico reforçado com fibra de kevlar (PRFK);

As fibras foram laminadas segundo uma orientação uniforme, e moldadas em placas com resina epóxi. As características dos materiais ensaiados estão mostradas na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Propriedades dos materiais ensaiados [8].

PROPRIEDADES	PRFV	PRFC	PRFK
Diâmetro da fibra	12 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$
Espessura do laminado	15 mm	10 mm	18 mm
Tecido	50 camadas	24 camadas	38 camadas
Matriz	resina epóxi	resina epóxi	resina epóxi
Porcentagem de resina	40 %	40 %	70 %
Resistência à tração // à fibra	159 MPa	515 Mpa	200 Mpa
⊥ à fibra	128 MPa	245 MPa	131 MPa

As condições de corte utilizadas no ensaio foram:

- Rotação: 3370 rpm;
- Avanço: 0,05 mm/rot;

- Profundidade do furo cego: 9 mm;
- Broca helicoidal de aço rápido:  $\phi$  4mm;

Durante o ensaio Takeshita [8], registrou a dimensão do desgaste da aresta da broca em função do números de furos. Os resultados dos ensaios de furação dos plásticos reforçados com fibra (PRF) são mostrados na figura 3.4.

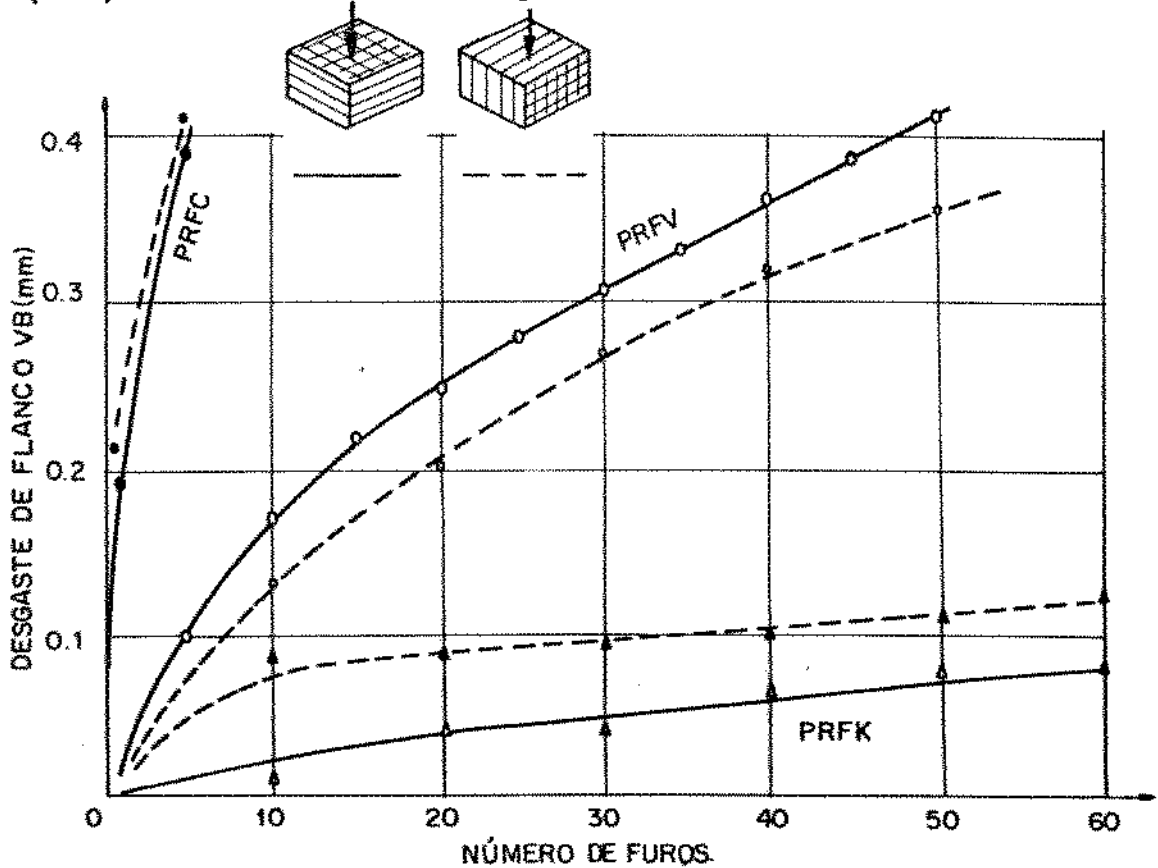


Figura 3.4 - Desgaste da broca no ensaio de furação [8].

O máximo de desgaste da ferramenta foi observado na usinagem do plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC) e o mínimo de desgaste foi observado na usinagem do kevlar (PRFK). Este fato é devido a diferença de fratura ocorrida no corte, onde a fibra de kevlar possui fratura dúctil e a fibra de carbono possui fratura frágil. A fibra de carbono apresentou a maior abrasividade entre as três fibras. A fibra de kevlar ao contrário,

apresenta uma qualidade lubrificante quando em contato com a ferramenta, reduzindo assim o desgaste da mesma. Já com relação à direção das fibras, não observou-se uma influência nítida em relação ao desgaste da ferramenta.

### 3.3 - ENSAIO EM CORTE ORTOGONAL

#### 3.3.1 - INTRODUÇÃO

TAKESHITA [8], ensaiou em corte ortogonal três tipos de fibras: vidro, carbono, e kevlar. As fibras foram laminadas segundo uma orientação uniforme e moldada em placas com resina epóxi, cujas propriedades estão mostradas na tabela 3.1. O corte ortogonal foi efetuado numa fresadora através do movimento horizontal da mesa, tendo as seguintes condições de corte:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ): 0,54 m/min;
- Profundidade de corte ( $a_p$ ): 0,20 mm;
- Largura de corte ( $b$ ): 4 mm;
- Espessura de corte ( $h$ ): 0,2 mm;
- Ferramenta: Aço rápido e metal duro ISO P30, ângulo de saída de  $20^\circ$ , ângulo de folga de  $12^\circ$ .
- Sem fluido de corte.

Os materiais ensaiados apresentam as disposições de fibras, mostradas na figura 3.5.

O ângulo  $\alpha$  da figura 3.5 mede a direção das fibras em relação à direção de corte, sendo seus valores no ensaio iguais a: 0, 20, 45, 70, e 90 graus. Existem dois grupos de fibras no

laminado: O grupo (A) tem o ângulo  $\alpha$  menor que  $90^\circ$ , e o grupo (B) tem o ângulo  $\alpha$  maior que  $90^\circ$ . Além dos corpos de prova com estas disposições de fibras, existem outros dois tipos: um com a direção do laminado perpendicular à direção de corte ; e o outro com as placas laminadas paralelas à direção de corte.

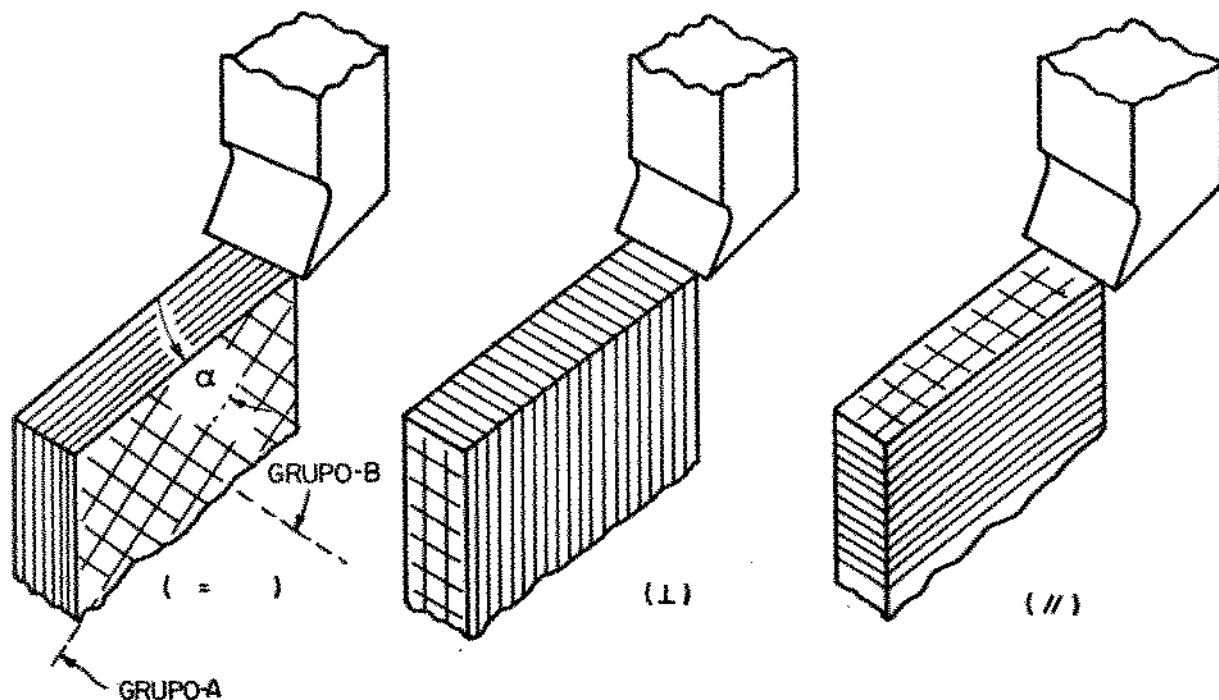


Figura 3.5 - Direção das fibras nos corpos de prova [8].

### 3.3.2 - A INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DAS FIBRAS NAS FORÇAS

Segundo TAKESHITA [8], o mecanismo de corte de um plástico reforçado com fibra (PRF) é afetado pela disposição das fibras num laminado. Isto pode ser observado experimentalmente através de testes em seis corpos de prova apresentando diferentes disposições de fibras.



As figuras 3.6, 3.7, 3.8, mostram a relação entre a força de corte ( $F_c$ ), força passiva ( $F_p$ ), e a direção das fibras. Os dados plotados são as médias dos valores para ferramenta de aço rápido e metal duro, observados no corte ortogonal em baixa velocidade de corte.

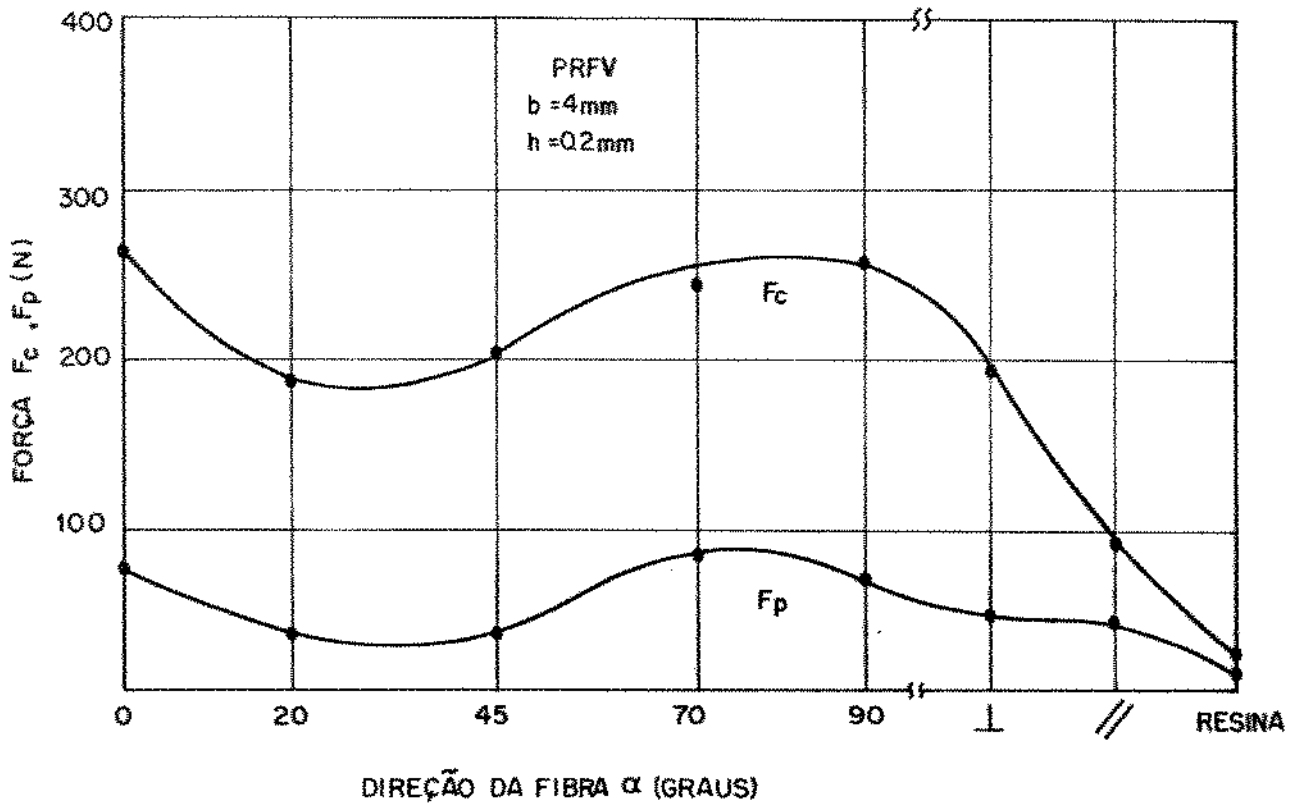


Figura 3.6 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras. Peça de PRFV [8].

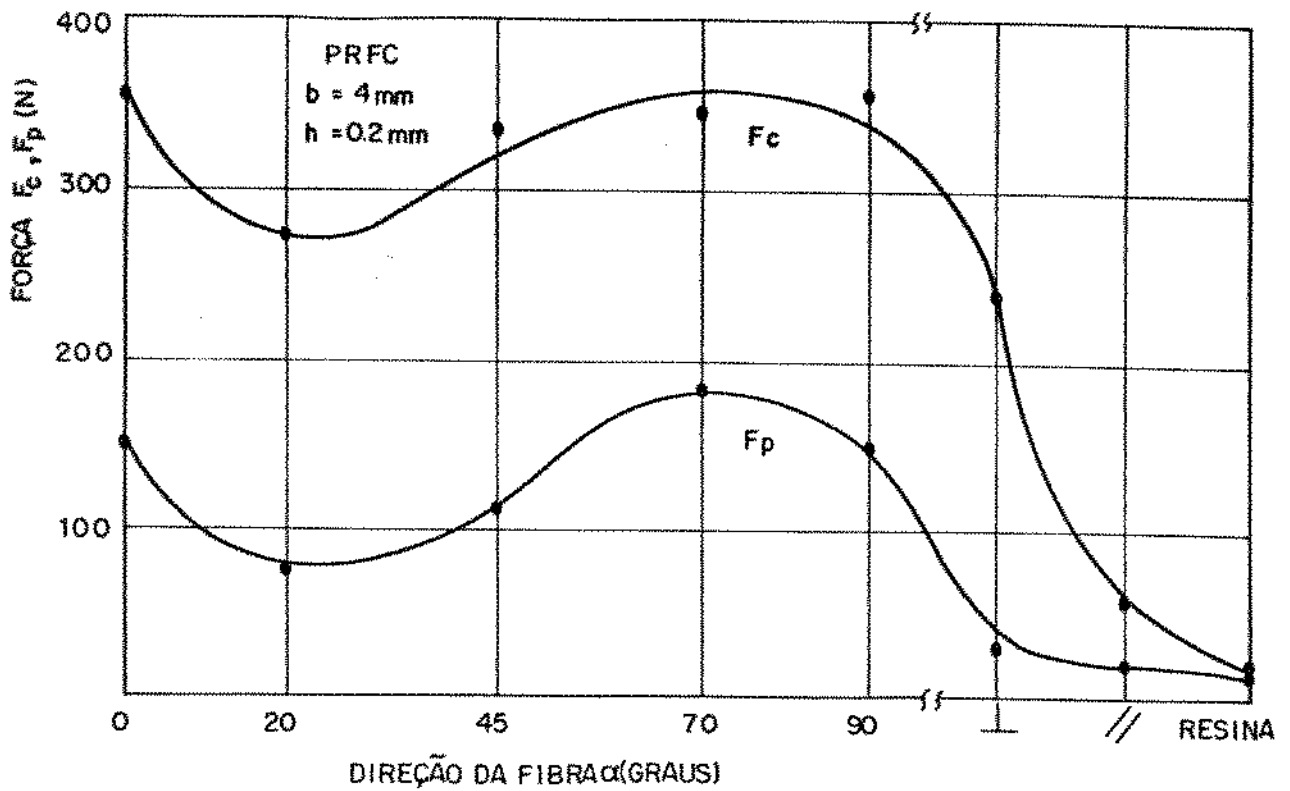


Figura 3.7 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras. Peça de PRFC [8].

Pode-se constatar dos experimentos que o corte da fibra de vidro (PRFV) e da fibra de carbono (PRFC) são influenciados pelas disposições das fibras. As forças de corte e passiva são máximas quando a direção das fibras tendem a ser perpendicular à direção de corte. Fato que não acontece com o corte da fibra de kevlar. As forças permanecem constantes com a variação da direção das fibras. Este resultado é devido à diferenças de propriedades de natureza física e mecânica das fibras. Já a força necessária para cortar a resina pura é muito pequena, praticamente desprezível comparado ao corte das fibras .

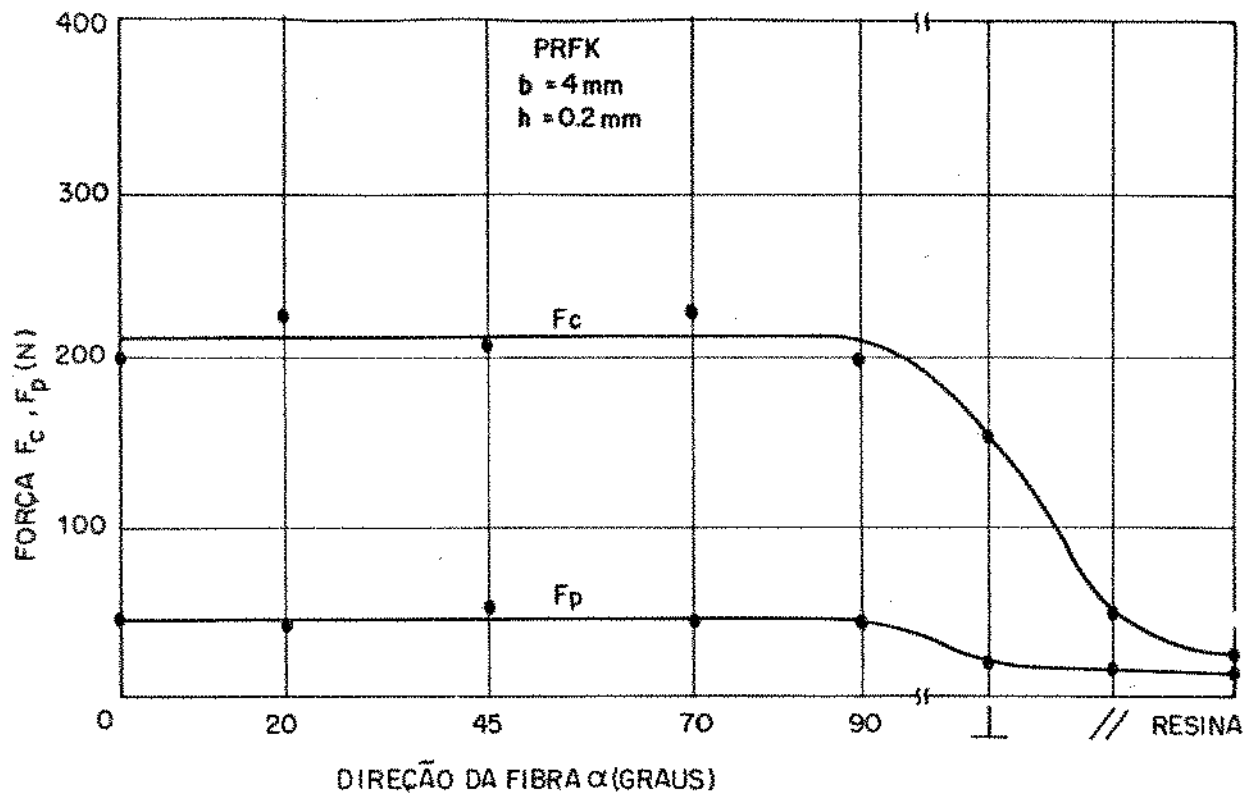


Figura 3.8 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras. Peça de PRFK [8].

### 3.3.3 - A INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DAS FIBRAS NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

TAKESHITA [8], em sua experiência estudou também a influência da disposição das fibras na rugosidade superficial da peça usinada. As medidas da rugosidade superficial obtidas no ensaio de corte ortogonal são mostradas na figura 3.9. As condições de corte do ensaio são idênticas as citadas anteriormente no ensaio de forças, porém utilizando como material de ferramenta o metal duro classe ISO P30.

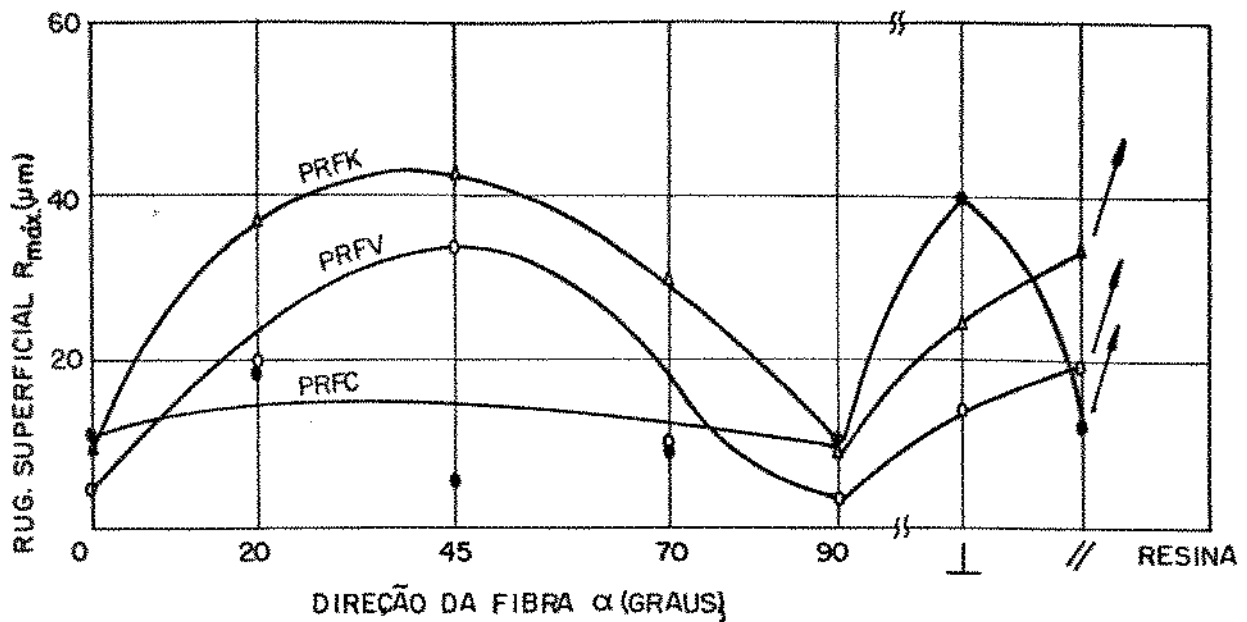


Figura 3.9 - Relação entre a rugosidade superficial e a direção das fibras. Rugosidade medida na direção de corte [8].

Observou-se que na usinagem de plástico reforçado com fibras, a rugosidade superficial é maior que a obtida na usinagem convencional de metais, sendo isto um fator limitante na usinagem de precisão destes materiais compósitos.

As causas que provocam o aumento da rugosidade em usinagem de plástico reforçado com fibras são: As delaminações que ocorrem no corte das fibras que possuem ângulos de posição ( $\alpha$ ) menores que  $90^\circ$  em relação à direção de corte (fibras do grupo A), mostradas na figura 3.10-a; a recuperação elástica que ocorre no corte das fibras que possuem ângulos maiores de  $90^\circ$  em relação à direção de corte (fibras do grupo B), mostradas na figura 3.10-b; e a craterização da superfície da peça que ocorre no corte da resina pura, conforme a figura 3.10c. Portanto, a deterioração da

superfície ocorrida na usinagem de plásticos reforçados por fibra é devido à diferentes fenômenos ocorridos durante o corte, causados pela heterogeneidade desses materiais.

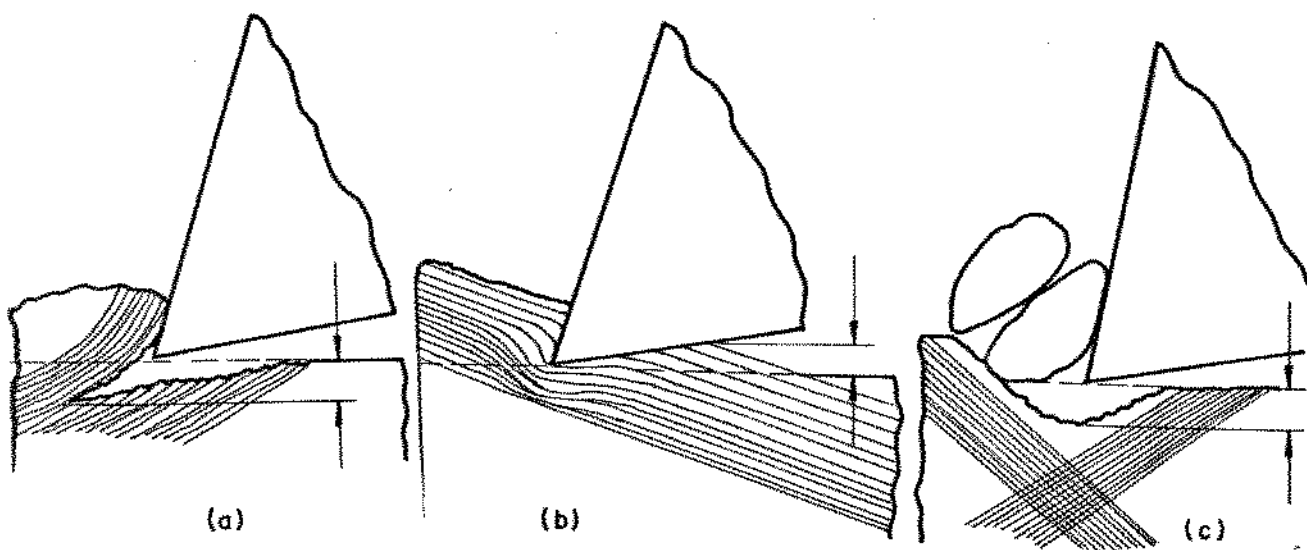


Figura 3.10 - Causas de deterioração da superfície na usinagem de plástico reforçado com fibras [8].

### 3.4 - MECANISMO DE CORTE EM COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

#### 3.4.1 - INTRODUÇÃO

TAKEYAMA [10], ensaiou em corte semi ortogonal, um compósito à base de resina epóxi reforçado com fibra de vidro (PRFV), verificou a influência da direção das fibras nas forças de usinagem e na rugosidade superficial da peça. As propriedades do material compósito ensaiado são mostradas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades do material compósito [10].

PROPRIEDADES	VIDRO E
Diâmetro da fibra	13 $\mu\text{m}$
Porcentagem de fibra	59,7 %
Resistência à tração: -Paralela à fibra -Perpendicular à fibra	1,2 GPa 0,06 GPa
Módulo de elasticidade: -Paralela à fibra -Perpendicular à fibra	44 GPa 15 GPa
Coefficiente de dilatação térmica da fibra	$5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Os corpos de prova do ensaio foram preparados com vários ângulos de posição da fibra ( $\alpha$ ), tendo sempre como referência a direção de corte, conforme mostra a figura 3.11 .

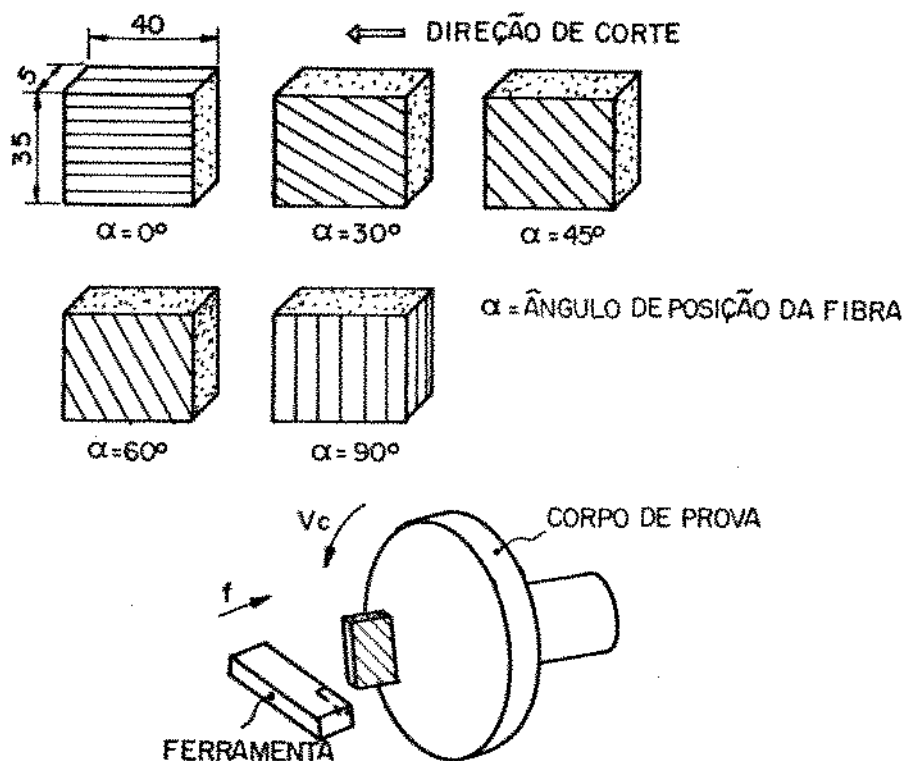


Figura 3.11 - Corpos de prova com diferentes ângulos de fibra para o corte semi-ortogonal [10].

#### 3.4.2 - VARIAÇÃO DAS FORÇAS COM A DIREÇÃO DAS FIBRAS

As forças de corte e avanço medidas durante o corte do PRFV estão mostradas na figura 3.12. As condições do ensaio foram: profundidade de corte de 0,1 mm; avanço de 0,1 mm/rot; velocidade de corte de 100 m/min; e ângulo de saída variável.

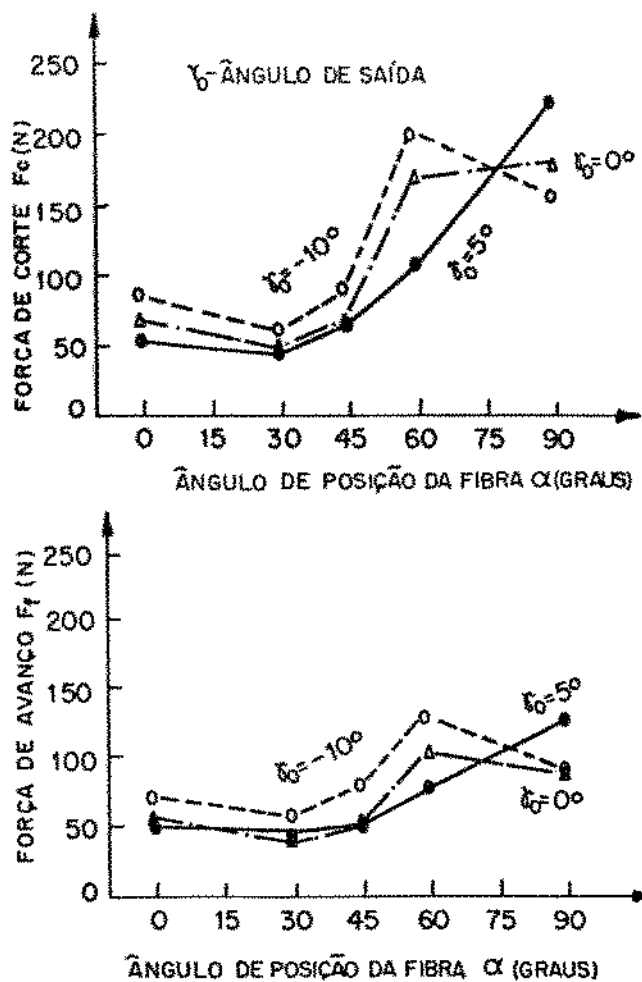


Figura 3.12 - Relação entre as forças de corte e avanço, e a direção das fibras [10].

As forças de usinagem são extremamente influenciadas pela direção das fibras, principalmente a força de corte, sendo mínima quando a direção das fibras em relação à direção de corte for aproximadamente  $30^\circ$ , em que a matriz é cisalhada sem o impedimento da fibra.

A razão da força de corte aumentar abruptamente com a direção da fibra acima de  $30^\circ$ , é devido ao cisalhamento de material com maior presença de fibra, onde a tensão de compressão na superfície de saída aumenta em tal extensão, que leva o cisalhamento em um ponto da fibra.

Quanto ao decréscimo da força de corte quando o ângulo de



saída varia de  $0^\circ$  para  $-10^\circ$ , é devido à elevação da força de compressão próxima à aresta de corte, fazendo com que as fibras fujam da aresta de corte [10].

### 3.4.3 - VARIACÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL COM A DIREÇÃO DAS FIBRAS

A variação da rugosidade superficial da peça medida por TAKEYMA [10], em função da direção da fibra é mostrada na figura 3.13.

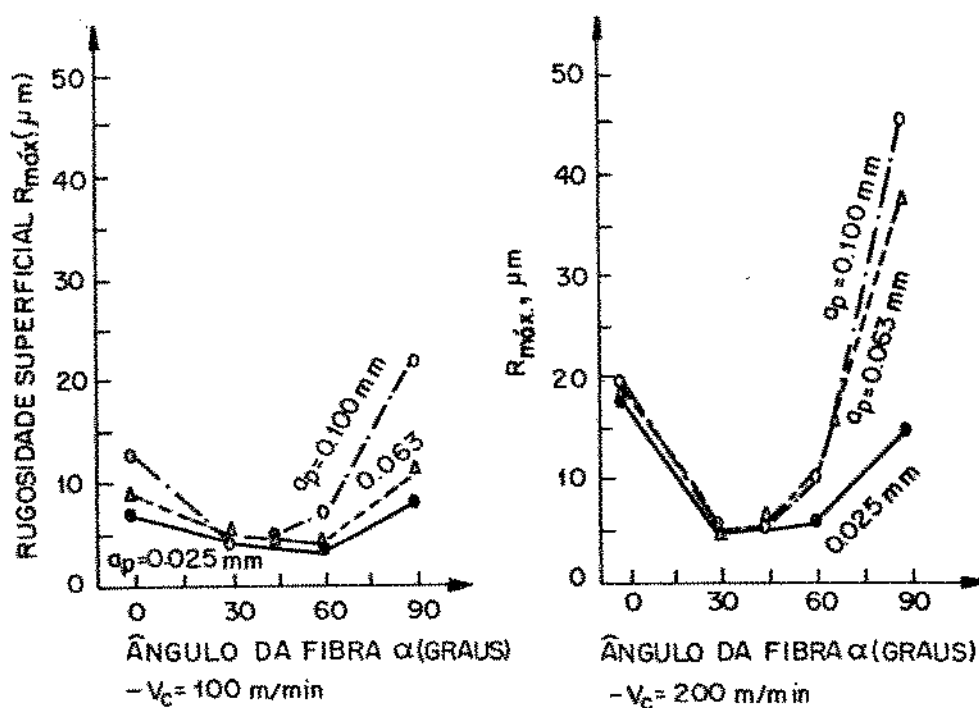


Figura 3.13 - Relação entre a rugosidade superficial e a direção das fibras. Avanço: 0,1 mm/rot, ângulo de saída:  $10^\circ$  [10].

A rugosidade superficial é mínima para a direção das fibras entre 30 e 60 graus. A rugosidade superficial aumenta com a

elevação do ângulo de direção das fibras e da profundidade de corte. Isto acontece devido ao aumento da tensão de compressão do material da peça sobre a ferramenta, quando da elevação do ângulo de direção da fibra. Com isto ocorrem indesejáveis delaminações com as fibras não cisalhadas, deixando a peça usinada com uma superfície mais áspera. O aumento da rugosidade superficial com o acréscimo da velocidade de corte é decorrente do amolecimento do material da peça, devido ao aumento de temperatura [10].

#### 3.4.4 - DESGASTE DA FERRAMENTA

Há um desgaste excessivo da ferramenta, quando a mesma é submetida ao corte de materiais compósitos reforçados por fibra, em especial o corte de plástico reforçado com fibra de vidro [6,14].

HASEGAWA [15], realizou vários experimentos para estudar o comportamento do desgaste em diversos materiais de ferramenta. Os ensaios constam de torneamento de tubos de diâmetros externo de 70 mm, e interno de 60 mm, confeccionados com resina epóxi ou poliéster, e reforçado com fibra de vidro. Os materiais das ferramentas utilizadas nos experimentos foram: aço rápido; metais duros classes ISO P10, K10, e M10; cermet; e cerâmica. A tabela 3.3 mostra as condições de corte do ensaio.

Tabela 3.3- Parâmetros de corte do ensaio [15].

DESCRIÇÃO	VALOR
Velocidade de corte (Vc)	variável
Profundidade corte (ap)	1 mm
Avanço (f)	0,15 mm/rot
Comprimento de corte (lc)	200 m
Geometria de corte: -Ângulo de saída ( $\gamma_0$ )	6°
-Ângulo de folga ( $\alpha_0$ )	15°

Os desgastes das ferramentas na usinagem de plástico reforçado com fibra apresentam característica abrasiva, e dependem da velocidade de corte e da área de contato entre a peça e a ferramenta. A figura 3.14 mostra o desenvolvimento dos desgastes das ferramentas em função da velocidade de corte.

Observou-se que os metais duros ensaiados apresentaram resultados satisfatórios na usinagem de plásticos reforçados com fibras de vidro. O aço rápido e a cerâmica apresentaram crescimento significativo do desgaste em velocidades de corte acima de 100 m/min. Em velocidades de corte da ordem de 50 m/min, o desgaste da ferramenta de cerâmica foi maior que a de aço rápido, cermet, e metal duro, respectivamente. Portanto, neste ensaio os melhores resultados foram obtidos com os metais duros das classes ISO M10 e K10.

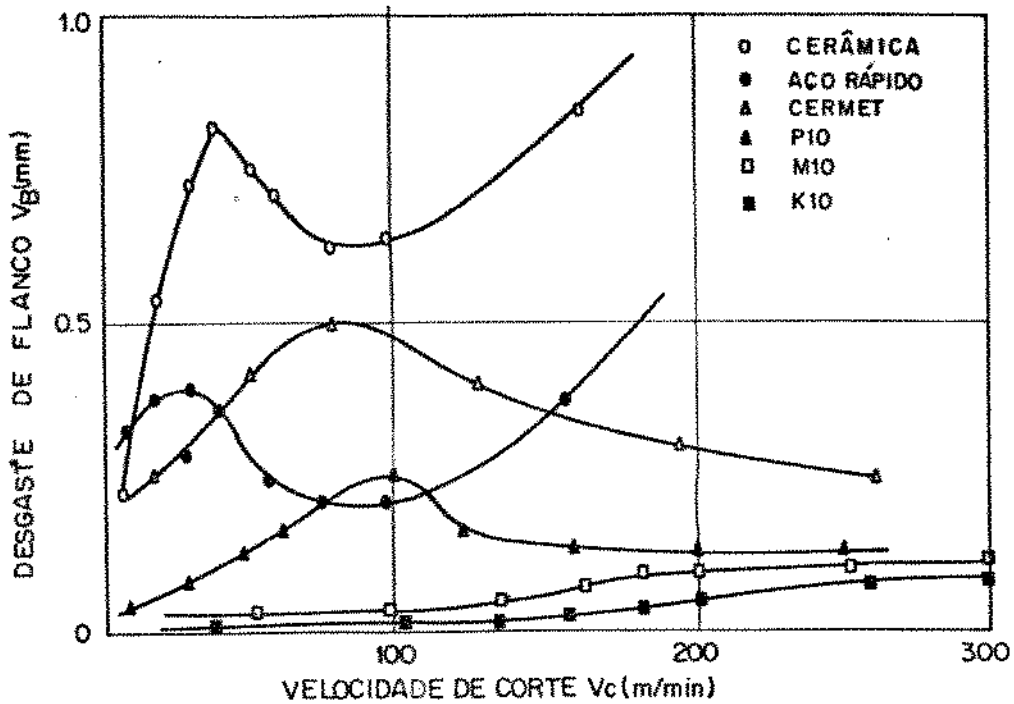


Figura 3.14 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte.  
Peça: Tubo de resina epóxi reforçada com fibra de vidro [15].

HASEGAWA [15], experimentou também a utilização de fluido de corte na usinagem de materiais compósitos reforçados com fibras. É de conhecimento da usinagem convencional que a função do fluido de corte é de refrigerar e lubrificar a zona de contato cavaco-ferramenta-peça, diminuindo assim o desgaste da ferramenta. Numa operação de torneamento de um tubo de poliéster reforçado com fibra de vidro, verificou-se a influência do fluido de corte no desgaste da ferramenta de metal duro classe ISO P10, conforme a figura 3.15.

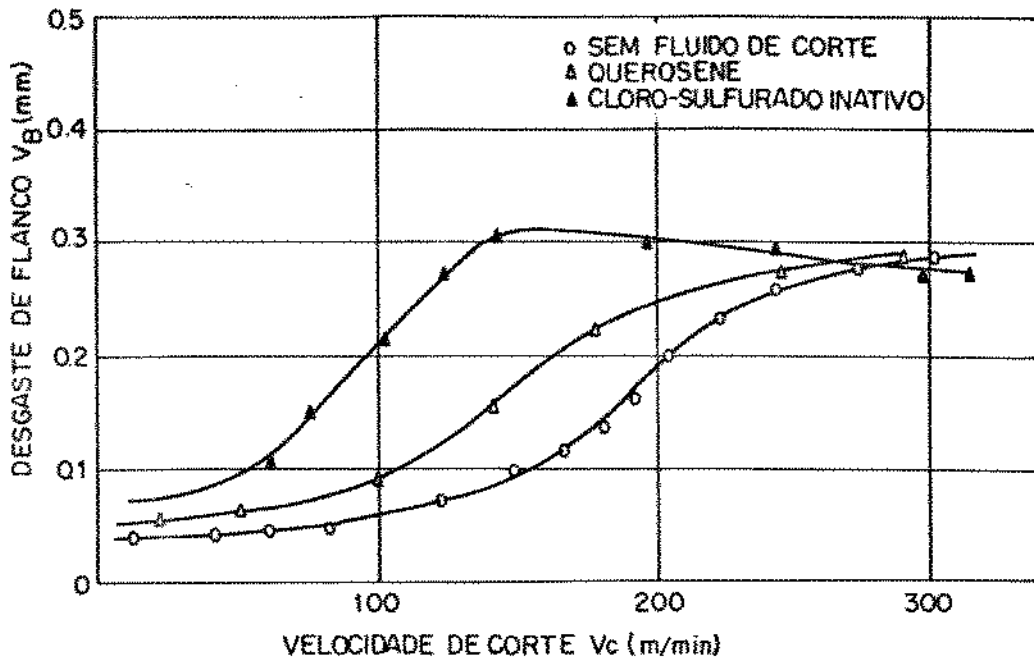


Figura 3.15 - Efeito do fluido de corte no desgaste da ferramenta [15].

O uso do fluido de corte na usinagem de poliéster reforçado com fibra de vidro, ao invés de diminuir, provocou um aumento do desgaste da ferramenta. Pois, quando se usina estes materiais com velocidade de corte acima de 80 m/min, tem-se um aumento da temperatura de corte de aproximadamente 400 °C, facilitando o corte através da perda de dureza da peça e não afetando o material da ferramenta. Portanto, com a presença do fluido de corte, inibi-se a perda de dureza do material usinado, provocando um aumento do desgaste da ferramenta [15].

### 3.5 - TORNEAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.5.1 - INTRODUÇÃO

Existe atualmente na engenharia um aumento da demanda de componentes confeccionados de compósitos à base de plásticos reforçados com fibras, e uma grande exigência com relação à tolerância dimensional e qualidade superficial desses componentes. Com isto surge a necessidade de uma operação de usinagem com o objetivo de alcançar uma qualidade necessária [8,9,18].

Apesar da crescente demanda, existem poucos resultados experimentais de usinagem de materiais compósitos a base de plásticos reforçados com fibras, especificamente em operações de torneamento.

WUNSCH [18], realizou um trabalho experimental de torneamento em plástico reforçado com fibra de vidro e carbono. As peças ensaiadas constituíam-se de laminados com fibras unidirecionais, e tubos bobinados com fibras. Com a experiência pode-se observar a influência das condições de corte e da orientação das fibras na rugosidade superficial da peça, e no desgaste da ferramenta.

#### 3.5.2 - TORNEAMENTO DE LAMINADO DE FIBRA DE VIDRO

A figura 3.16 mostra a seção transversal de um laminado com fibras unidirecionais com as possíveis posições de corte ferramenta-fibra ( ângulo  $\alpha$  ) numa operação de torneamento.

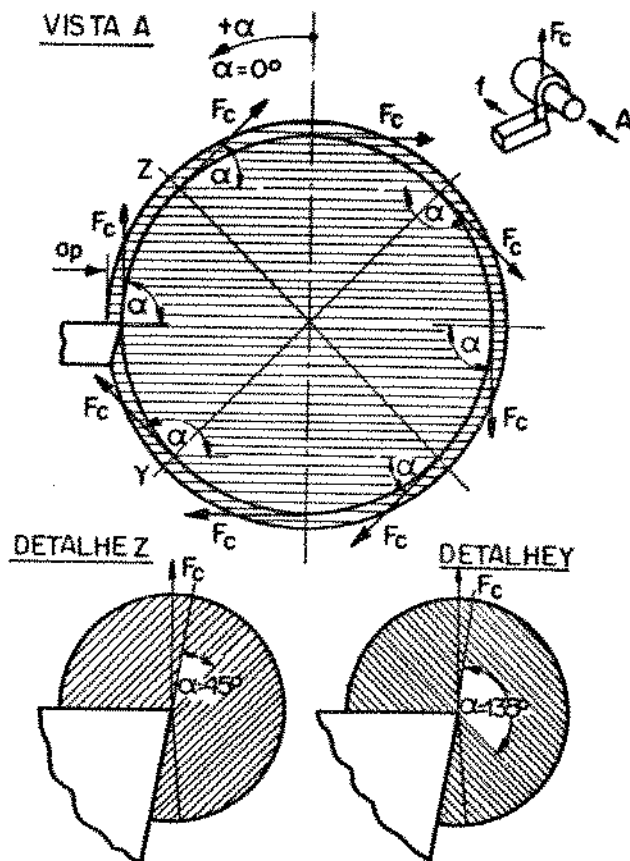


Figura 3.16 - Mecanismo de corte no torneamento de um laminado [18].

No torneamento de laminado com fibra unidirecional a qualidade superficial da peça não é função apenas das condições de corte, da geometria da ferramenta, do comportamento dinâmico da máquina, do desgaste da ferramenta, como também da orientação das fibras no laminado em relação à direção de corte. WUNSCH [18], ensaiou um laminado de poliéster reforçado com fibra de vidro, cujas propriedades são mostradas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Propriedades do laminado reforçado com fibra de vidro [18].

TIPO DE FIBRA	VIDRO	
	Epóxi	Poliéster
Tipo de Resina	Epóxi	Poliéster
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,90	1,40
Porcentagem de fibra (%)	70	50
Resistência à tração (MPa)	650	160
Módulo de elasticidade (GPa)	30	30
Coefic. exp. térmica (10 <sup>-5</sup> °K)	15	22

A influência da orientação das fibras em relação à direção de corte ( ângulo  $\alpha$  ) na rugosidade superficial da peça, é mostrado na figura 3.17. Observou-se que o nível de rugosidade superficial da peça, varia em função do ângulo de posição das fibras. Para ângulos de fibras de 0, 90, 180, 270, e 360 graus, a rugosidade superficial obtida é baixa. O contrário acontece com ângulos de posição de fibras de 45 e 225 graus, onde a rugosidade superficial é bem maior que a registrada anteriormente. Isto se deve ao fato que nestas posições as fibras estão mais susceptíveis à delaminações. A dependência da rugosidade superficial com a orientação das fibras é mais pronunciada com o crescimento do avanço, fenômeno análogo ao que ocorre no corte dos metais.



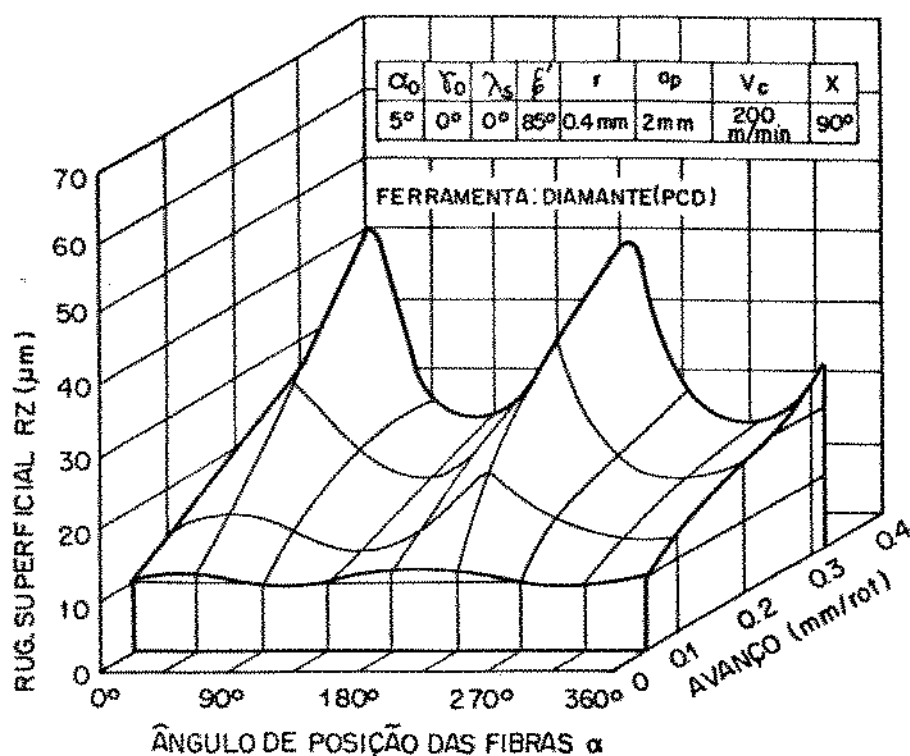


Figura 3.17 - Rugosidade superficial em função da direção das fibras [18].

WUNSCH [18], realizou outro experimento para investigar o desgaste da ferramenta no torneamento de um laminado de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, cujas propriedades estão descritas na tabela 3.4. Num teste preliminar foi usada uma ferramenta cerâmica à base de nitreto de silício, que teve um fraco desempenho, apresentando uma falha instantânea. Por outro lado, as ferramentas de metal duro classe ISO K10, nitreto de boro cúbico (CBN), e diamante policristalino (PCD), obtiveram bons resultados.

Os desgastes das ferramentas, as respectivas vidas para um determinado critério de desgaste, são mostradas na figura 3.18.

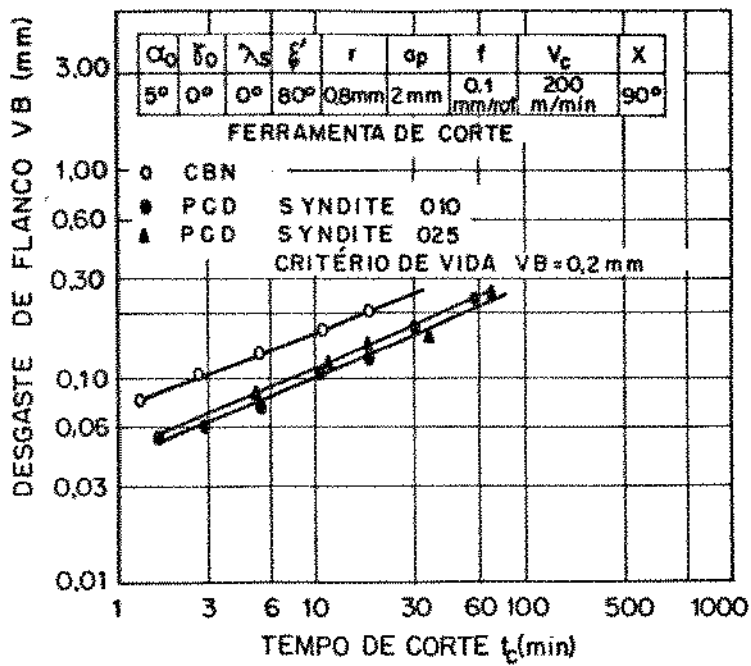


Figura 3.18 - Desgaste de flanco das ferramentas em função do tempo de corte [18].

A ferramenta de diamante policristalino (PCD) teve uma vida 2,5 vezes maior que a de nitreto de boro cúbico (CBN), para uma velocidade de corte de 200 m/min. Isto é explicado pela menor dureza do CBN em relação ao diamante. Quanto a granulometria do policristalino de diamante, teve pouca influência no desgaste da ferramenta. Já um fator muito importante a ser considerado, é a estabilidade térmica da ferramenta durante o corte, principalmente quando se trata de corte com ferramenta de diamante [12,18].

### 3.5.2 - TORNEAMENTO DE TUBO BOBINADO COM FIBRA DE CARBONO

Os tubos bobinados com plásticos reforçados com fibras, tem um largo campo de aplicação em engenharia, principalmente em poder conciliar duas propriedades importantes como resistência e rigidez. Uma de suas aplicações é na confecção de recipientes e vasos de alta pressão [17]. Para assegurar a qualidade na fabricação desses componentes há necessidade de uma operação posterior de usinagem, por isto, o estudo dos fatores que influem no processo de usinagem é de suma importância [8,9,18].

WUNSCH [18], estudou a influência do ângulo de bobinamento do tubo na rugosidade superficial da peça e no desgaste da ferramenta. Num ensaio de torneamento de um tubo bobinado com fibra de carbono, com propriedades descritas na tabela 3.5, a rugosidade superficial da peça variou com o ângulo de bobinamento do tubo e com o avanço de corte, conforme a figura 3.19.

Tabela 3.5 - Propriedades da fibra de carbono [18].

DESCRIÇÃO	VALOR
Diâmetro da fibra ( $\mu\text{m}$ )	6,8
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,79
Resistência tração (MPa)	3.100
Módulo elasticidade (GPa)	235

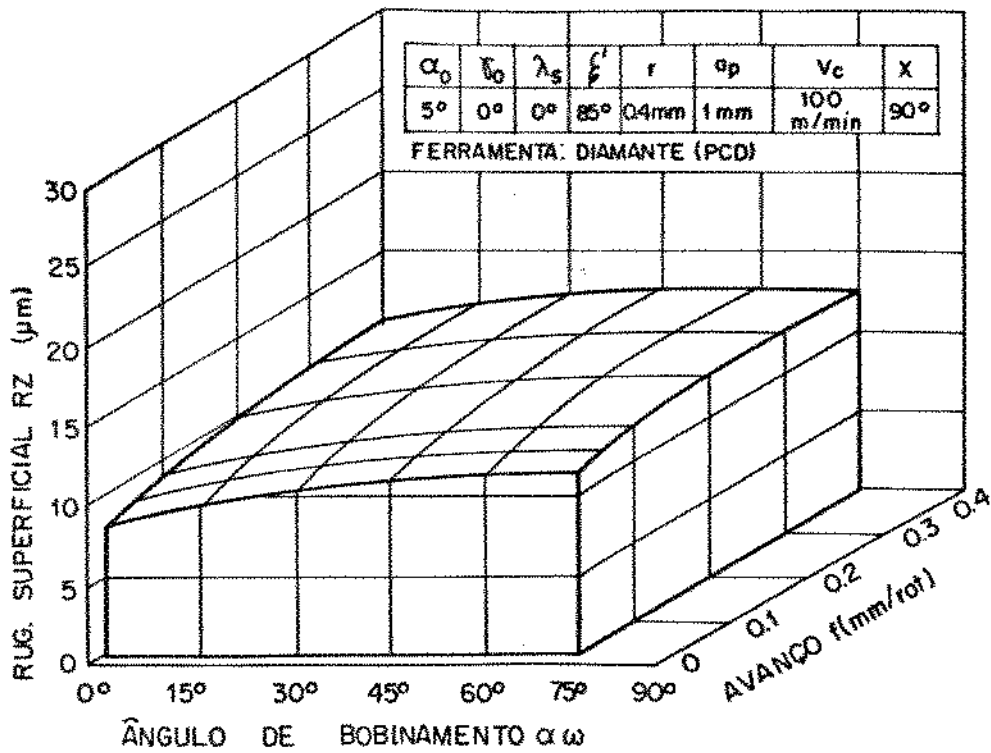


Figura 3.19 - Rugosidade superficial em função do ângulo de bobinamento do tubo [18].

A rugosidade superficial variou pouco com o avanço, entretanto, variou mais com o ângulo de bobinamento do tubo. Para uma variação do ângulo de bobinamento do tubo de 0 para 75 graus, a rugosidade superficial aumentou aproximadamente de 40%.

Em outro ensaio, observou-se a influência do ângulo de bobinamento do tubo no desgaste da ferramenta. O ensaio consta do torneamento de um tubo bobinado com fibra de carbono usando uma ferramenta de metal duro ISO K10. A figura 3.20 mostra a influência do ângulo de bobinamento do tubo no desgaste da ferramenta, tomando como critério uma vida da ferramenta de 2 minutos.

O desgaste da ferramenta aumenta com o ângulo de

bobinamento do tubo, sob o ponto de vista da usinagem quanto menor o ângulo de bobinamento, menor o desgaste, e maior a vida da ferramenta.

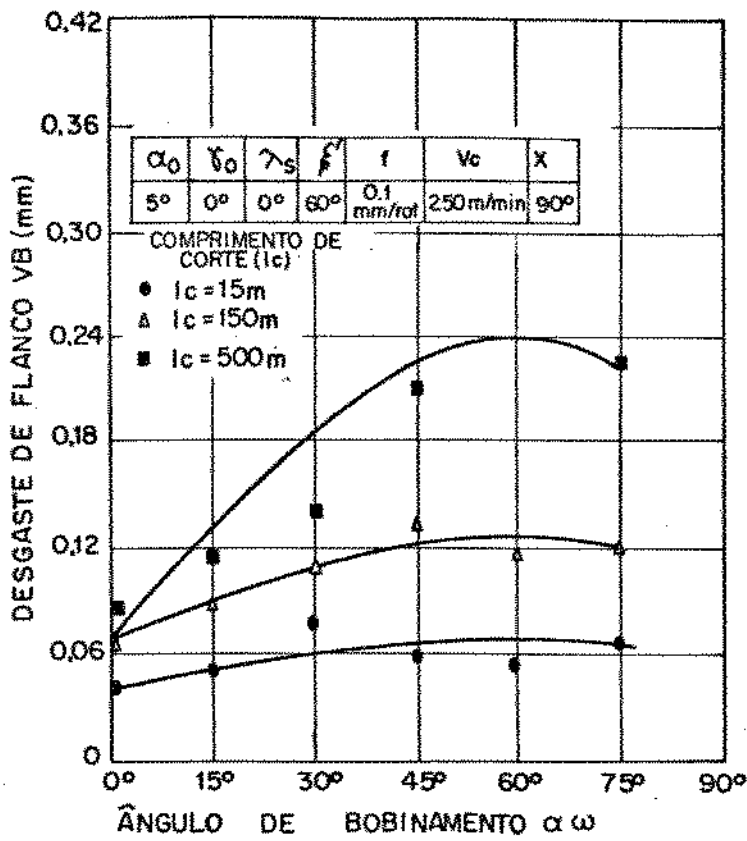


Figura 3.20 - Desgaste de flanco em função do ângulo de bobinamento do tubo [18].

### 3.6 - OUTROS PROCESSOS DE USINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS

#### 3.6.1 - CORTE

Existem vários métodos de corte para materiais compósitos, dentre os convencionais podemos citar o serramento, utilizando serras de fita, serras circulares, e serras tico-tico. Para que as

ferramentas tenham uma larga vida útil, o material para sua construção dependerá do tipo de compósito a ser cortado. As serras de fita circulares e tico-tico devem ser de aço rápido para cortar kevlar, e de dentes postiços de metal duro nas extremidades de corte para cortar vidro ou carbono. É da maior importância manter as ferramentas sempre bem afiadas, para se ter cortes de boa qualidade e minimizar a possibilidade de delaminações [6].

A seguir tem-se uma ligeira apresentação dos métodos mais comuns para cortar materiais compósitos [1,6]:

a) JATO D'AGUA: Esse sistema utiliza água comprimida à uma pressão entre 200 e 350 MPa. A água depois de passar por um orifício de aproximadamente 0,2 mm de diâmetro, torna-se um filete que será a ferramenta de corte. Esse sistema é capaz de cortar materiais compósitos e termoplásticos de maneira eficiente e sem produzir delaminações. Um outro aspecto, é o fato de proporcionar um corte limpo, sem poeira ou fumaça, e sem induzir tensões mecânicas ou queimar o material. E também a ferramenta de corte, no caso o filete d'água nunca perde o corte.

b) SERRA DE FITA: As serras para corte de materiais compósitos devem ter de 14 a 22 dentes por polegada, e operadas em alta rotação. As lâminas de dentes espaçados com 4 a 6 dentes por polegadas, quando usadas em laminados de fibra de vidro finos causam delaminações. Todavia, as lâminas ficam cegas rapidamente por causa do reduzido número de dentes por unidade de comprimento.

As lâminas de dentes finos, com 14 a 22 dentes normalmente são utilizadas no corte de materiais ferrosos e laminados de fibra

de vidro. Devido ao seu grande número de dentes por unidade de comprimento, a abrasividade dos materiais compósitos tem menor efeito no desgaste da lâmina de serra, não ficando cega tão rapidamente.

Geralmente são empregadas lâminas de serra com dentes postiços de metal duro, que cortam uma grande variedade de materiais, inclusive materiais compósitos. As lâminas com dentes postiços de metal duro podem ser de dois tipos: serra boca de lobo para corte geral em materiais com mais de 6mm de espessura, e serra contínua para cortar materiais de pequena espessura (Figura 3.21).

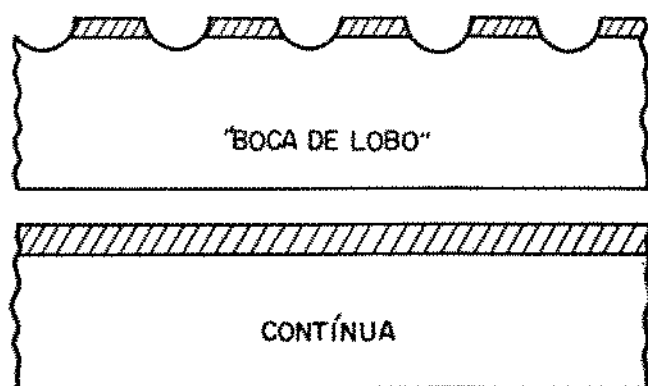


Figura 3.21 - Lâmina com extremidade de metal duro [1].

c) FRESADORAS PNEUMÁTICAS: Elas realizam uma variedade de cortes combinando ferramentas e cortadores específicos. Os tipos mais comuns funcionam entre 25.000 e 30.000 rpm, sendo citados alguns deles:

- Discos diamantados: Corta laminados de vidro e carbono, mas não é aplicado em kevlar. Esses discos são de custos elevados, e se sofrerem alguma queda poderão empenar, causando vibração em altas

rotações e delaminando a peça. Este tipo de disco foi utilizado no corte dos corpos de prova de tecido laminado;

- Discos de corte: Com fios de corte em carboneto de tungstênio, são usados em todos materiais compósitos;

- Fresas de contorno: Para corte e fresamento para todo tipo de material compósito. Essas ferramentas são de aço com alto teor de carbono ou de metal duro;

- Serra tico-tico: Constitui um outro método eficaz no corte dos materiais compósitos. A serra tico-tico deve ter capacidade acima de 2.500 golpes por minuto, o que é necessário para laminados finos. Lâminas para corte de fibras de vidro e carbono devem ter extremidade de metal duro.

### 3.6.2 - ESCARIAMENTO

O escariamento correto de furos em materiais compósitos é tão importante quanto em materiais metálicos. Um furo escariado deve ser produzido de acordo com o ângulo, a profundidade, e o acabamento adequado do prendedor. Laminados fabricados de kevlar especialmente, após o escariamento apresentam delaminações que se não forem removidas, impedem o perfeito acomodamento dos prendedores. Os compósitos, com exceção do kevlar, são abrasivos e exigem o uso de ferramentas de corte de metal duro. Ferramentas de corte diamantadas também realizam um bom trabalho em materiais abrasivos como o vidro e o carbono. Contudo não funcionam para o kevlar, mas por outro lado o kevlar pode ser escariado usando ferramentas de corte convencionais de aço rápido [6].



A velocidade da ferramenta de corte é um fator importante em operações de escariamento. Ela é função do tipo de material a ser cortado e do tipo de ferramenta usada. De acordo com LÉLIS [1] tem-se:

- Ponta de metal duro usinando kevlar/carbono/vidro: rotação de 100 a 750 rpm;
- Ponta diamantada usinando carbono/vidro: rotação de 3.000 a 5.000 rpm;
- Ferramenta de aço rápido usinando kevlar: rotação de 100 a 750 rpm com refrigeração.

As operações de escariamento devem ser sempre realizadas usando um porta-ferramentas pré-ajustado com uma unidade de limitação micro-métrica, para assegurar a repetibilidade de profundidade e concentricidade do escariado.

### 3.6.3 - REBARBAÇÃO

Da mesma forma como acontece para peças metálicas, os compósitos também precisam de operações de rebarbação nos furos e extremidades, porém exigem técnicas e ferramentas diferentes.

Peças em materiais compósitos tendem a delaminar nos pontos de entrada e saída dos furos, apresentando felpas nas extremidades devido ao corte. Os laminados devem ser lixados em ambas as superfícies, sendo cada superfície lixada individualmente numa atitude de corte que obrigue a fibra dirigir-se para o interior do laminado. Deve-se ter cuidado no caso de alguns materiais, tais como as fibras de vidro e carbono, que tendem a se delaminar [1].

Os processos de rebarbação mais utilizados em materiais compósitos são [6]: o lixamento manual e o mecânico. No lixamento manual geralmente usa-se lixa de carboneto de silício de granulação 240, sendo a mais indicada a lixa d'água. No lixamento mecânico, geralmente usa-se lixa de granulação 240 em disco de 2 polegadas, com rotação de 20.000 rpm ou mais. No caso de lixamento mecânico é importante observar o ângulo entre o disco e o laminado (Figura 3.22-a), e certificar o movimento de translação da lixadeira com o de rotação do disco no sentido de não puxar as fibras (Figura 3.22-b).

Fig. 3.22-a.

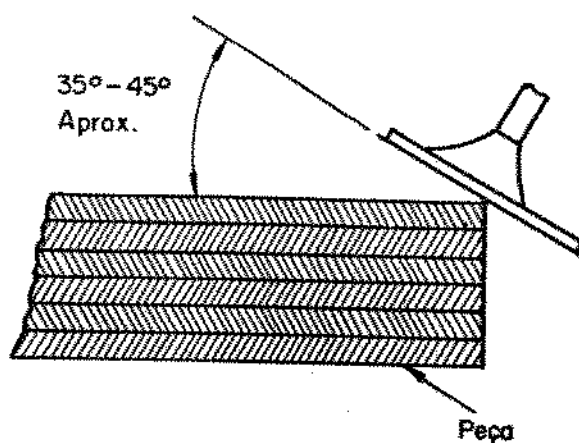


Fig. 3.22-b.

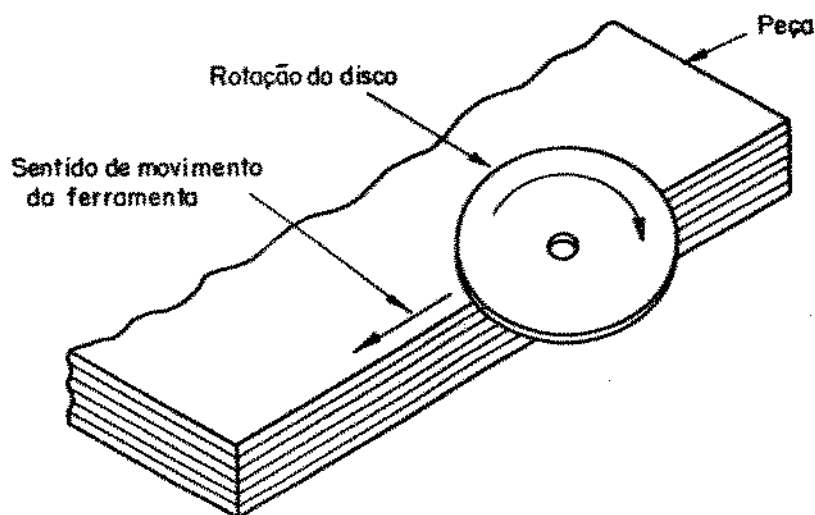


Figura 3.22 - Rebarbação de extremidades [6].

## CAPÍTULO IV

### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 - MATERIAIS

O material ensaiado foi um compósito à base de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono, com as seguintes especificações:

##### a) ESPECIFICAÇÃO DO REFORÇO:

- Tecido: Híbrido de fibras de vidro e carbono;
- Fornecedor: Ciba Geigy Tipo 64-BZ;
- Peso:  $172 \text{ g/m}^2$ ;
- Espessura: 0,18 mm;
- Largura do Rolo: 1000 mm;
- Resistência à Tração: - Urdume: 100 kg/cm;  
- Trama: 26 kg/cm.

As fibras de vidro e carbono estão dispostas no tecido conforme a figura 4.1.

##### b) ESPECIFICAÇÃO DA MATRIZ:

- Resina: Fenólica;
- Tipo: Resol;
- Solvente: Etanol;

- Densidade: 1,05 a 1,15 g/cm<sup>3</sup>.

c) ESPECIFICAÇÃO DO COMPÓSITO:

- Teor de Resina, em Massa: 35 a 40 %;
- Dureza: > 50 Shore D;
- Densidade: 1,4 a 1,5 g/cm<sup>3</sup>;
- Teor de Material não Curado: 0,5 %.

Os corpos de prova foram confeccionados em duas formas diferentes: tecido bobinado e tecido laminado.

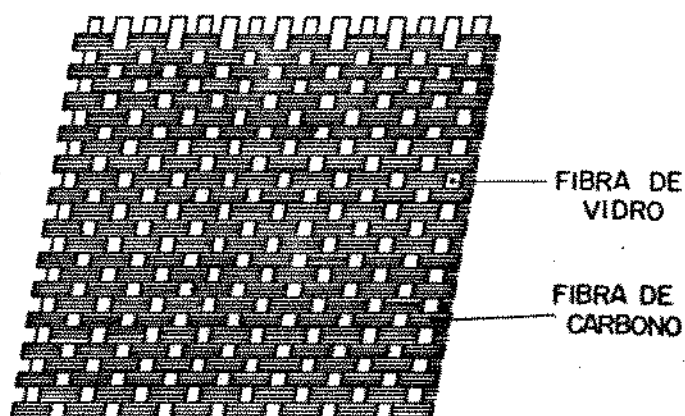


Figura 4.1 - Tecido híbrido de fibra de vidro e carbono.

4.1.1 - PREPARARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA BOBINADOS

Primeiramente, o tecido híbrido de fibra de vidro e carbono foi impregnado com resina fenólica nas devidas proporções citadas anteriormente. Em seguida, o tecido pré-impregnado com 1000 mm de

largura foi cortado em tiras de aproximadamente 125 mm, para ser bobinado. O processo de bobinamento foi realizado num dispositivo de "Filament Winding", como mostra a figura 4.2. No momento do bobinamento o pré-impregnado sofreu simultaneamente, um pré-aquecimento (temperatura de 80°C) e uma pequena pressão para auxiliar a compactação do bobinado.

Depois de bobinado os corpos de prova em número de quatro, foram colocados dentro de uma camisa de borracha, para em seguida serem curados numa Hidroclave.

A Hidroclave é um equipamento usado para curar materiais compósitos, onde os mesmos ficam sujeitos à pressões e temperaturas controladas, com o objetivo de se ter a maior homogeneidade possível do material. Os corpos de prova bobinados foram curados sob pressão de 70 bar, e temperatura de 165 °C, durante 3 horas.

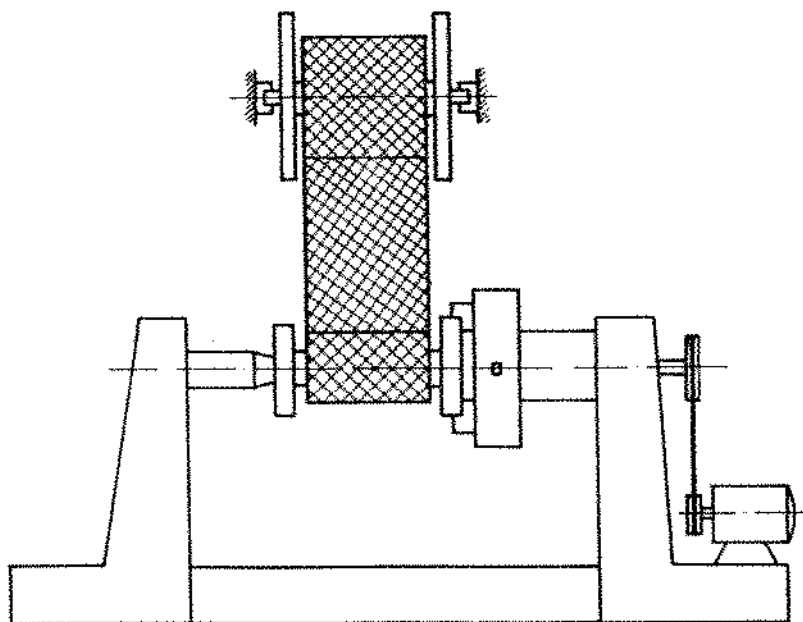


Figura 4.2 - Bobinamento do corpo de prova.

Os corpos de prova depois de curados e preparados apresentam as dimensões mostradas na figura 4.3.

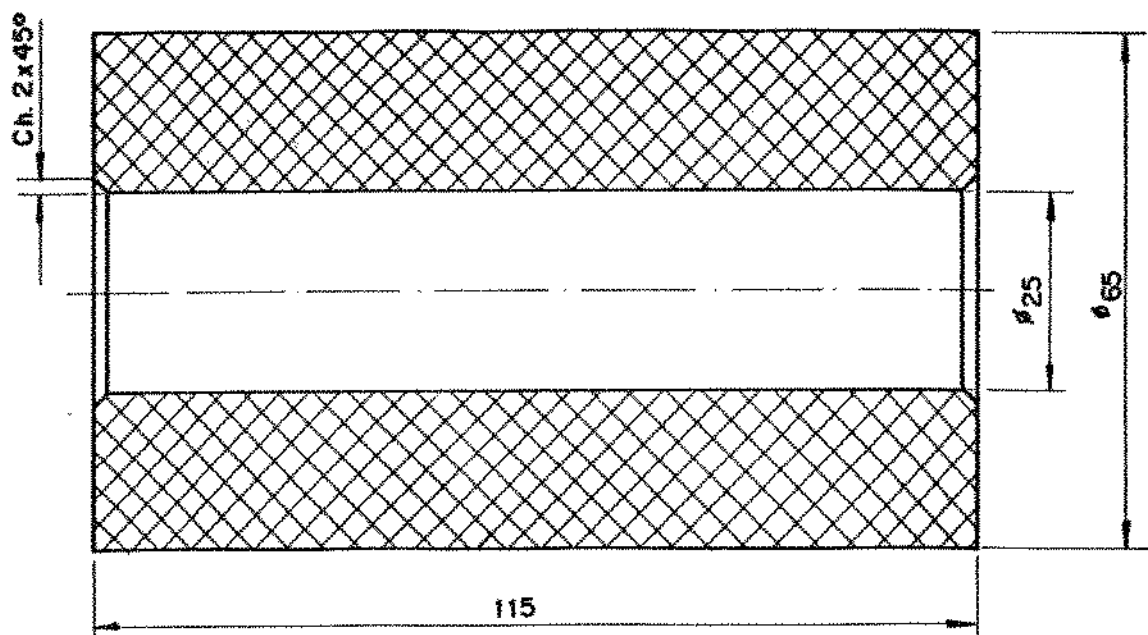


Figura 4.3 - Corpo de prova com tecido bobinado.

#### 4.1.2 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA LAMINADOS

O tecido pré-impregnado utilizado na confecção dos corpos de prova laminados foi o mesmo utilizado nos corpos de prova bobinados, ou seja, resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono.

Inicialmente, o tecido pré-impregnado foi cortado na forma de lâminas quadradas de 350 mm de largura por 0,2 mm de espessura. Em seguida cada lâmina foi sendo depositada uma sobre a outra, obtendo assim uma placa de compósito com aproximadamente 300 camadas de tecido, conforme mostra a figura 4.4.

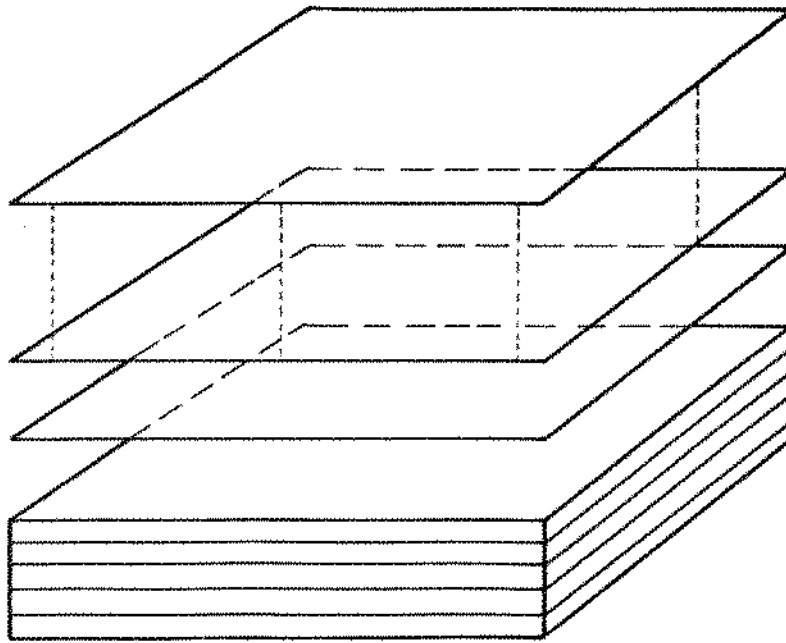


Figura 4.4 - Impregnação manual do compósito.

A placa de compósito depois de laminada manualmente, foi curada sob pressão de 100 bar e temperatura de 175°C durante 3 horas. A placa na sua forma final é mostrada na figura 4.5.

Em seguida a placa foi cortada em dez blocos retangulares (figura 4.6), utilizando para este processo de corte um disco diamantado.

Para se chegar na forma cilíndrica torneou-se os blocos retangulares, obtendo o laminado cilíndrico, e por último todos os corpos de prova foram furados, chegando-se na sua forma final como mostra a figura 4.7.

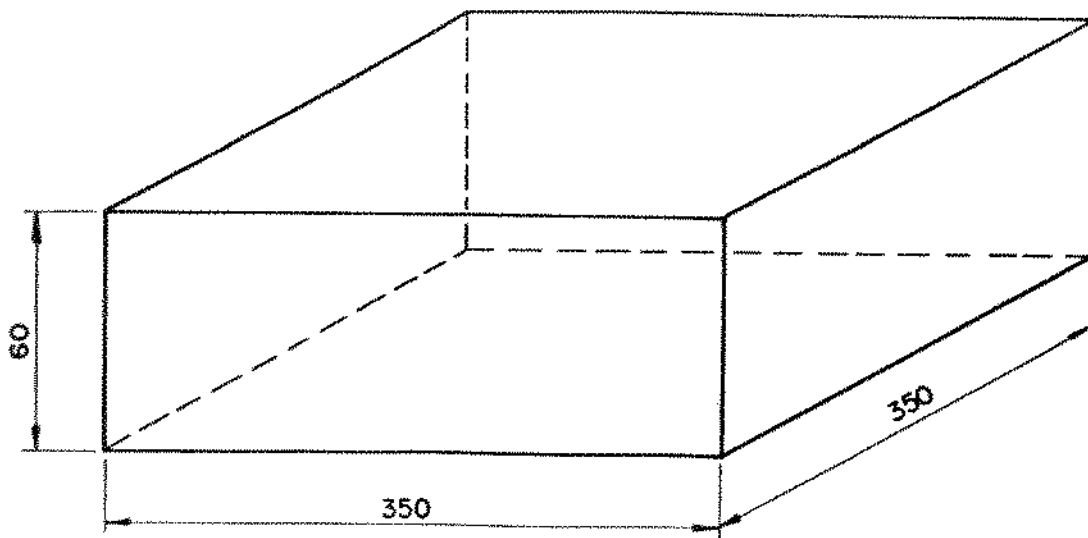


Figura 4.5 - Placa de compósito após a cura.

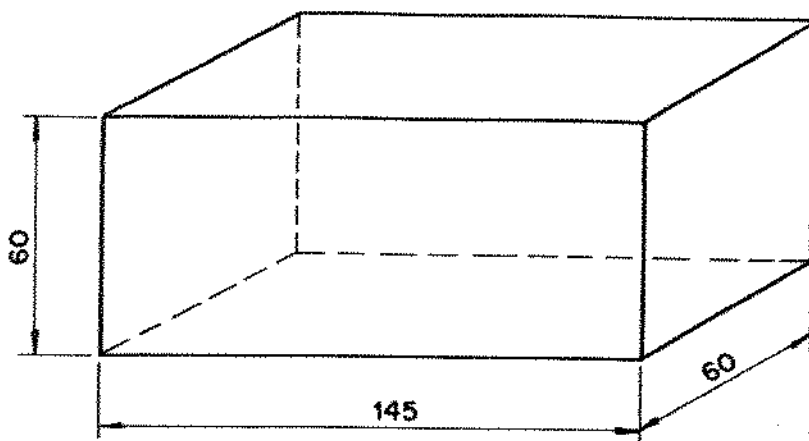


Figura 4.6 - Compósito na forma de bloco retangular.

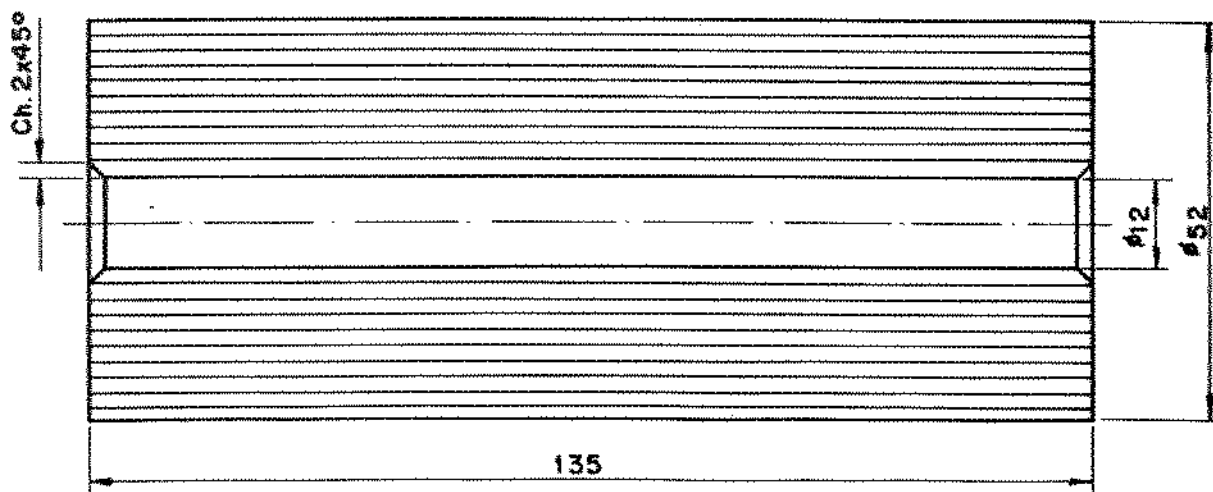


Figura 4.7 - Corpo de prova com tecido laminado.



## 4.2 - FERRAMENTAS E DISPOSITIVOS.

### 4.2.1 - OPERAÇÃO DE CORTE.

Na operação de corte dos corpos de prova laminados foi utilizado um disco diamantado com as seguintes especificações:

- Disco: código FEPA S1A1R;
- Alma: Aço ABNT 1020;
- Tipo de diamante: FEPA d301 S;
- Rotação: 1800 RPM;
- Diâmetro:  $\phi$  300 mm;
- Espessura: 1,9 mm;
- Fabricante: Winter do Brasil Ltda.

### 4.2.2 - OPERAÇÃO DE FURAÇÃO.

Na operação de furação dos corpos de prova laminados foram utilizadas duas brocas helicoidais de aço rápido, uma com cobertura de nitreto de titânio (TiN), e a outra sem cobertura, ambas com as seguintes especificações:

- Material: Aço rápido ABNT M2;
- Haste: cilíndrica;
- Diâmetro: 12 mm;
- Comprimento da hélice: 100 mm;
- Comprimento total: 150 mm;
- Ângulo de ponta:  $118^\circ$ ;

- Ângulo de saída: 8 a 12°;
- Ângulo da hélice: 28°;
- Haste: cilíndrica;
- Revestimento: Nitreto de Titânio (TiN) - processo PVD-BRASIMET;
- Fabricante: SKF Ferramentas s/a.

#### 4.2.3 - OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO.

Na operação de torneamento dos corpos de prova bobinados foram utilizados sete materiais de ferramentas diferentes, conforme descrição à seguir:

- Metal duro classe ISO k10 - Sandvik S1P;
- Cerâmica pura ( $Al_2O_3 + ZrO_2$ ) - Sandvik CC 620;
- Cerâmica mista ( $Al_2O_3 + TiC$ ) - Sandvik CC 650;
- Cerâmica reforçada com whiskers ( $Al_2O_3 + SiC$ ) - Sandvik CC 670;
- Cerâmica à base de nitreto de silício (SIALON) - Sandvik CC 680;
- Nitreto de boro cúbico (CBN) - Borazon GE 6320 -Difer Diamantes;
- Diamante policristalino (PCD) - Compax GE 1321 -Difer Diamantes;

Todas ferramentas ensaiadas tinham a mesma geometria, que segundo a norma ISO 1832/1985 apresentam a seguinte especificação:

- Inseto: SNUN 120412 (metal duro, CBN, e PCD);  
SNGN 120712 (cerâmicas).
- Porta-Ferramenta: CSRNL 2525M12;

Na operação de torneamento dos corpos de prova laminados foram utilizados três materiais de ferramentas, sendo eles:

- Metal duro classe ISO k10 - Sandvik S1P;
- Cerâmica reforçada com whiskers de SiC - Sandvik CC 670;
- Diamante policristalino (PCD) - Compax GE 1321 -Difer Diamantes;

A geometria das ferramentas são idênticas as citadas anteriormente: inserto ISO SNUN 120412 para metal duro e PCD; SNGN 120712 para cerâmica, e porta ferramenta ISO CSRNL 2525M12.

Na operação de torneamento foram utilizados dois dispositivos de fixação, um para o corpo de prova bobinado (figura 4.8), e o outro para o corpo de prova laminado (figura 4.9).

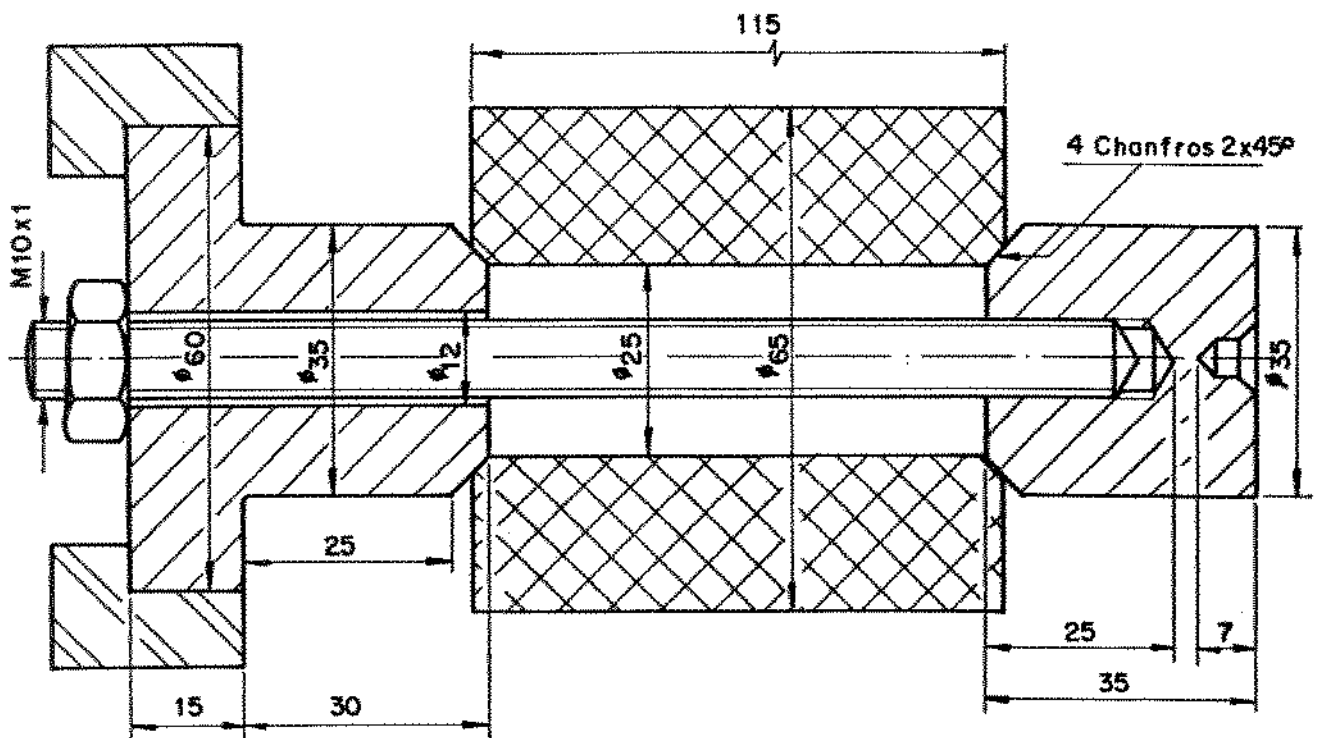


Figura 4.8 - Dispositivo para fixação do corpo de prova de tecido bobinado.

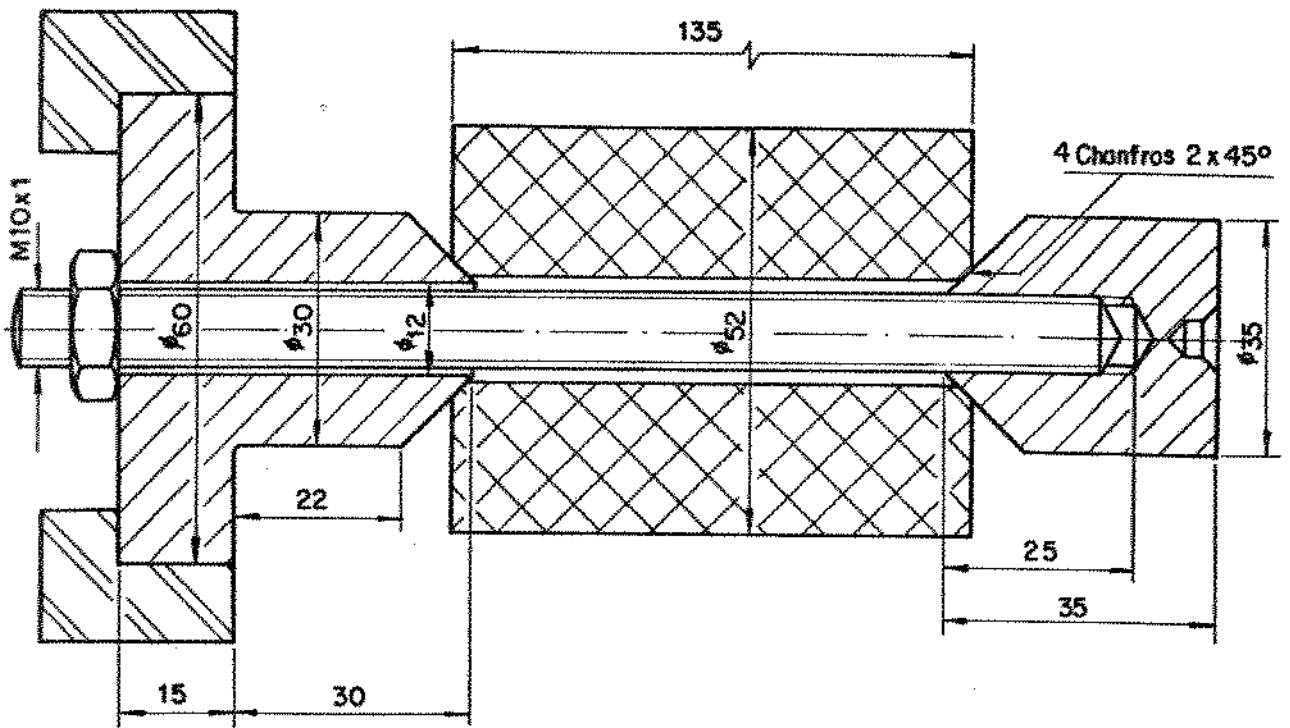


Figura 4.9 - Dispositivo para fixação do corpo de prova de tecido laminado.

#### 4.3 - EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS

A tabela 4.1 descreve os equipamentos e os instrumentos utilizados nos ensaios.

Tabela 4.1 - Equipamentos e Instrumentos.

EQUIP./INSTRUMENTOS.	DESCRIÇÃO
Torno CNC	ROMI Cosmos 30 - Potência de 30 HP.
Rugosímetro	Mitutoyo Surf Test 211 - Digital.
Microscópio	Carl Zeiss Jena, Digital, duas coordenadas, ampliação de 30 vezes.
Dinamômetro	C/ Extensômetros, Digital, Portátil, medição da força de avanço (kgf).
Aspirador de Pó	Wap Turbo 1001, Industrial, Potência de 930 W, e Sucção de 3000 l/min.
Equipamentos de Proteção Individual	Máscaras, Óculos, Aventais, e Luvas.

#### 4.4 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS

##### 4.4.1 - CORPO DE PROVA COM TECIDO BOBINADO

a) Torneamento do Compósito com Diversos Materiais de Ferramentas.

Neste ensaio fez-se uma comparação do desempenho de sete ferramentas de materiais diferentes, sendo elas de: metal duro classe ISO K10; cerâmica pura; cerâmica mista; cerâmica reforçada com whiskers de SiC; SIALON; CBN; e diamante (PCD).

Primeiramente, foi estipulada uma condição de corte constante para todas as ferramentas, velocidade de corte  $V_c=320$  m/min,

avanço  $f = 0,1$  mm/rot, e profundidade de corte  $a_p = 1$ mm. Para cada condição de ensaio ferramenta-peça foram medidos o desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial da peça, e a componente da força de avanço. Com isto, pode-se observar a variação do desgaste, da rugosidade superficial, e da força, com o comprimento de corte usinado.

O desgaste da ferramenta foi medido num microcópico digital Carl Zeiss com ampliação de 30 vezes. A rugosidade superficial da peça foi medida num rugosímetro Mitutoyo SurfTest 211, e a força de avanço foi medida por um dinamômetro portátil com extensômetros.

A frequência das medidas de desgaste e rugosidade superficial variou de acordo com o comportamento da ferramenta na usinagem. Para as cerâmicas, as medidas foram realizadas a cada 200 m de corte; para o metal duro, CBN, e diamante, as medidas foram realizadas a cada 400 m; enquanto que a força de avanço foi medida passe a passe. A rugosidade superficial foi medida em três posições na direção axial, e em três posições à  $120^\circ$  entre si na direção radial da peça, conforme mostra a figura 4.10

O comprimento de corte usinado por cada ferramenta no ensaio foi previamente estimado em torno de 2000 m ( $t_c = 5,7$  min), no entanto aconteceram casos de desgastes excessivos, em que a ferramenta não atingiu esta marca. Deve ser ressaltado que o diâmetro dos corpos de prova não foi constante para cada ferramenta.

b) Torneamento do Compósito em várias Velocidades de Corte.

Neste ensaio foram utilizadas duas ferramentas, diamante e metal duro, para verificar a influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta e na rugosidade superficial da peça.

No ensaio com ferramenta de metal duro foram usadas cinco velocidades de corte ( $V_c$ ): 25, 100, 200, 320, e 600 m/min. E para a ferramenta de diamante, também foram usadas cinco velocidades de corte ( $V_c$ ): 100, 200, 320, 400, e 500 m/min; mantendo-se constante nos dois ensaios o avanço  $f = 0,1$  mm/rot, e a profundidade de corte  $a_p = 1$  mm. Para cada velocidade de corte ensaiada, foram medidas a rugosidade superficial da peça e o desgaste da ferramenta, para um comprimento de corte  $l_c = 300$  m, sendo cada condição de ensaio repetida três vezes.

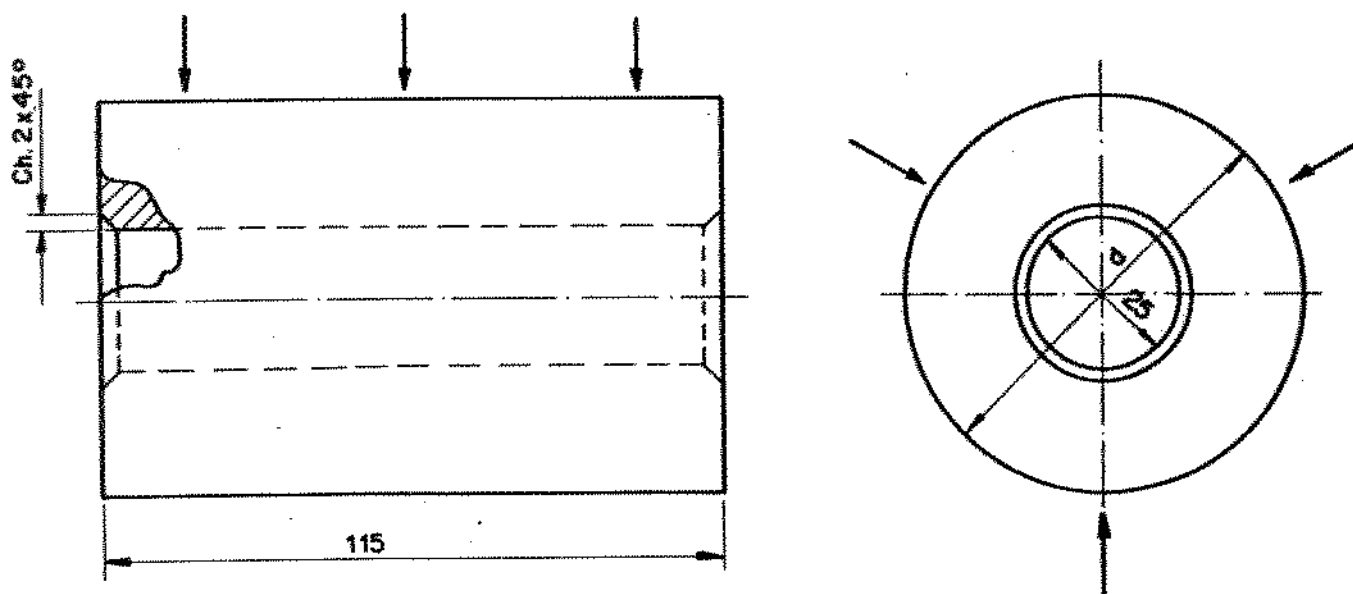


Figura 4.10 - Pontos de medida da rugosidade superficial no corpo de prova com tecido bobinado.

#### 4.4.2 - CORPO DE PROVA COM TECIDO LAMINADO

##### a) Ensaio de Furação do Compósito.

Neste ensaio, os furos foram executados segundo a direção axial da peça, coincidente com a direção de laminação das fibras. No ensaio foram usadas duas brocas helicoidais de aço rápido: uma com cobertura e a outra sem cobertura de nitreto de titânio (TiN).

A furação foi realizada em operação pica-pau com percurso de avanço de 18 mm, tendo o comprimento total do furo 68 mm, como mostra a figura 4.11. As demais condições do ensaio foram: velocidade de corte  $V_c = 15$  m/min; avanço  $f = 0,13$  mm/rot; e diâmetro do furo  $\phi = 12$  mm; especificada pelo catálogo do fabricante [16].

Durante o ensaio foram medidos os desgastes das brocas com e sem cobertura de TiN. As medidas foram realizadas em intervalos aproximados de comprimento de avanço  $l_f = 130$  mm, que corresponde à um corpo de prova, sendo que cada broca furou quatro corpos de prova.



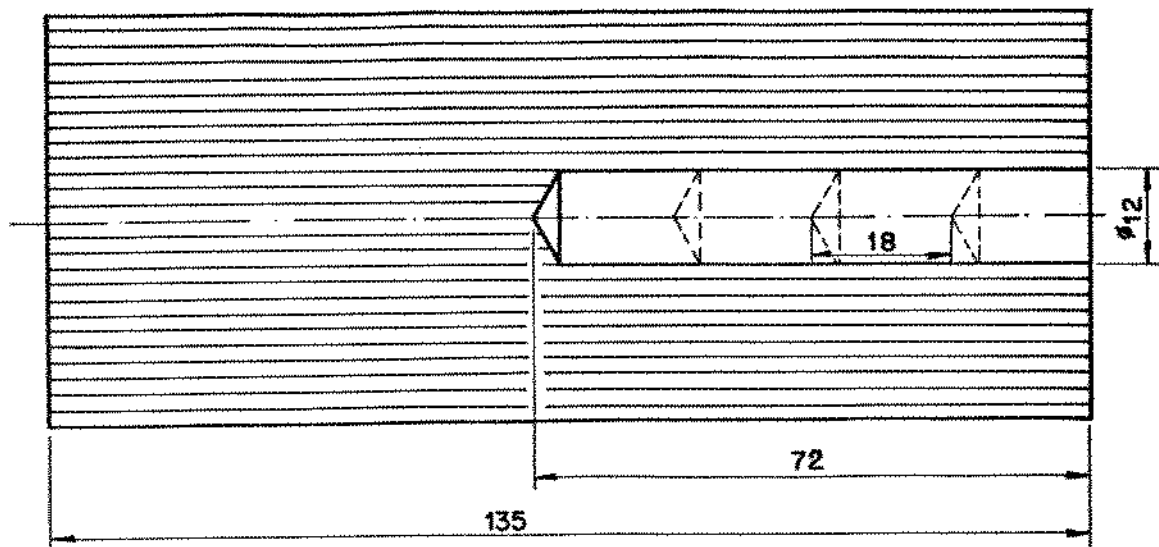


Figura 4.11 - Processo de furação do compósito de tecido laminado.

b) Torneamento do Compósito com Tecido Laminado com várias Ferramentas.

Neste ensaio foram utilizadas as ferramentas que apresentaram melhor desempenho no torneamento do compósito de tecido bobinado, com exceção do CBN. Foram utilizadas: metal duro K10; cerâmica reforçada com whiskers de SiC; e o diamante policristalino (PCD).

As condições de corte foram idênticas para as três ferramentas: velocidade de corte  $V_c = 320$  m/min; avanço  $f = 0,1$  mm/rot; e profundidade de corte  $a_p = 1$  mm.

Neste ensaio pode-se comparar o desempenho das ferramentas

no torneamento do compósito de tecido laminado , com o obtido na usinagem do tecido bobinado. Durante o ensaio foram medidos o desgaste da ferramenta, a rugosidade superficial da peça e a força de avanço. As metodologias de medições do desgaste e da força foram similares ao ensaio do compósito de tecido bobinado. A medição da rugosidade superficial do compósito de tecido laminado foi tomada em dois pontos na direção axial, e em oito pontos a cada 45° na direção radial da peça, conforme mostra a figura 4.12.

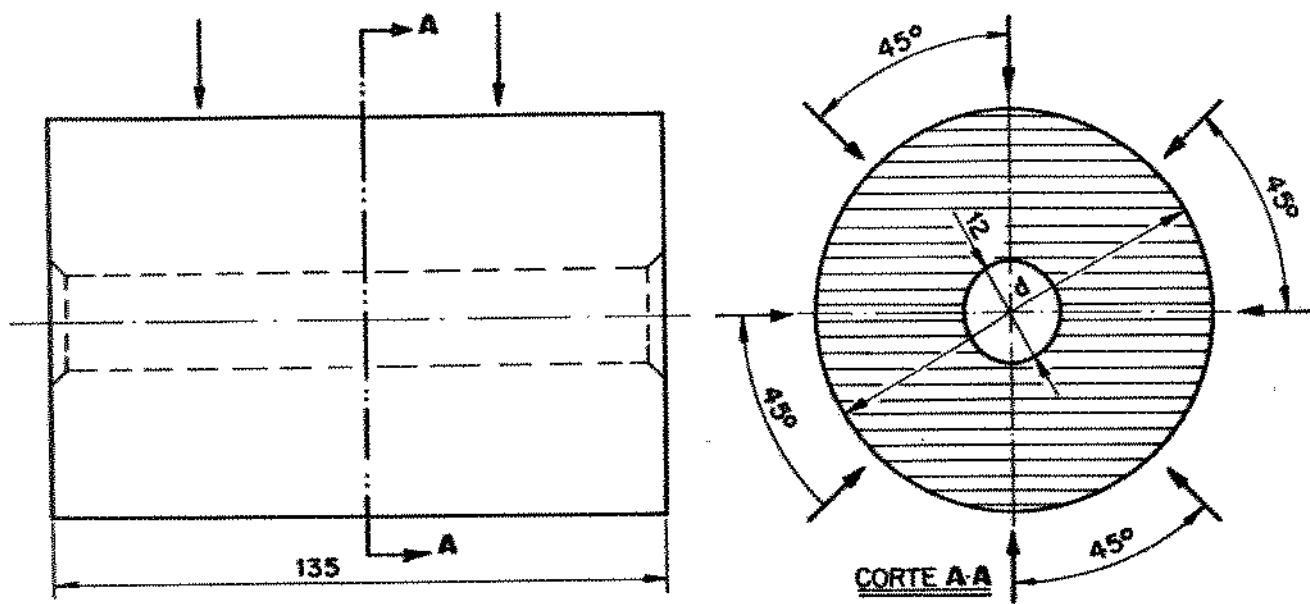


Figura 4.12 - Pontos de medição da rugosidade superficial do compósito com tecido laminado.

c) Torneamento do Compósito de Tecido Laminado com Ferramenta de Metal Duro.

Neste ensaio observou-se a variação do desgaste da ferramenta de metal duro e da componente da força de avanço, em função da velocidade de corte.

As condições de corte utilizadas foram: velocidades de corte ( $V_c$ ) de 25, 100, 200, 320, e 450 m/min; avanço ( $f$ ) de 0,1 mm/rot; e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1 mm.

O desgaste e a rugosidade foram medidos a cada 200 m de um total de 800 m de comprimento de corte usinado ( $l_c$ ). Sendo que, cada ensaio foi repetido duas vezes para cada condição de corte.

d) Torneamento do Compósito de Tecido Laminado com PCD.

O objetivo deste ensaio foi observar a variação da rugosidade superficial do compósito, em função do ângulo de posição das fibras no laminado, e do avanço de corte.

As condições de corte usadas foram : velocidade de corte  $V_c = 200$  m/min; profundidade de corte  $a_p = 1$  mm; e avanços  $f = 0,1$ ,  $0,2$ , e  $0,3$  mm/rot. O ensaio foi realizado duas vezes para cada condição de corte.

Durante o ensaio foram medidos a rugosidade superficial, o desgaste da ferramenta de PCD, e a componente da força de avanço pelos instrumentos já citados anteriormente.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 - TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO

#### 5.1.1 - COMPORTAMENTO DE DIVERSAS FERRAMENTAS

A figura 5.1 mostra a evolução dos desgastes das ferramentas em função do comprimento de corte usinado, no torneamento do compósito de tecido bobinado.

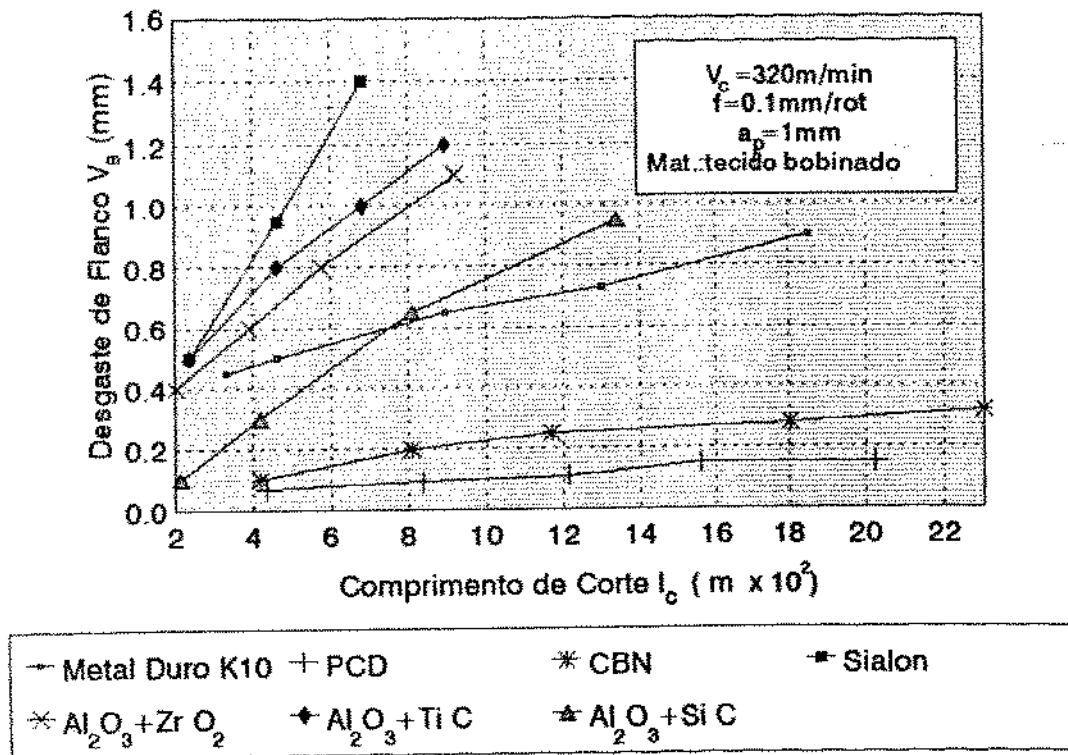


Figura 5.1 - Desgaste de flanco das ferramentas versus comprimento de corte.

As ferramentas de material cerâmico: SIALON ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Si}_3\text{N}_4$ ), cerâmica pura ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$ ), e cerâmica mista ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ ), apresentaram desgastes de flanco excessivos ( $V_B > 1,0$  mm) para um comprimento de corte usinado de 1000 m ( $t_c = 3,1$  min). O melhor desempenho das ferramentas cerâmicas foi obtido com a alumina reforçada com whiskers de SiC, conseguindo um rendimento superior da ordem de 100% em média em relação as outras três classes.

O metal duro apresentou um desempenho intermediário entre as cerâmicas e o diamante policristalino (PCD), mostrando-se melhor que a alumina reforçada com whiskers para o comprimento de corte acima de 800 m.

O melhor resultado obteve-se com o diamante, apresentando um pequeno desgaste de flanco de 0,15 mm, e o segundo melhor resultado foi obtido com o CBN ( $V_B = 0,32$  mm), ambos para um comprimento de corte da ordem de 2000 m.

O avanço  $f = 0,1$  mm/rot e a profundidade de corte  $a_p = 1$  mm usados nos ensaios 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 cavacos como na usinagem dos metais. A peça antes da usinagem passa por um processo de moldagem que a deixa próxima de suas dimensões finais. A velocidade de corte  $V_c = 320$  m/min, elevada para usinagem de materiais abrasivos, foi utilizada como uma condição crítica para acelerar o desgaste das ferramentas e reduzir o tempo de ensaio.

As figuras 5.2 e 5.3 mostram a variação das forças de avanço e de corte, respectivamente, em relação ao comprimento de corte.

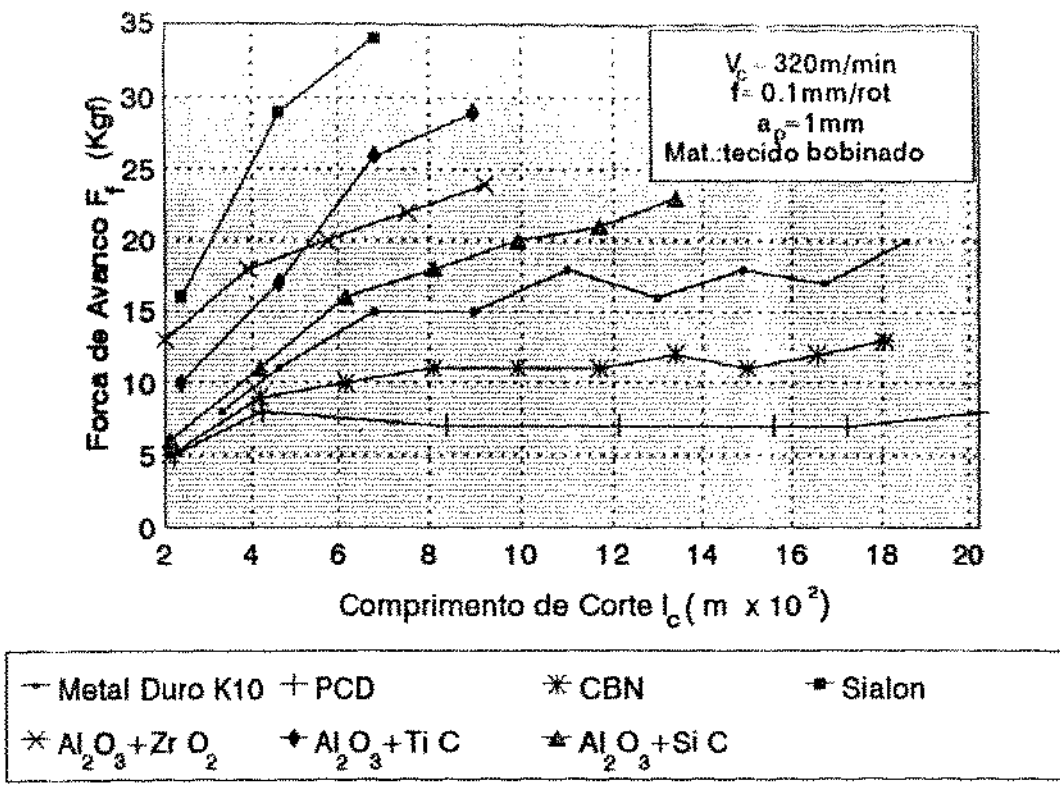


Figura 5.2 - Forças de avanço versus comprimento de corte.

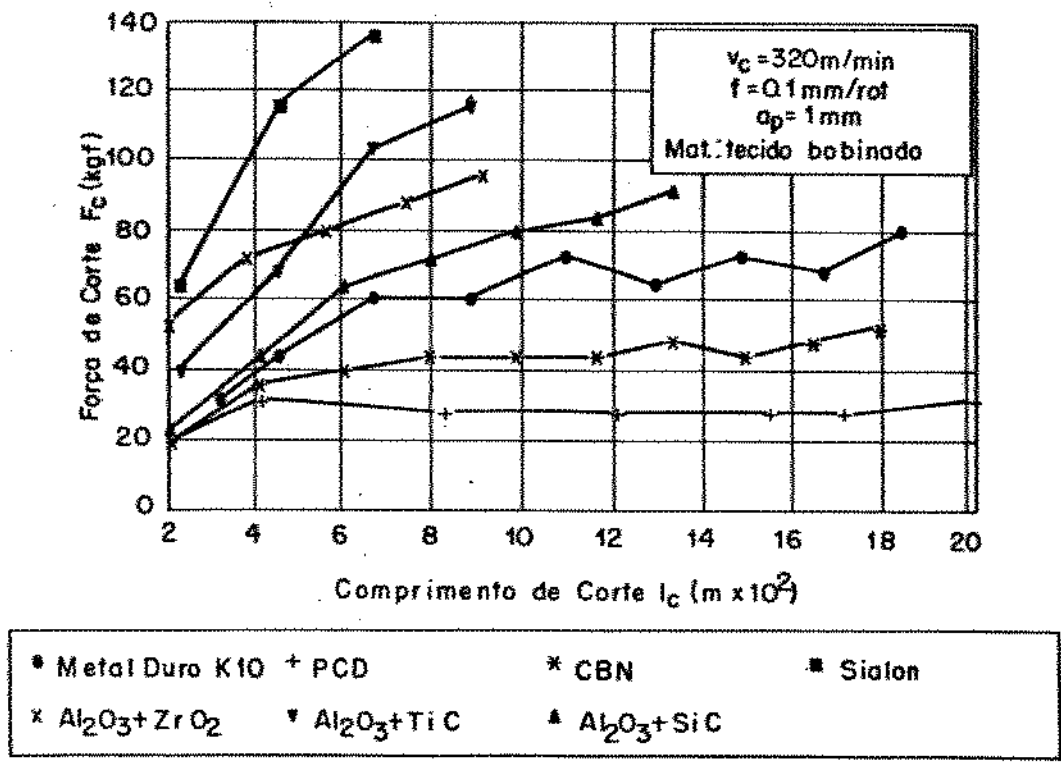


Figura 5.3 - Forças de corte versus comprimento de corte.

- Os valores de  $F_c$  são estimados:  $F_c = 4 \cdot F_f$  [19].

Para as ferramentas de cerâmicas que sofreram desgastes excessivos, as forças tiveram um crescimento significativo, enquanto que para as ferramentas que apresentaram melhor desempenho como metal duro, CBN, e diamante, as forças tiveram menor taxa de crescimento. Isto mostra uma forte correlação entre as forças de corte e de avanço com o desgaste de flanco da ferramenta.

A figura 5.4 ilustra nitidamente a dependência entre a força de avanço e o desgaste da ferramenta. Se fossem representadas as retas obtidas por regressão linear da nuvem de pontos obtidos, estas apresentariam um coeficiente de correlação médio da ordem de 97%. Explica-se este fenômeno pelo fato de no torneamento do material compósito a ferramenta sofrer apenas o desgaste de flanco (figura 5.8), não ocorrendo o desgaste de cratera que poderia provocar um efeito contrário diminuindo a componente da força de avanço [20].

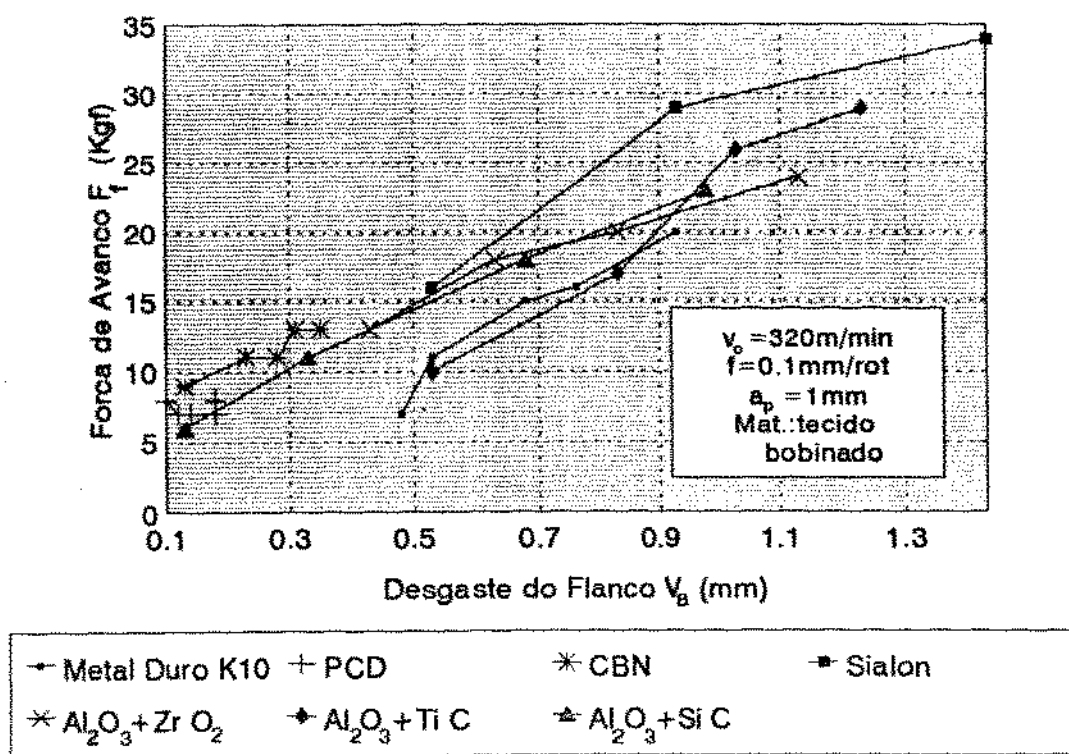


Figura 5.4 - Forças de avanço versus desgaste de flanco.

A priori, desejava-se medir as forças de avanço e de corte, mas por um problema de instrumentação apenas a componente da força de avanço foi mensurada. A força de corte foi estimada como sendo quatro vezes a força de avanço [19], apesar que a força de avanço é a componente da força de usinagem mais sensível ao desgaste da ferramenta no torneamento [21].

### 5.1.2 - COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

As figuras 5.5 e 5.6, mostram o comportamento da rugosidade superficial da peça  $R_a$  e  $R_{\max}$ , respectivamente, em relação ao comprimento de corte usinado para todas as ferramentas ensaiadas.

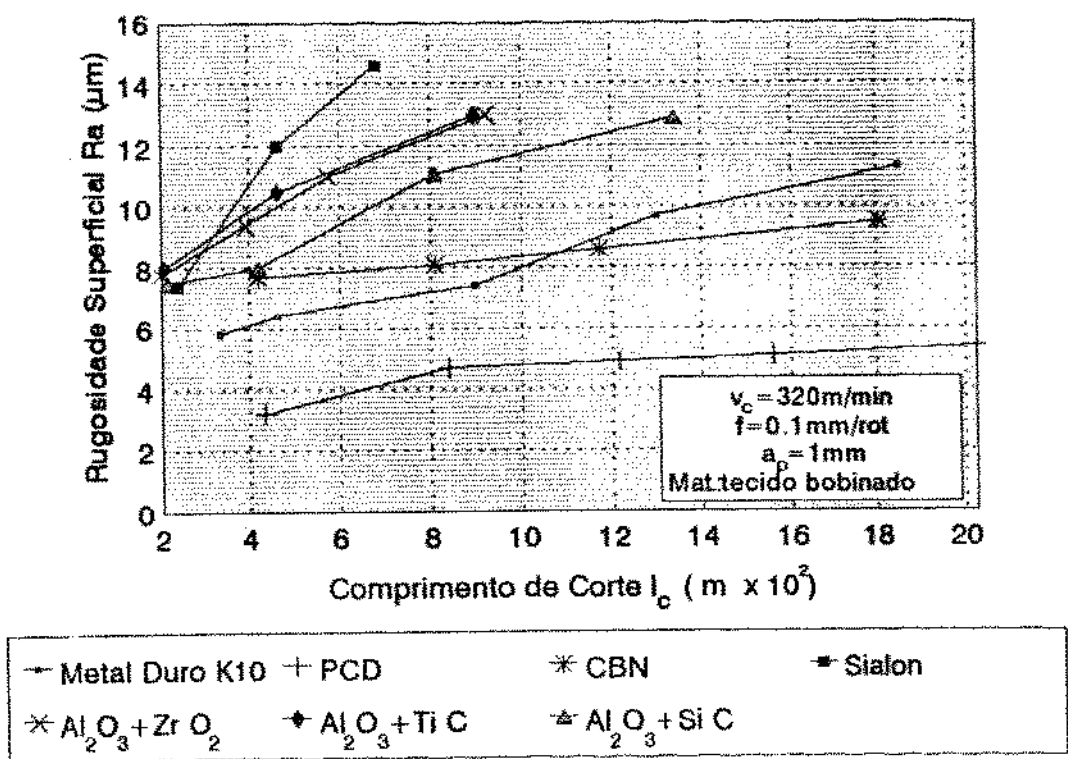


Figura 5.5- Rugosidade superficial  $R_a$  versus comprimento de corte.



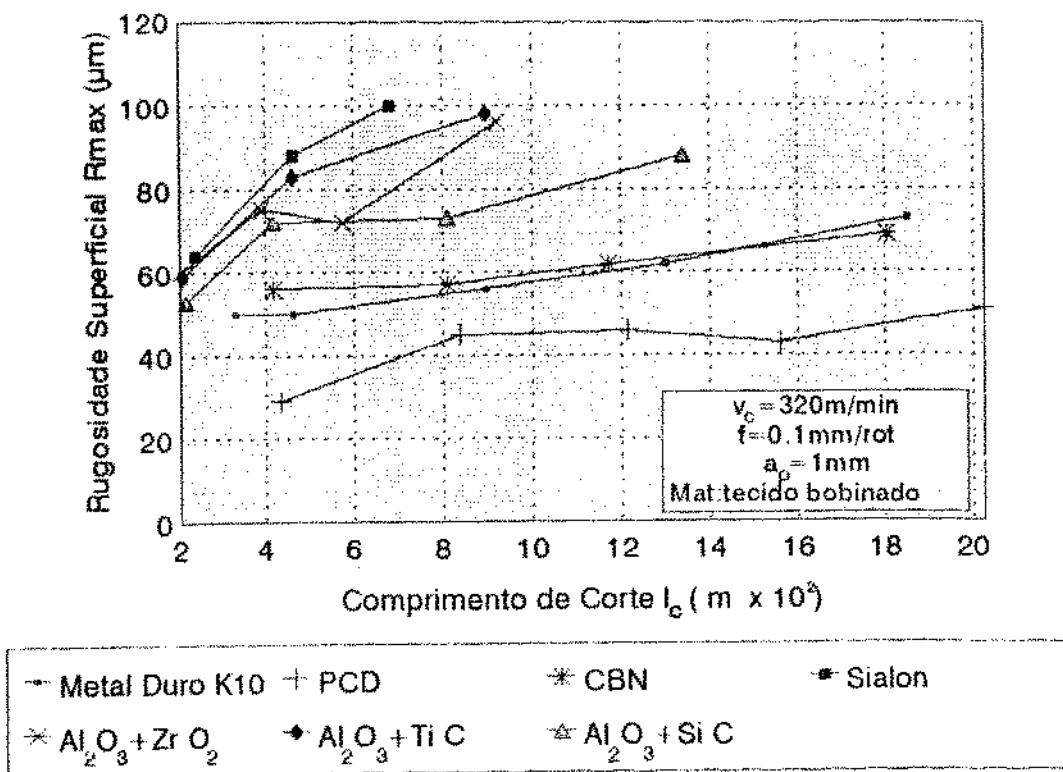


Figura 5.6- Rugosidade superfic.  $R_{\text{máx}}$  versus comprimento de corte.

A rugosidade aumentou drasticamente nas peças usinadas com ferramentas cerâmicas, devido aos elevados desgastes ocorridos nestas ferramentas. Enquanto que nas peças usinadas com ferramentas de metal duro, CBN, e diamante, a rugosidade superficial apresentou menor taxa de crescimento.

A rugosidade obtida com ferramenta de CBN foi relativamente alta em comparação ao diamante, ficando próxima à rugosidade alcançada com metal duro. Justifica-se este fato devido ao desgaste da ferramenta de CBN ocorrer com maior intensidade na superfície secundária de folga (figura 5.7), que é a área da ferramenta que gera o acabamento superficial na peça. Este desgaste influencia negativamente na rugosidade superficial, com a mesma intensidade que a ferramenta de metal duro influencia

apresentando um desgaste elevado ( $V_B = 0,9 \text{ mm}$ ), porém mais uniforme na superfície de folga da ferramenta (figura 5.8).

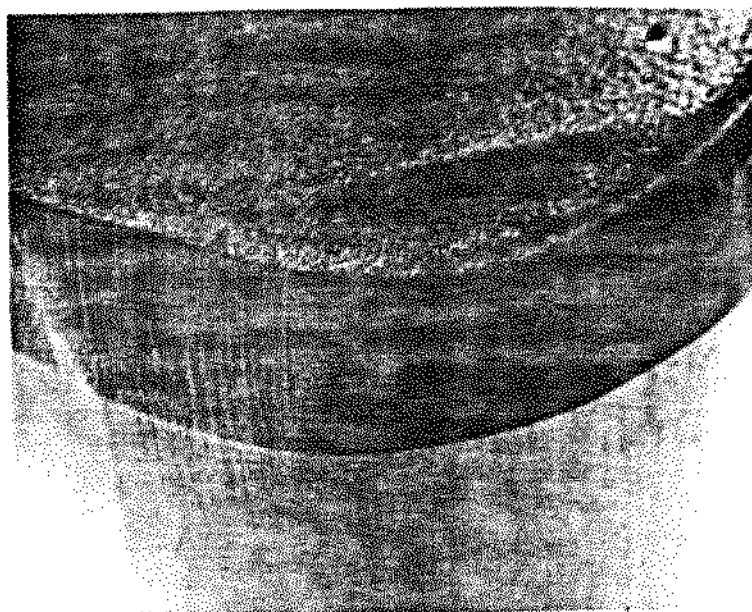


Figura 5.7 - Desgaste de flanco da ferramenta de CBN no torneamento de compósito bobinado.  $V_B = 0,32 \text{ mm}$ ,  $l_c = 2300 \text{ m}$ , ampliação de 66 vezes.

As médias dos valores da rugosidade superficial do compósito apresentaram uma taxa de crescimento aproximadamente constante com o comprimento de corte. Explica-se este fato pelo mecanismo de desgaste da ferramenta desenvolvido na usinagem de compósito reforçado com fibras. O desgaste neste caso é predominantemente abrasivo, ocorrendo uma espécie de polimento somente na superfície de folga da ferramenta, em que não é observado o desgaste de cratera da ferramenta, como mostram as figuras 5.8, 5.11, 5.29, e 5.35.

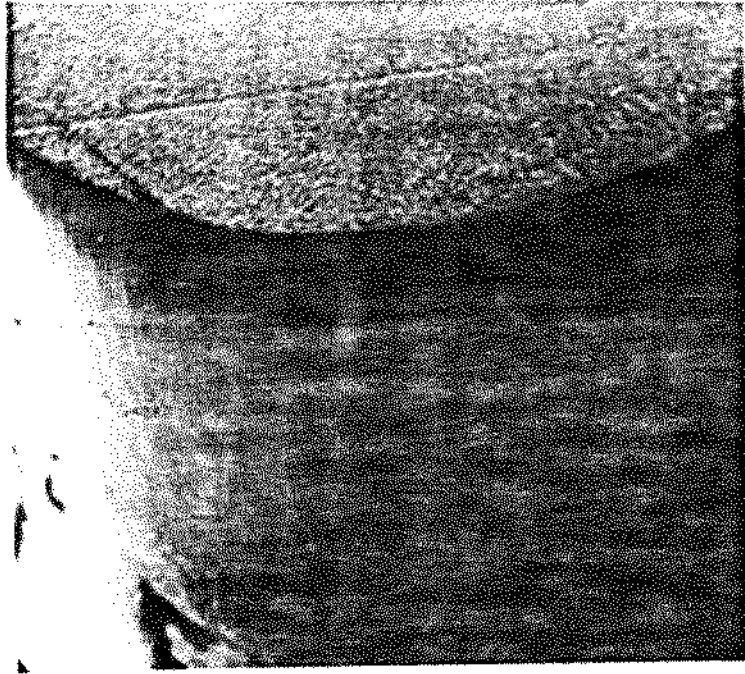
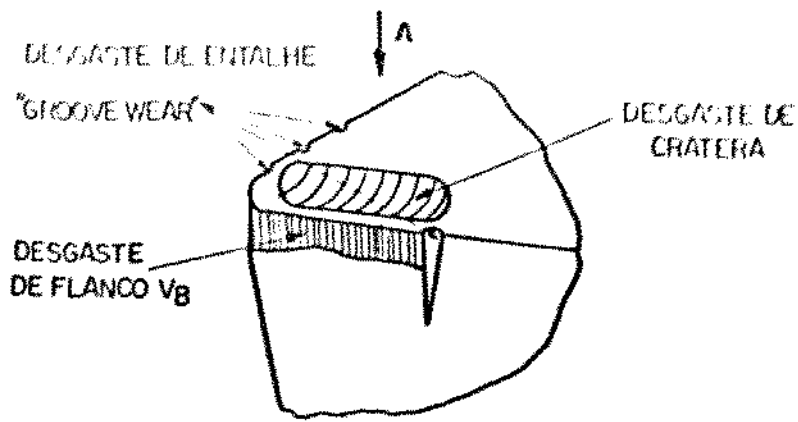


Figura 5.8 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro,  $V_B=0,9$  mm,  $V_c= 320$  m/mín,  $l_c= 1880$  m, tecido bobinado, ampliação de 65 vezes.

Segundo Diniz [22,23], fato ao contrário ocorre no torneamento de aços de baixa dureza, em que a ferramenta além do desgaste de flanco, apresenta desgastes de cratera e na forma de entalhe ("groove wear"), conforme mostra a figura 5.9. Estes desgastes são responsáveis pela grande variação da rugosidade superficial no torneamento desses aços. No caso do torneamento do compósito, a ferramenta não apresenta os desgastes de cratera e de entalhe, devido ao cavaco gerado ser na forma de pó, que apresenta menor atrito na superfície de saída da ferramenta.



VISTA DE A

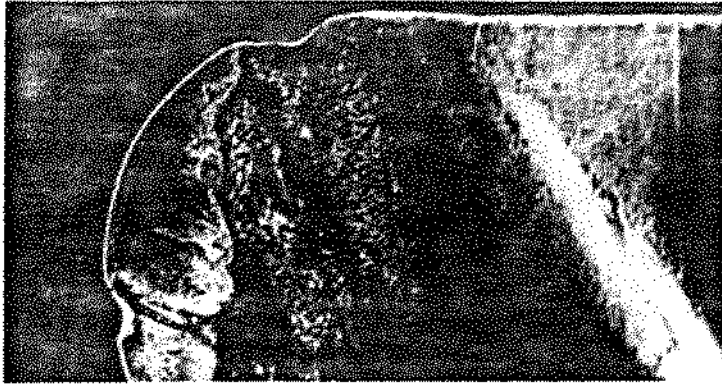


Figura 5.9 - Desgastes da ferramenta de metal duro ISO P10 no torneamento de aço ABNT 1045 (20 RC), ampliação de 68 vezes [24].

### 5.1.3 - A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NO DESGASTE DA FERRAMENTA E NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA

A figura 5.10 mostra a variação do desgaste da ferramenta de metal duro com a velocidade de corte. O desgaste de flanco observado variou pouco entre as velocidades de 25 m/min e 320 m/min (0,30 a 0,45 mm). Em velocidades altas como 600 m/min, a ferramenta apresentou um desgaste de flanco excessivo ( $V_B = 0,95$  mm), e nenhum desgaste de cratera, conforme a figura 5.11.

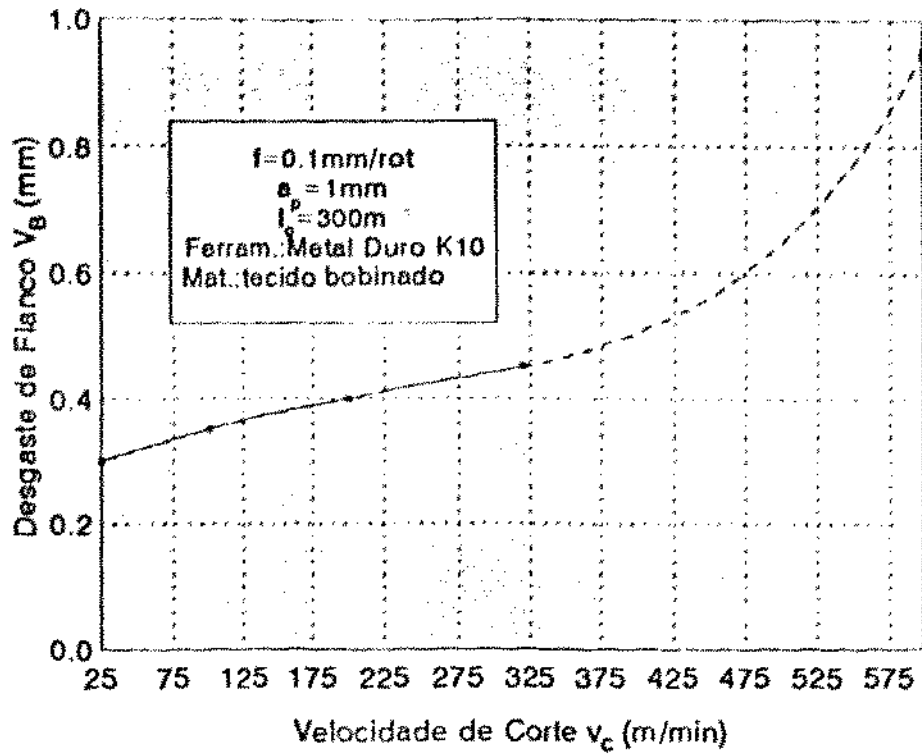


Figura 5.10 - Desgaste de flanco da ferramenta em função da velocidade de corte.

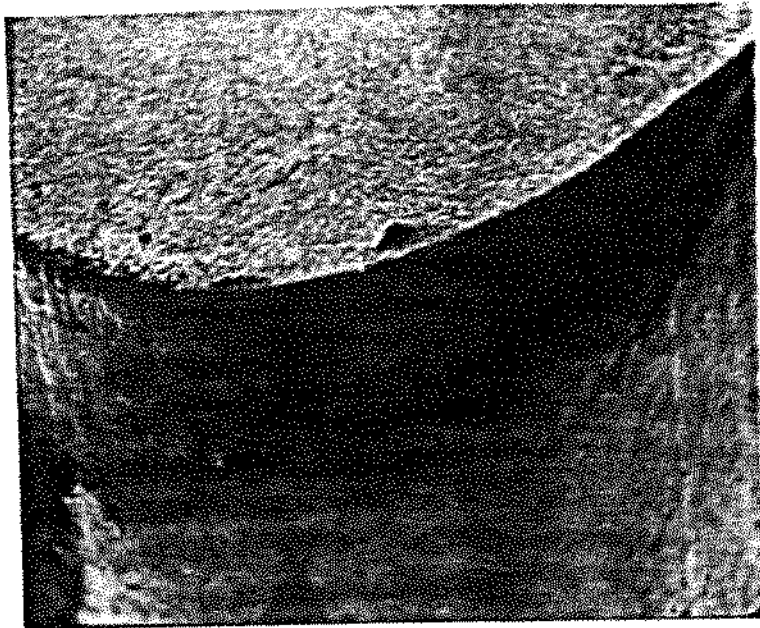


Figura 5.11 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro k10,  $V_B = 0,95 \text{ mm}$ ,  $v_c = 600 \text{ m/min}$ ,  $l_c = 300 \text{ m}$ , ampl. de 61X.

Na velocidade de corte de 600 m/min foi observado uma mudança física da resina do compósito, devido a alta temperatura desenvolvida no processo de usinagem. Para estimar a diferença de temperatura ocorrida com a variação da velocidade de corte, pode-se fazer um cálculo aproximado da quantidade de calor gerado no processo de torneamento do compósito. Este cálculo permite comparar o efeito de duas velocidades diferentes no desgaste da ferramenta. A quantidade de calor gerado (Q) é dada por [19]:

$$Q = \frac{F_c \times V_c}{E}, \quad \text{sendo:}$$

Q - Quantidade de calor gerado (kcal/min);

F<sub>c</sub> - força de corte (kgf);

V<sub>c</sub> - Velocidade de corte (m/min);

E - Equivalente mecânico do calor (E= 427 kcal/min).

Segundo Ferraresi [19], a força de corte varia de 4 a 4,5 vezes a força de avanço no torneamento. Estendendo esta relação para o torneamento do compósito, tem-se na tabela 5.1 os valores aproximados da quantidade de calor gerado.

Tabela 5.1 - Valores estimados da quantidade de calor gerado.

Velocidade de corte (m/min)	Força de avanço F <sub>f</sub> (kgf)	Força de corte F <sub>c</sub> (kgf)	Calor gerado Q (kcal/min)
100	7	28	6,5
320	8	32	24
600	18	72	100

A quantidade de calor gerado foi quadruplicada com o aumento da velocidade de corte de 320 para 600 m/min. Portanto justifica-se o desgaste elevado da ferramenta de metal duro com velocidade de 600 m/min, em que a temperatura desenvolvida contribuiu para a queda da resistência ao desgaste da ferramenta.

As figuras 5.12 e 5.13, mostram o comportamento da rugosidade superficial da peça  $R_a$  e  $R_{m\acute{a}x}$ , respectivamente, em função da velocidade de corte. A rugosidade apresentou pouca variação com a velocidade de corte, principalmente nos ensaios em que o desgaste da ferramenta teve pouca influência da velocidade de corte. No entanto, esperava-se uma rugosidade alta para a velocidade de 600 m/min, em que o desgaste da ferramenta alcançou 0,95 mm. Isto não ocorreu devido ao amolecimento da resina durante o corte, que no estado pastoso envolveu toda superfície usinada, melhorando pelo menos momentaneamente o acabamento da peça.

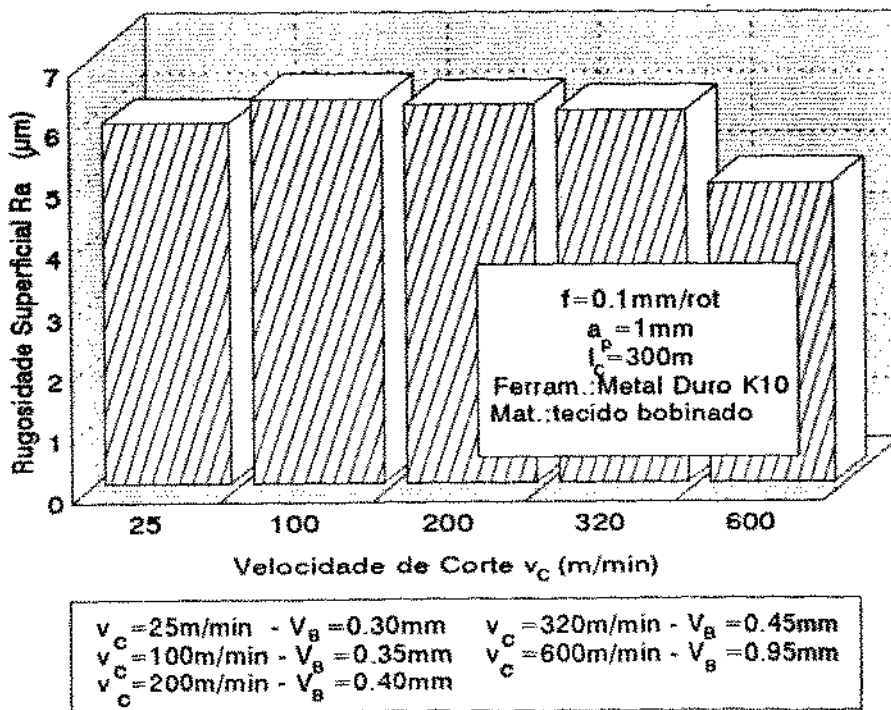


Figura 5.12 - Rugosidade superfic.  $R_a$  versus velocidade de corte.

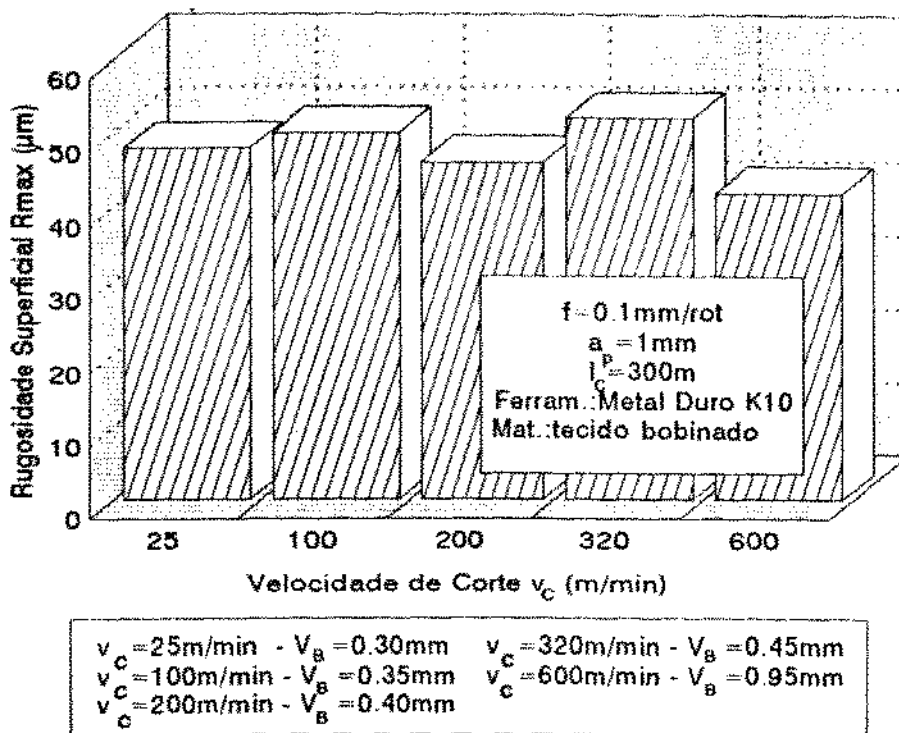


Figura 5.13 - Rugosidade superficial  $R_{\text{máx}}$  versus velocidade de corte.

As figuras 5.14 e 5.15, mostram também a influência da velocidade de corte na rugosidade superficial  $R_a$  e  $R_{\text{máx}}$ , respectivamente, porém neste caso para a ferramenta de diamante. Este ensaio, confirma a pequena influência da velocidade de corte na rugosidade superficial da peça, desde que não haja desgaste significativo da ferramenta.



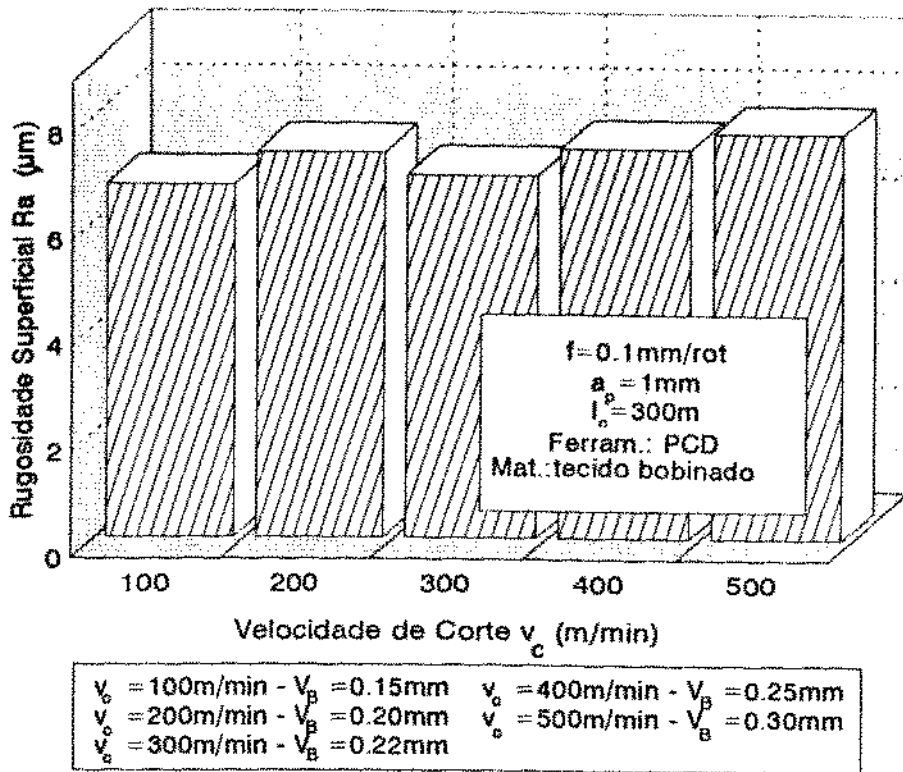


Figura 5.14- Rugosidade superficial Ra versus velocidade de corte.

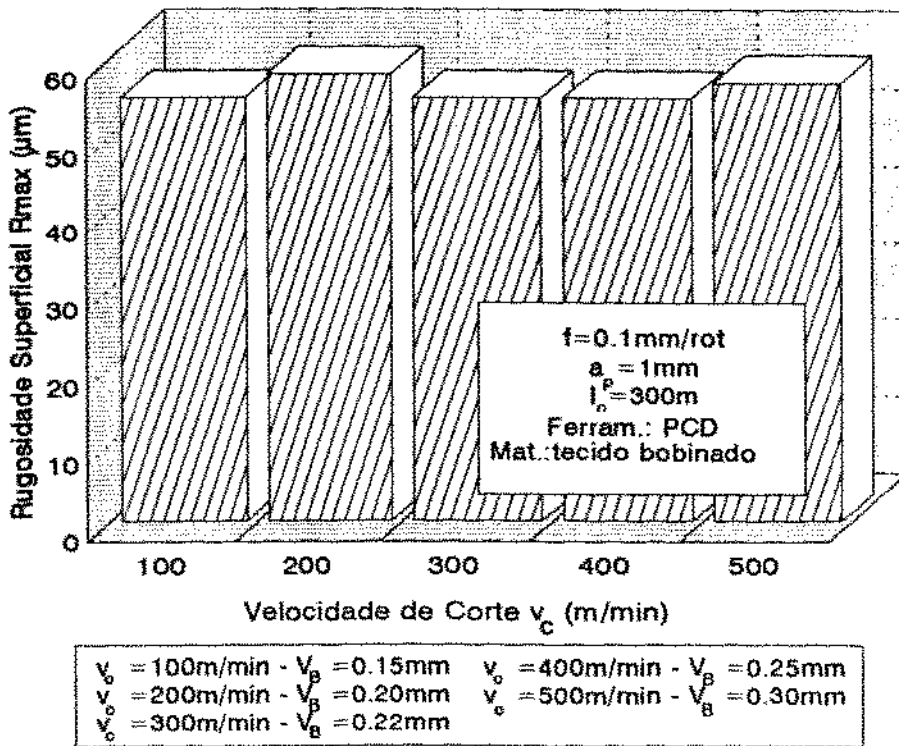


Figura 5.15- Rugosidade superfic.  $R_{\max}$  versus velocidade de corte.

As rugosidades obtidas nestes ensaios foram relativamente altas comparadas com as rugosidades obtidas com ferramenta de metal duro. Isto deve-se ao fato da ferramenta de diamante iniciar os ensaios com um desgaste de flanco  $V_B = 0,15$  mm. No caso do metal duro, as arestas foram sempre novas, trocadas em todas as situações do ensaio. Portanto, no torneamento de compósito de tecido bobinado existe uma grande influência do desgaste da ferramenta na rugosidade superficial da peça. A usinagem com ferramenta em estágio elevado de desgaste tem efeito negativo na rugosidade da peça, observou-se inclusive a delaminação do compósito.

## 5.2 - FURAÇÃO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO

A figura 5.16 mostra os desgastes das brocas de aço rápido com e sem cobertura de nitreto de titânio (TiN) em função do comprimento de avanço. A broca com cobertura de TiN apresentou um desempenho variável em relação a broca sem cobertura. O ganho na furação em termos de comprimento usinado cresce até o desgaste de 0,8 mm, a partir daí o recobrimento se desgasta e o trabalho de proteção tende a não surtir mais o mesmo efeito. Sendo que, até o fim de vida da broca para um critério de desgaste  $V_B = 1$  mm, a broca com cobertura de TiN é 30% mais vantajosa, conforme mostra a figura 5.17.

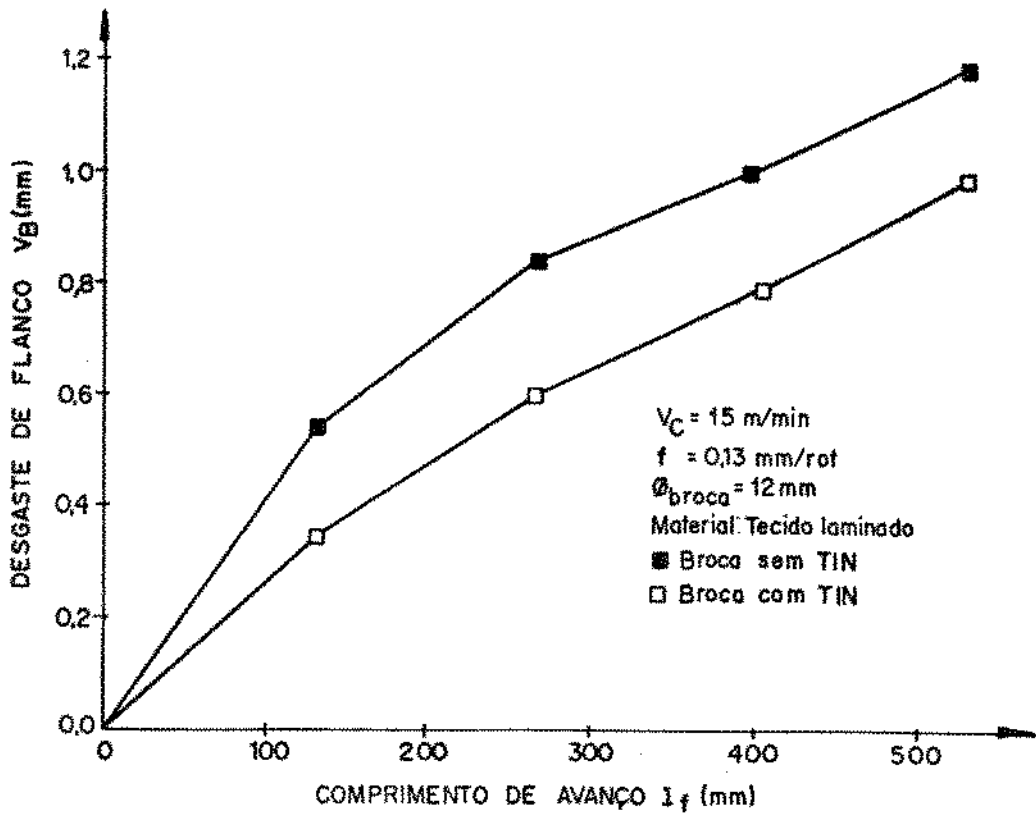


Figura 5.16 - Evolução dos desgastes das brocas com o comprimento de avanço.

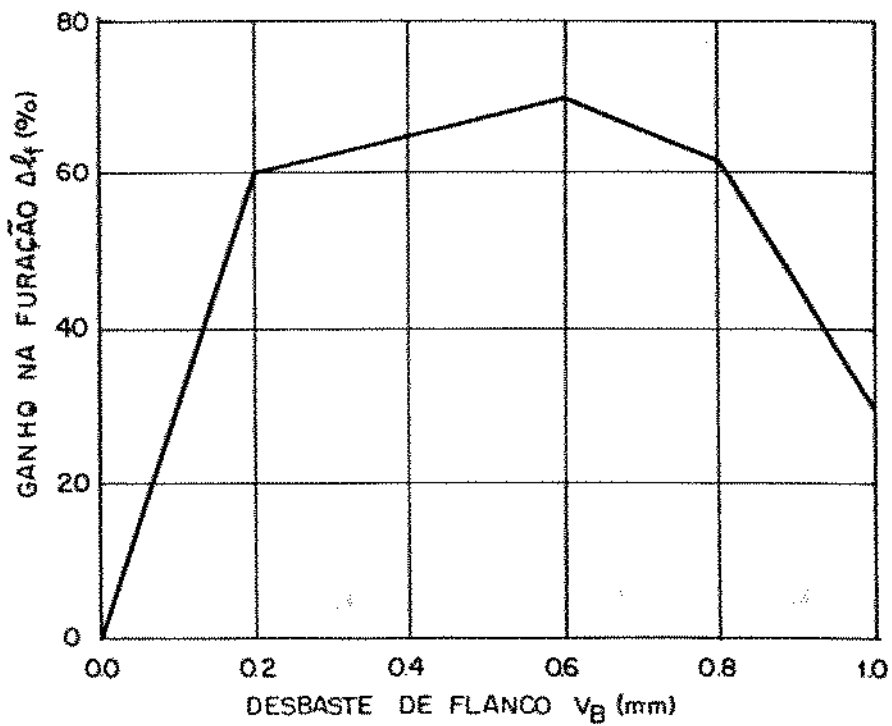


Figura 5.17 - Ganho na furação com broca revestida de TiN versus desgaste de flanco.

As figuras 5.18 e 5.19 apresentam os desgastes desenvolvidos nas brocas com e sem cobertura de TiN na furação do compósito.

DESGASTE DA BROCA

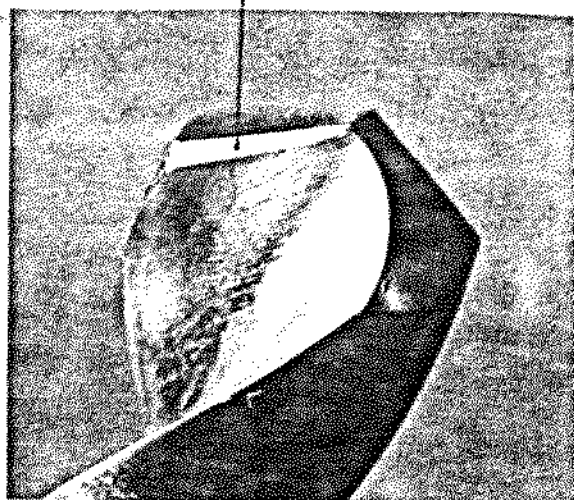


Figura 5.18 - Desgaste de flanco  $V_B = 1,0$  mm, broca de aço rápido com cobertura de TiN, ampliação de 3,5 vezes.

DESGASTE DA BROCA

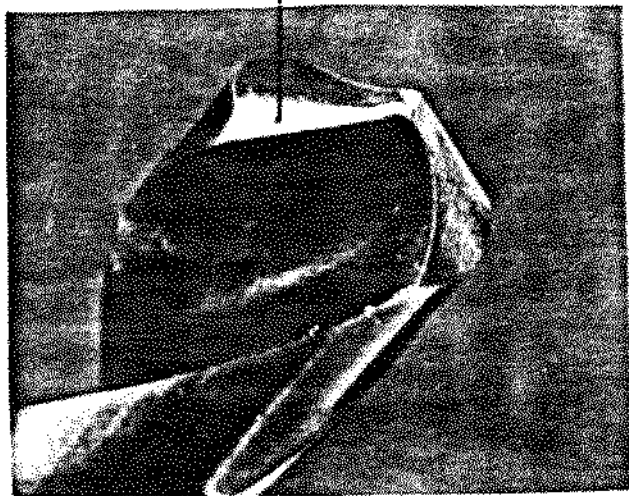


Figura 5.19 - Desgaste de flanco  $V_B = 1,2$  mm, broca de aço rápido sem cobertura de TiN, ampliação de 3,5 vezes.

Os desgastes das brocas ocorreram com maior intensidade na superfície de folga, aumentando da aresta transversal de corte ( $V_B \approx 0$ ) para a extremidade ( $V_B$  máximo). A broca sem cobertura apresentou um pequeno desgaste na aresta transversal de corte ( $V_B = 0,1$  mm). Justifica-se o desgaste máximo na periferia da broca por ser um ponto da aresta da broca de maior velocidade de corte. Observou-se que a broca sem cobertura sofreu maior aquecimento que a broca revestida com TiN, isto é devido a maior dificuldade de retirada do cavaco do furo com a broca sem cobertura. O revestimento de TiN dá um melhor acabamento na superfície de saída da broca, facilitando a retirada do cavaco, diminuindo o atrito e a temperatura na operação de furação [25].

O ensaio de furação foi uma etapa de preparação dos corpos de prova para a operação de torneamento, em que não houve repetição dos ensaios, portanto, os resultados obtidos são passíveis de alterações.

### 5.3 - TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO

#### 5.3.1 - COMPORTAMENTO DAS FERRAMENTAS NA USINAGEM

A figura 5.20 mostra a evolução dos desgastes das ferramentas com o comprimento de corte usinado. Utilizou-se as ferramentas de melhor desempenho no torneamento do compósito de tecido bobinado: metal duro, cerâmica reforçada com whiskers de SiC, e diamante (PCD), com exceção do CBN.

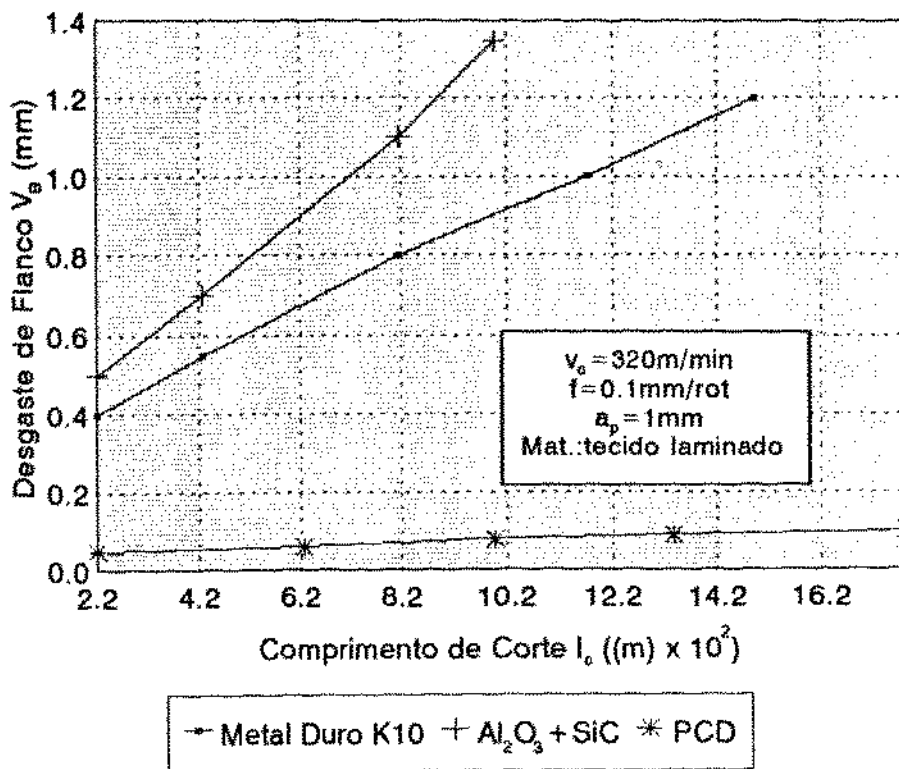


Figura 5.20 - Desgaste das ferramentas versus comprimento de corte.

A ferramenta de cerâmica apresentou o maior desgaste de flanco,  $V_B = 1,4$  mm para um comprimento de corte usinado  $l_c = 1000$  m, seguidas pelas ferramentas de metal duro,  $V_B = 1,2$  mm para  $l_c = 1500$  m, e diamante,  $V_B = 0,1$  mm para  $l_c = 1780$  m, respectivamente.

As figuras 5.21 e 5.22 mostram o comportamento da componente das forças de avanço e de corte em relação ao comprimento de corte. A taxa de crescimento das forças com o comprimento de corte é análoga ao crescimento do desgaste da ferramenta (figura 5.20).

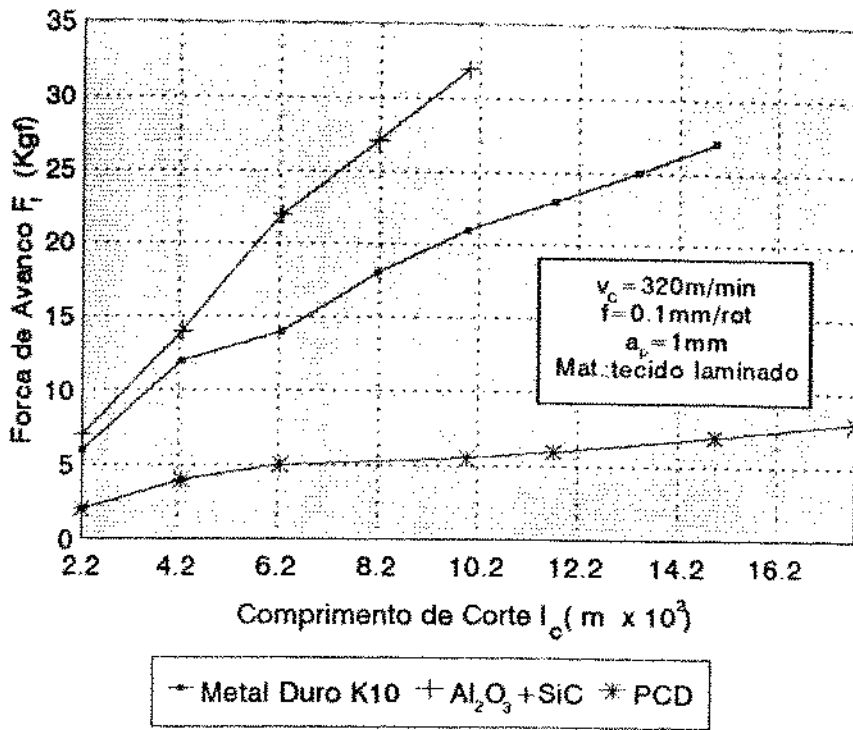


Figura 5.21 - Forças de avanço versus comprimento de corte.

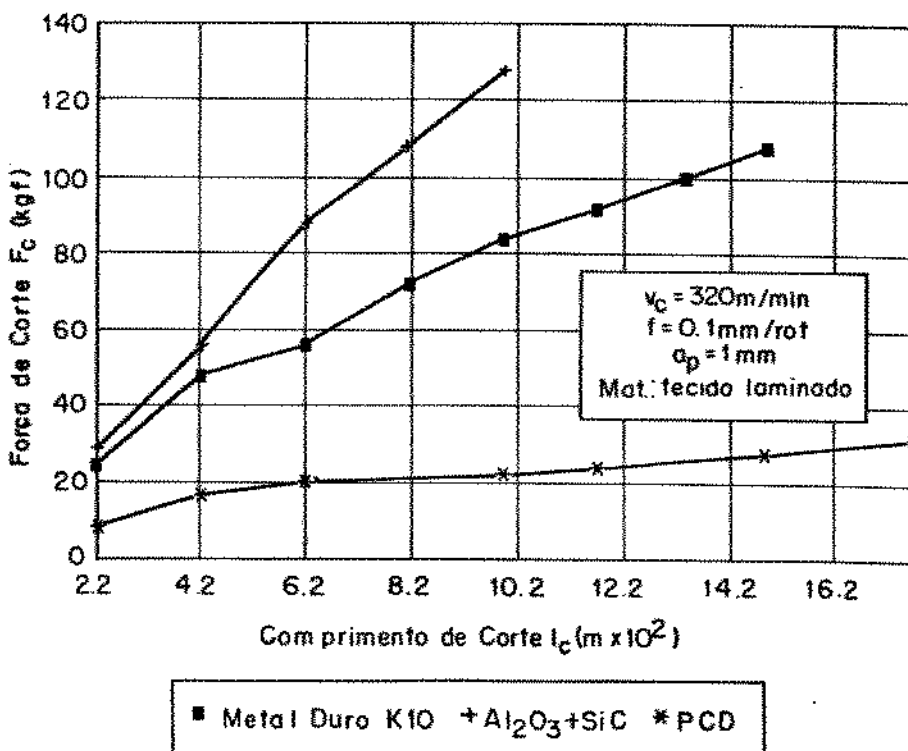


Figura 5.22 - Forças de corte versus comprimento de corte.

- Os valores de  $F_c$  são estimados:  $F_c = 4 \cdot F_f$  [19].

A figura 5.23 mostra a variação da força de avanço com o desgaste de flanco da ferramenta. Caso fossem representadas as retas de regressão linear dos pontos obtidos, estas apresentariam um coeficiente de correlação de 99%. Justifica-se este fato devido ao desgaste ocorrer somente na superfície de folga da ferramenta (figuras 5.29 e 5.35), não ocorrendo neste caso o desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta, característico no torneamento de aços que apresentam cavacos longos. Confirmando os resultados obtidos no torneamento do compósito de tecido bobinado.

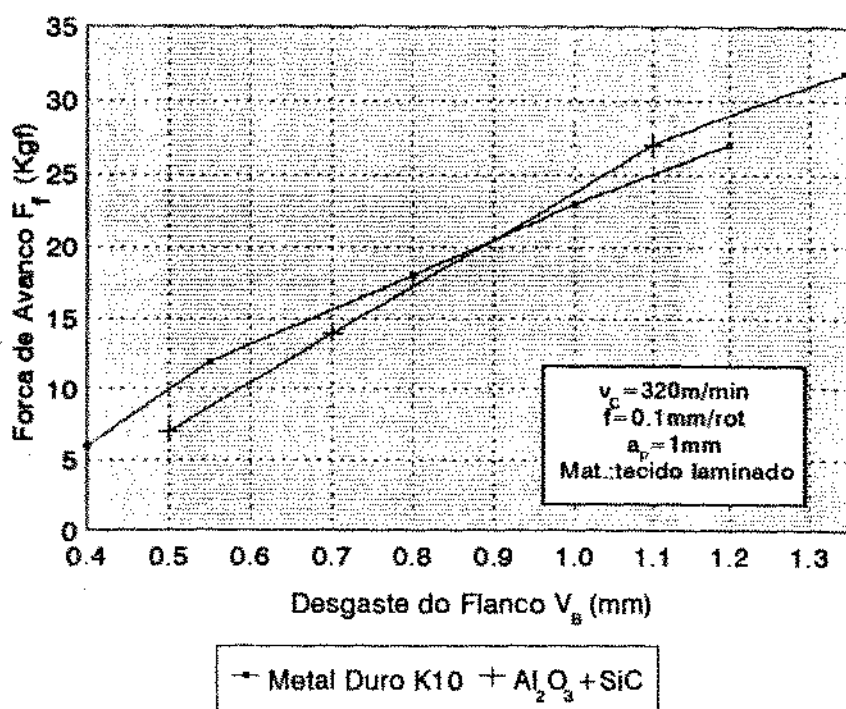


Figura 5.23 - Forças de avanço versus desgaste de flanco.



### 5.3.2 - CURVAS DE VIDA DA FERRAMENTA DE METAL DURO

As figuras 5.24 e 5.25 apresentam respectivamente, as curvas de desgaste e de força de avanço da ferramenta de metal duro em função do comprimento de corte usinado para cinco velocidades de corte diferentes. O crescimento da força de avanço com o comprimento de corte confirma a variação do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro para cada velocidade de corte.

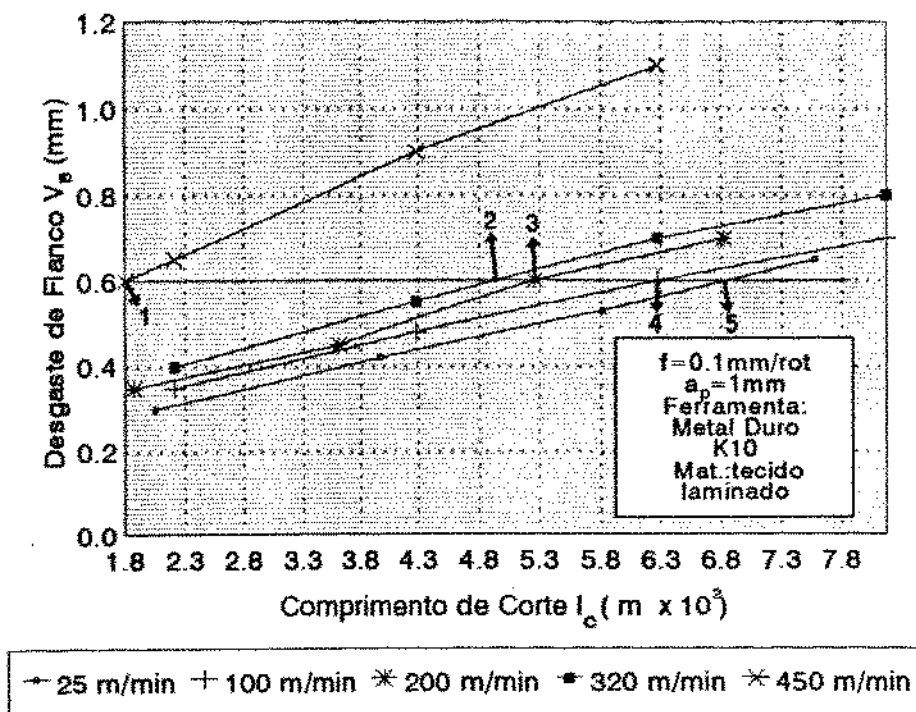


Figura 5.24 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte.

De posse das curvas da figura 5.24, pode-se fixar um valor de desgaste  $V_B = 0,6 \text{ mm}$ , por exemplo, como critério de fim de vida da ferramenta. Obtém-se assim na figura 5.24 para  $V_B = 0,6 \text{ mm}$  os pontos 1, 2, 3, 4, e 5, das curvas de velocidades. Estes pontos fornecerão os comprimentos de corte, ou sejam as vidas da ferramenta para as velocidades de 25, 100, 200, 320, e 450 m/min.

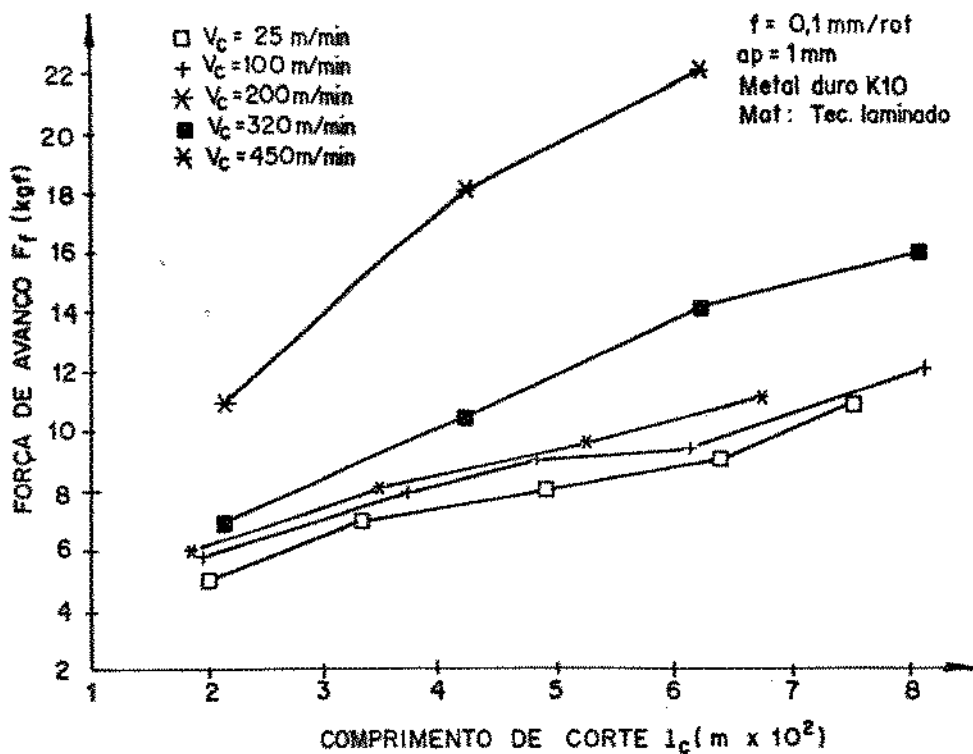


Figura 5.25 - Força de avanço versus comprimento de corte.

A figura 5.26 apresenta a curva de vida da ferramenta de metal duro, expressando o comprimento de corte em função da velocidade de corte no intervalo de 25 à 320 m/min. A equação de Taylor simplificada para a curva de vida é dada por [9]:  $l_c \times V_c^{0,128} = 1024$ , apresentando uma pequena variação da vida da ferramenta em função da velocidade de corte.

A figura 5.27 mostra a curva de vida da ferramenta ( $l_c \times V_c$ ) no intervalo de velocidades de corte entre 320 e 450 m/min. A equação de Taylor simplificada da vida da ferramenta é dada por:  $l_c \times V_c^{3,02} = 1,8 \times 10^{10}$ . Neste intervalo houve uma grande variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte. Justifica-se este fato pela maior quantidade de calor gerado na usinagem em altas velocidades de corte, proporcionando altas temperaturas de corte e o rápido crescimento do desgaste da ferramenta.

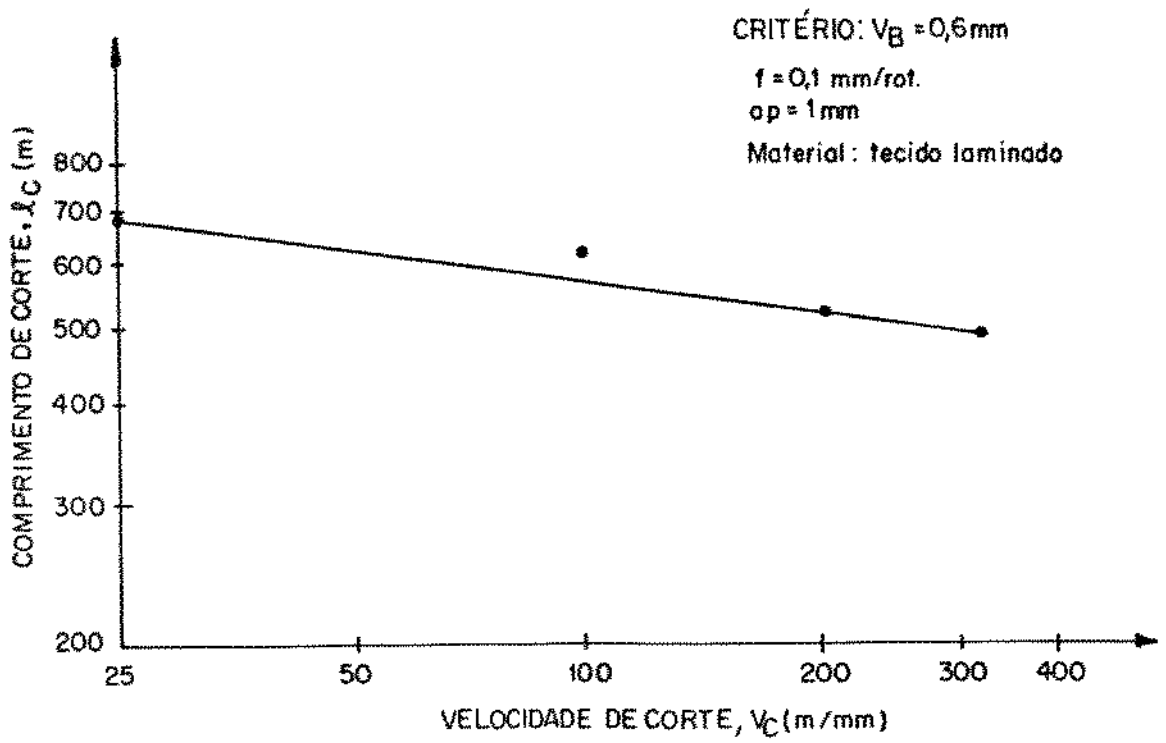


Figura 5.26 - Curva de vida da ferramenta de metal duro,  $V_c = 25$  a  $320 \text{ m/min.}$

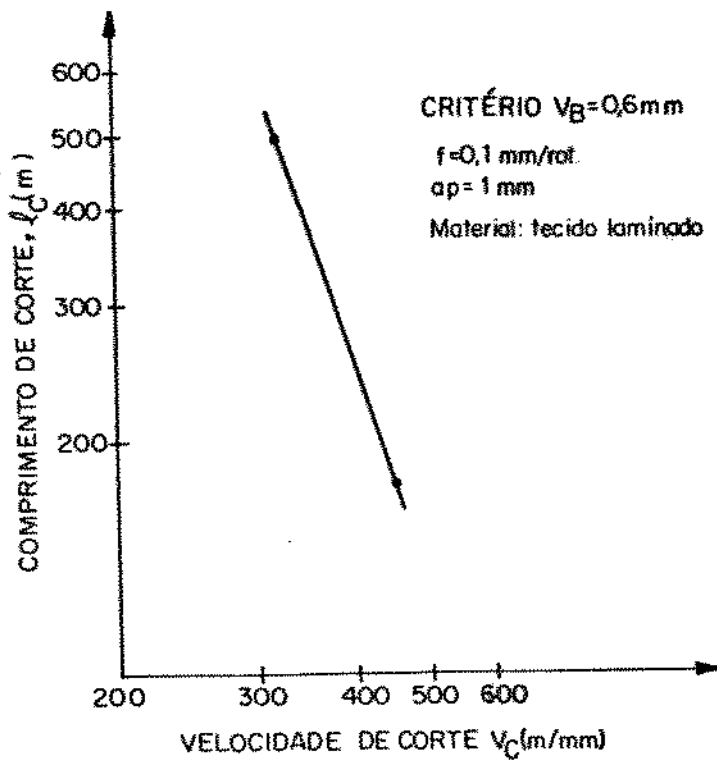


Figura 5.27 - Curva de vida da ferramenta de metal duro,  $V_c = 320$  a  $450 \text{ m/min.}$

Na figura 5.24, fixando os comprimentos de corte de 300 m e 600 m, obtêm-se nas condições de usinagem especificadas o desgaste de flanco das ferramentas em função da velocidade de corte, conforme a figura 5.28.

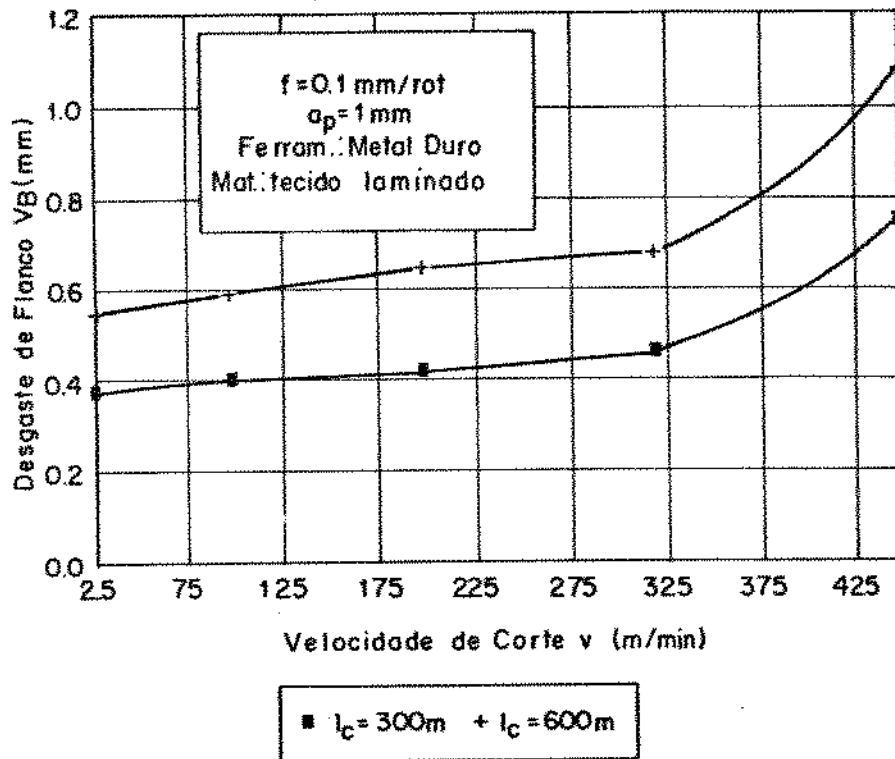


Figura 5.28 - Desgaste da ferramenta em função da velocidade de corte.

O desgaste da ferramenta variou de 0,35 a 0,45 mm ( $l_c = 300$  m), e de 0,55 a 0,68 mm ( $l_c = 600$  m) com a velocidade de corte entre 25 e 320 m/min, ou seja, observou-se uma pequena variação do desgaste neste intervalo de velocidade de corte. Justifica-se este fato devido a pequena variação de energia dissipada por atrito neste intervalo de velocidade de corte, já que a abrasão mecânica é o principal mecanismo de desgaste da ferramenta no torneamento de compósito reforçado com fibra. A energia dissipada por atrito

na usinagem é proporcional ao coeficiente de atrito e ao volume de cavaco gerado no tempo, e neste caso, o aumento do volume de cavaco gerado com o acréscimo da velocidade de corte foi compensado pela diminuição do coeficiente de atrito.

Em contra partida observou-se uma grande variação do desgaste da ferramenta em função do aumento da velocidade de corte de 320 para 450 m/min. A figura 5.29 mostra o desgaste de flanco da ferramenta de metal duro para  $V_c = 450$  m/min. Justifica-se este fato pela quantidade de calor gerado no processo de usinagem. Uma estimativa do cálculo da quantidade de calor gerado é apresentado na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores estimados da quantidade de calor gerado.

Velocidade de corte (m/min)	Força de avanço $F_f$ (kgf)	Força de corte $F_c$ (kgf)	Calor gerado Q (kcal/min)
100	8	32	7,5
320	9	36	27
450	15	60	63

Verifica-se um acréscimo substancial da quantidade de calor gerado entre as velocidades de 320 e 450 m/min, o que implica em maiores temperaturas de usinagem, menor dureza, e conseqüentemente maior desgaste da ferramenta.

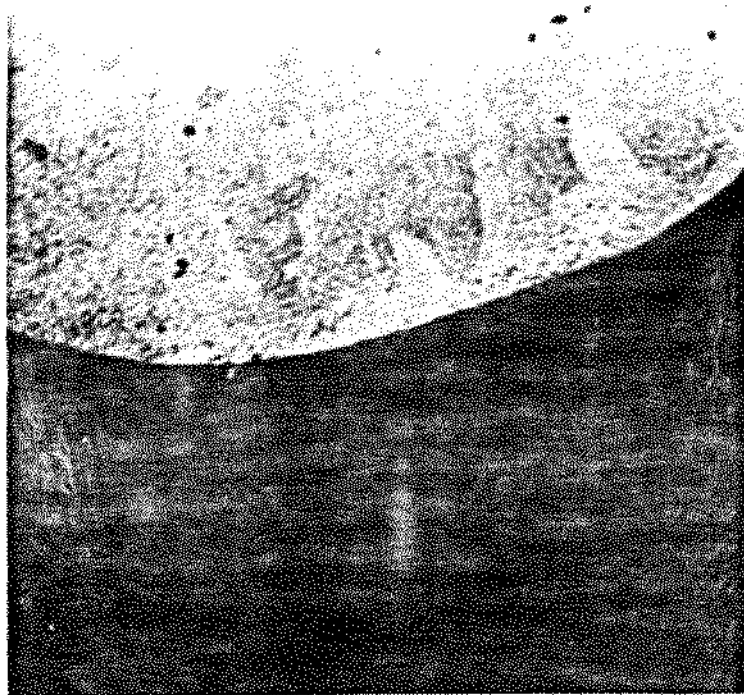


Figura 5.29 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro,  $V_B = 1,1$  mm,  $V_c = 450$  m/min,  $l_c = 620$  m, ampl. de 68X.

### 5.3.3 - VARIAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM RELAÇÃO À POSIÇÃO DAS FIBRAS

As figuras 5.30 e 5.31 mostram a influência do ângulo de posição das fibras e do avanço na rugosidade superficial do compósito de tecido laminado.

A rugosidade superficial é máxima com os ângulos de posição das fibras ( $\alpha$ ) em torno de  $45^\circ$  e  $225^\circ$  em relação à direção de corte, pois nesta posição a tendência da ferramenta é de delaminar o compósito, deixando sua superfície mais áspera em relação as demais posições. A rugosidade superficial aumenta com o avanço de maneira análoga como na usinagem dos metais, confirmando os resultados obtidos por WUNSCH [12,18].

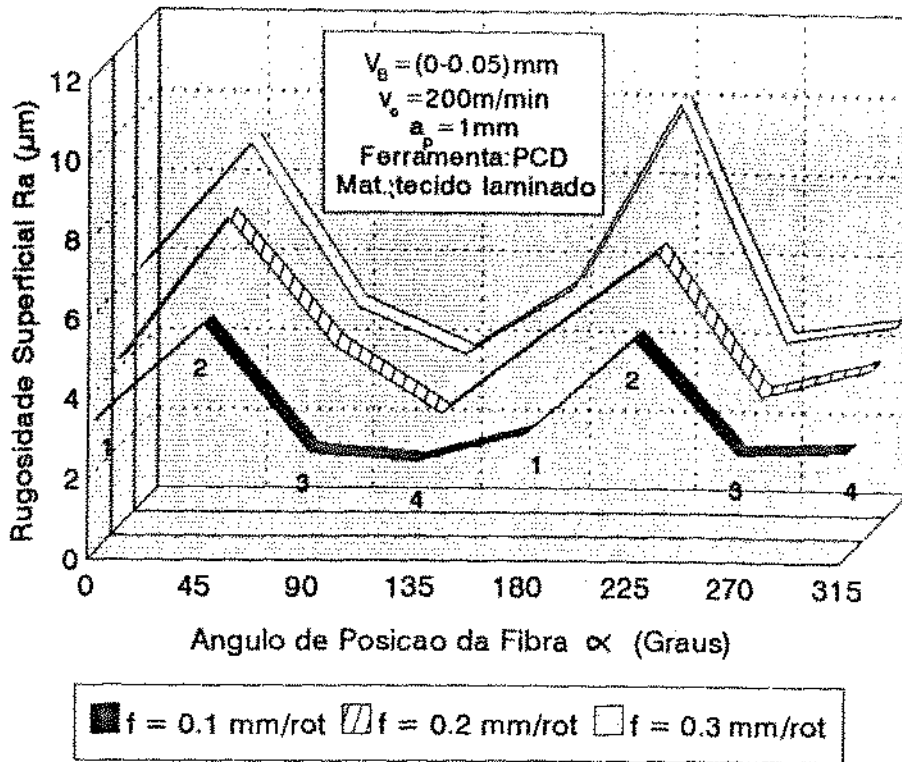


Figura 5.30 - Rugosidade superficial Ra em função do ângulo de posição das fibras.

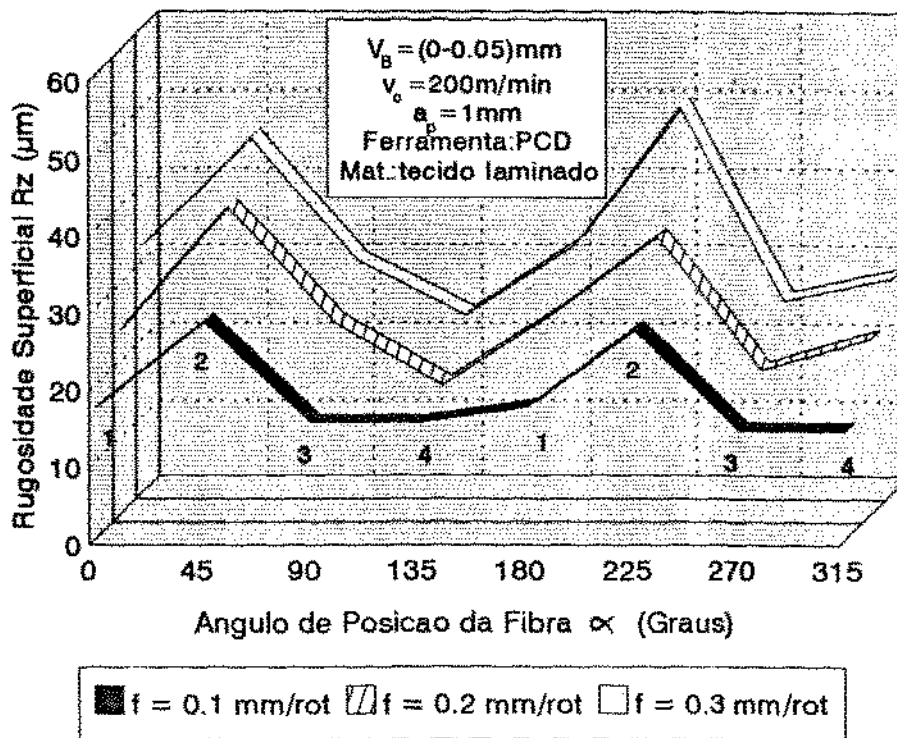


Figura 5.31 - Rugosidade superficial Rz em função do ângulo de posição das fibras.

#### 5.4 - INFLUÊNCIA DA DISPOSIÇÃO DAS FIBRAS NO DESGASTE DAS FERRAMENTAS

As figuras 5.32, 5.33, e 5.34, apresentam as curvas de desgastes das ferramentas de metal duro, cerâmica reforçada com whiskers, e diamante (PCD), respectivamente, em função do comprimento de corte. O comportamento dos desgastes das ferramentas são comparados entre os torneamentos dos compósitos de tecidos bobinado e laminado.

O compósito de tecido laminado é mais abrasivo às ferramentas de metal duro e cerâmica do que o bobinado. Enquanto que, para ferramenta de diamante não houve uma diferença nítida de comportamento do desgaste no torneamento dos dois compósitos.

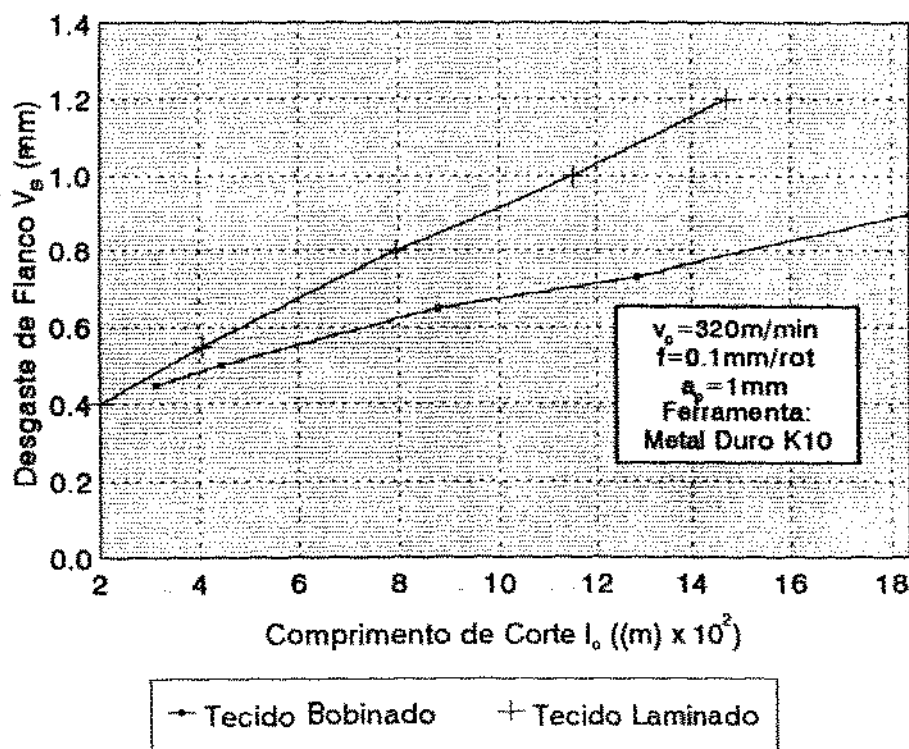


Figura 5.32 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte.



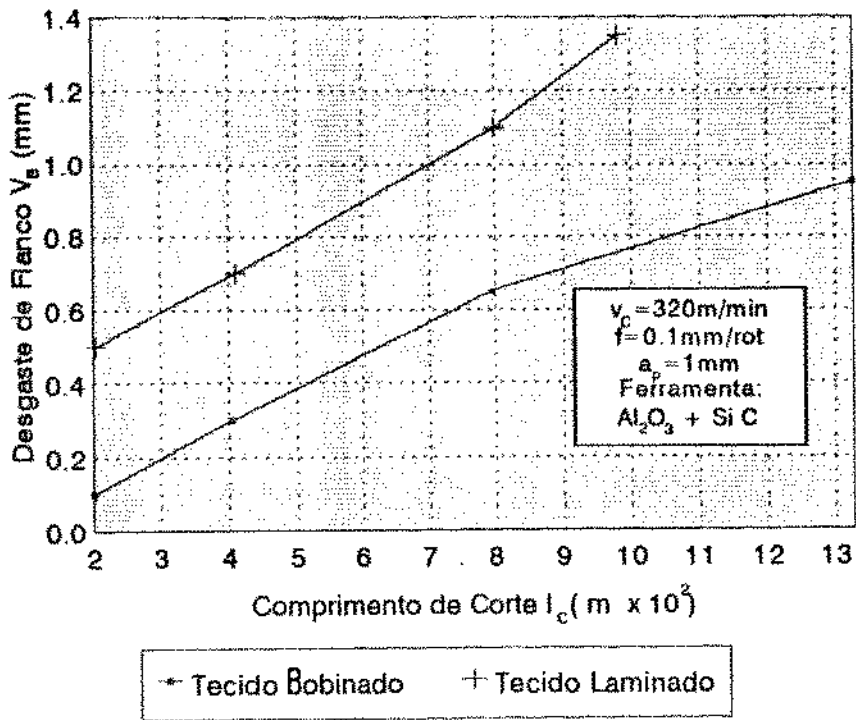


Figura 5.33 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte.

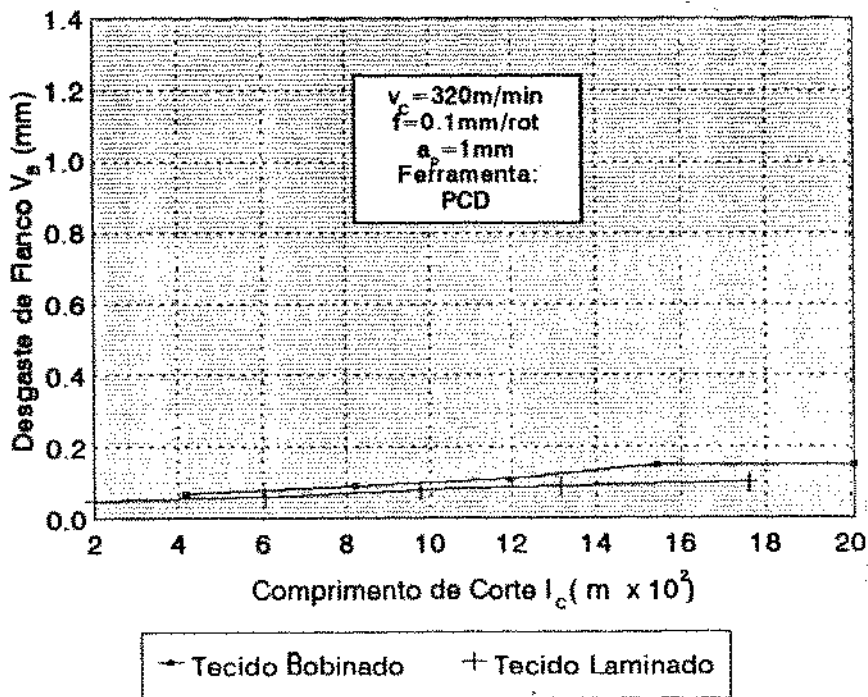


Figura 5.34 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte.

As figuras 5.35 e 5.36 mostram os desgastes das ferramentas de metal duro e de diamante, respectivamente, ocorridos no ensaio do compósito de tecido laminado. O desgaste da ferramenta de diamante é praticamente idêntico ao desgaste ocorrido no torneamento do compósito bobinado.

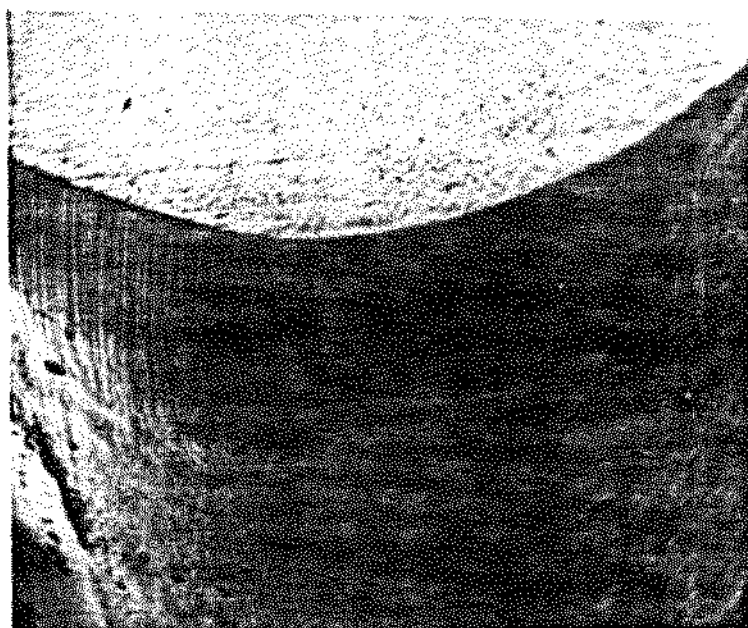


Figura 5.35 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro,  $V_B = 1,2$  mm,  $v_c = 320$  m/min,  $l_c = 1500$  m, (ampl. 65X).

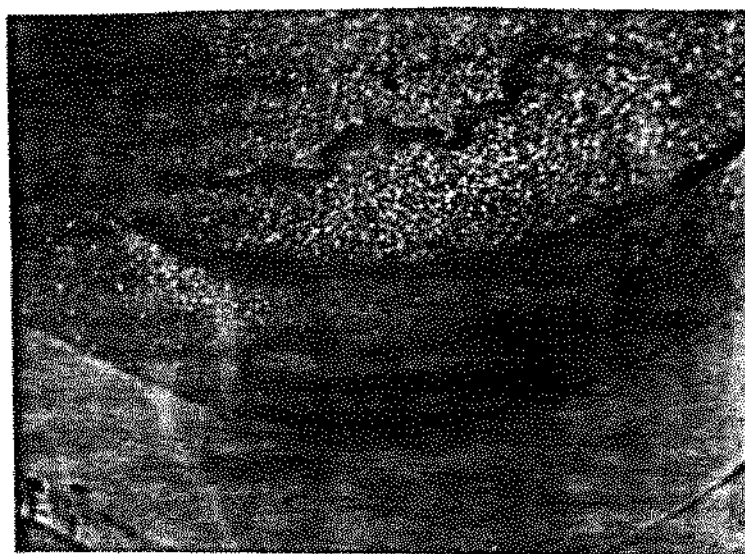


Figura 5.36 - Desgaste de flanco da ferramenta de diamante,  $V_B = 0,1$  mm,  $v_c = 320$  m/min,  $l_c = 1780$  m, (ampl. 68 X).

A maior abrasividade do tecido laminado em relação ao bobinado no torneamento com ferramentas de metal duro e cerâmica, deve-se ao fato da variação da orientação das fibras em relação à direção de corte. Neste caso a cada instante tem-se uma nova condição entre fibra e ferramenta, tornando a operação mais agressiva à ferramenta.

#### 5.5 - VIABILIDADE TÉCNICA - ECONÔMICA PARA ESCOLHA DA FERRAMENTA

Neste trabalho foram ensaiadas sete ferramentas de materiais diferentes: cerâmica pura, cerâmica mista, SIALON, cerâmica reforçada com whiskers, metal duro, nitreto de boro cúbico (CBN), e diamante (PCD).

As ferramentas de material cerâmico apresentaram um fraco desempenho no torneamento do compósito reforçado com fibras de vidro e carbono, exemplificado pela ferramenta de SIALON que sofreu o maior desgaste entre todas as ferramentas ensaiadas. O mecanismo de desgaste provável neste caso foi por abrasão mecânica, pois não foi observado nenhuma quebra ou avaria da ferramenta no ensaio. O melhor desempenho entre as ferramentas cerâmicas obteve-se com a alumina reforçada com whiskers de SiC, mas devido ao elevado custo da ferramenta comparado ao metal duro, não justifica o seu emprego.

A tabela 5.3 mostra os custos por vida, por aresta, e as vidas das ferramentas para um critério de desgaste de flanco  $V_B = 0,9$  mm.

Tabela 5.3 - Custos por aresta e por vida das ferramentas.

FERRAMENTAS	Custo/a. (Cr\$)	Custo/a. (US\$)	Vida lc(m) VB=0,9 mm	Custo/vida (Cr\$/m)
Cerâmica pura	19.470,00	3,54	750	25,96
Cerâmica mista	24.750,00	4,50	580	42,67
Cerâmica ref. SiC	123.750,00	22,50	1280	96,67
SIALON	61.875,00	11,25	450	137,50
Metal duro	4.015,00	0,73	1850	2,17
CBN	781.000,00	142,00	lc= 2300 m VB= 0,32mm	339,00
Diamante (PCD)	511.500,00	93,00	lc= 2000 m VB= 0,15mm	225,00

A ferramenta de CBN apresentou um desempenho superior às ferramentas de cerâmicas e de metal duro, mas ficou aquém da ferramenta de diamante. O custo do CBN de US\$ 142,00 por aresta, superior ao do diamante (US\$ 93,00) inviabiliza a sua aplicação no torneamento do compósito. Portanto, a escolha da ferramenta fica entre o metal duro por apresentar o menor custo por aresta e por vida, a cerâmica pura que apresentou o menor custo por aresta e por vida das cerâmicas, e o diamante que apresentou o melhor comportamento de todas as ferramentas.

Em operação de acabamento somente a ferramenta de diamante pode assegurar uma qualidade superficial do compósito com rugosidades Ra na faixa de 2,5 a 5,0  $\mu\text{m}$ , valor que dificilmente pode ser alcançado com outra ferramenta.

Em operação de desbaste deve ser feito um estudo mais detalhado, pois o custo por aresta da ferramenta de diamante é 127 vezes o custo da ferramenta de metal duro. Em função disto deve

ser realizado uma análise de custo/benefício de usinagem.

Levantando-se alguns dados sobre o torneamento do compósito de tecido bobinado especificamente, pode-se fazer uma comparação dos custos relativos à usinagem entre as ferramentas de metal duro, cerâmica pura, e diamante. O custo relativo à usinagem por peça ( $C_p$ ) é dado por [19]:

$$C_p = t_t \cdot \frac{(Sh + Sm)}{60} + \frac{tc \cdot C_{ft}}{T} \quad (5.1)$$

sendo:

$$t_t = tc + ts + ta + \frac{tp}{Z} + \left( \frac{tc}{T} - \frac{1}{Z} \right) \cdot t_{ft} \quad (5.2)$$

$$C_{ft} = \frac{C_f}{n_2} + C_{af} \cdot \frac{n_1}{n_2} + \frac{C_{pf}}{n_3} \quad \text{P/ inserto reafiável.} \quad (5.3)$$

$$C_{ft} = \frac{C_f}{n_2} + \frac{C_{pf}}{n_3} \quad \text{P/ inserto descartável.} \quad (5.4)$$

Na figura 5.1, admitindo-se que o desgaste de flanco da ferramenta de diamante (PCD) apresente uma taxa de crescimento com o comprimento de corte segundo a regressão linear dada por:  $V_B = 0,047 + 0,000055xlc$ . Pode-se estimar uma comparação de custos especificamente com relação à usinagem entre as ferramentas para um determinado critério de desgaste de flanco. A tabela 5.4 mostra os valores estimados dos tempos e custos de usinagem para as ferramentas de metal duro, cerâmica pura, e diamante, no torneamento de uma peça de compósito de tecido bobinado.

Tabela 5.4 - Tempos e custos por peça de usinagem para as ferramentas. Dado: US\$ 1 = Cr\$ 5.500,00.

DESCRIÇÃO	MD K10 VB=0,5 mm	CER. PURA VB= 0,5mm	DIAMANTE VB= 0,5mm
Tempo de corte da peça $t_c$ (min)	5,78	5,78	5,78
Tempos improdutivos $t_i$ (min)	3,7	3,7	3,7
Tempo de troca ferram. $t_{ft}$ (min)	0,5	0,5	0,5
Número de peças do lote $Z$	10	10	10
Tempo total confec. peça $t_t$ (min)	11,43	12,60	9,54
Vida das ferramentas $T$ (min)	1,44	0,91	25,73
Número de afiações $n_1$	-	-	5
Número de vidas da ferramenta $n_2$	8	8	6
Salário do operador $S_h$ (Cr\$/h)	16500,00	16500,00	16500,00
Salário da máquina $S_m$ (Cr\$/h)	110000,00	110000,00	110000,00
Custo da ferramenta $C_f$ (Cr\$)	32120,00	155760,00	511500,00
Custo ferramenta/vida $C_{ft}$ (Cr\$)	5816,00	19470,00	168038,00
Custo afiação ferramen. $C_{af}$ (Cr\$)	-	-	76725,00
Custo porta-ferramenta $C_{pf}$ (Cr\$)	720500,00	720500,00	720500,00
Custo de usinagem/peça $C_p$ (Cr\$)	47443,00	161670,00	57861,00

Os valores obtidos na tabela 5.4 mostram que a utilização de ferramentas de diamante e de cerâmica pura em operação de torneamento de desbaste de compósito de tecido bobinado apresenta um custo de usinagem por peça superior ao metal duro. Isto abrange as demais cerâmicas pois a relação custo/benefício destas ferramentas foram maiores que a obtida para cerâmica pura.

Este resultado deve ser recebido com cautela, devido as aproximações utilizadas para sua obtenção, tais como:

- A vida da ferramenta de diamante foi obtida através de uma extrapolação da curva de desgaste em função do comprimento de corte segundo uma regressão linear;
- Os resultados estão embasados para uma condição de corte específica. Em outra condição, o diamante e as cerâmicas podem apresentar um desempenho diferente;
- O critério de desgaste de flanco  $V_B = 0,5$  mm é um valor alto para ferramenta de diamante. Porém, adotar valores comparativos inferiores a 0,5 mm de  $V_B$  inviabilizaria a utilização do metal duro e das cerâmicas, devido ao elevado número de trocas que seria exigido das ferramentas;
- Na comparação entre as ferramentas de metal duro, cerâmica pura, e diamante, para utilização em torneamento de desbaste, o critério adotado de desgaste de flanco ( $V_B = 0,5$  mm) não traduz na realidade o fim da vida das ferramentas: O critério adotado é elevado para o diamante prejudicando seu processo de reafiação; e baixo para as ferramentas de metal duro e cerâmicas que podem trabalhar até com desgaste de flanco  $V_B$  de 1 mm.

Portanto, a escolha da ferramenta para torneamento de um compósito reforçado com fibras depende do tipo de operação a ser realizada e das condições de corte utilizadas. Em operação de acabamento a ferramenta de diamante propicia uma melhor qualidade superficial em relação as demais. Em operação de desbaste a utilização da ferramenta de metal duro mostrou-se mais viável que o diamante e as cerâmicas numa relação de custo/benefício.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos pode-se tirar as seguintes conclusões sobre o torneamento e a furação de compósito à base de resina fenólica reforçada com fibras de vidro e carbono:

- A rugosidade superficial da peça aumenta de maneira progressiva com o desgaste de flanco da ferramenta podendo chegar à delaminação do compósito;
- A utilização de ferramentas cerâmicas e de CBN no torneamento de compósito não é viável do ponto de vista técnico e econômico;
- Existe uma grande dispersão na medida do valor da rugosidade superficial do compósito para uma mesma peça, devido à distribuição dos defeitos causados por delaminação e craterização, decorrentes da direção relativa entre a fibra e a direção de corte;
- No torneamento com ferramenta de metal duro, a velocidade de corte considerada como uma condição crítica, situa-se entre 320 e 450 m/min. Abaixo de 320 m/min tem-se uma pequena variação do desgaste da ferramenta. Em 450 m/min a velocidade provoca rapidamente um desgaste exagerado;
- O compósito de tecido laminado é mais abrasivo às ferramentas cerâmicas e de metal duro do que o de tecido bobinado;



- A rugosidade superficial varia com o ângulo de posição das fibras no compósito de tecido laminado. As situações de rugosidades máximas ocorrem para ângulos de fibras de 45 e 225 graus com a direção de corte;
  
- Em operação de desbaste a utilização da ferramenta de metal duro apresentou-se como a melhor solução, pois apesar de sofrer desgaste superior ao diamante, resulta numa relação custo/benefício mais vantajosa, e dispensa cuidados operacionais especiais;
  
- Em operação de acabamento somente a ferramenta de diamante pode assegurar uma qualidade superficial com rugosidade Ra na faixa de 2,5 a 5,0  $\mu\text{m}$ ;
  
- A utilização de brocas de aço rápido com e sem cobertura de nitreto de titânio na furação de compósito de tecido laminado, atingiu desgastes exagerados para um comprimento de furo usinado muito pequeno, sendo que a broca revestida com nitreto de titânio apresentou um melhor desempenho.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o comportamento das ferramentas ensaiadas neste trabalho em outras condições de velocidade, avanço e profundidade de corte, e comparar com os resultados já obtidos.
- Estudar o desempenho da ferramenta de diamante em comprimentos (tempos) de corte superiores ao ensaiado neste trabalho.
- Testar outras geometrias de ferramentas e verificar a sua influência no torneamento do compósito.
- Fazer um estudo semelhante ao realizado neste trabalho para outros processos de usinagem como: fresamento, furação, e retificação.
- Estudar o fenômeno do desgaste das ferramentas cerâmicas ocorridos em usinagem de compósitos reforçados com fibras.
- Verificar a influência da proporção fibra/resina, do tipo de resina, e do processo de moldagem na usinagem de compósito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LÉLIS, G. M. - Materiais Compostos-Curso Básico. EMBRAER S/A, São José dos Campos-SP, 1986.
  
- [2] JÚNIOR, E. H. - Compósitos e Blendas Poliméricas. IBM, Instituto Latino Americano de Tecnologia, Campinas-SP, 1989.
  
- [3] MALLICK, P. K. - Fiber - Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. University of Michigan, USA, 1988.
  
- [4] LÉLIS, G. M. - Materiais Compostos - Reparos. EMBRAER S/A., São José dos Campos-SP, 1987.
  
- [5] AL-QUERESHI, H. A. - Materiais Compostos. ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, 1984.
  
- [6] VIANA, E. D. - Usinagem de Materiais Compostos. EMBRAER S/A, São José dos Campos-SP, 1988.
  
- [7] REINHART, T. J. - Engineering Materials Handbook, Composites, volume 1, ASM International, Ohio, 1987.
  
- [8] TAKESHITA, H., WEHARA, k. - Cutting Mechanism of Some Composite Materials. Second International Metal Cutting Conference, Tokyo University, Japan, 1985.

- [9] CUPINI, N. L., ZANINI, N. P., MARIOLANI, J. R. - Experiência em Usinagem de Ultra Precisão em Resina Epóxi Reforçada com Fibra de Carbono. Segundo Simpósio Brasileiro de Mecânica de Precisão, São Paulo, 1990.
- [10] TAKEYAMA, H. , LIJIMA, N., - Machinability of Glass Fiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining. Ikota Technical University, Japan, Annals of The CIRP, Vol. 37/1/1988.
- [11] ARAÚJO, U. C. - Dificuldades e Cuidados no Processo de Furação em Carbono. Máquinas e Metais, Setembro de 1989.
- [12] SPUR, G., WUNSCH, U. E., - Turning of Fibre Reinforced Thermoseting Plastics. Kunststoffe German Plastics, 1986.
- [13] KOPLEV A., LYSTRUP, A. - The Cutting Process, Chips, and Cutting Forces in Machining CFRP. Composites, volume 14-4, 1983.
- [14] MALHOTRA, S. K. - High Speed Steel Tool Wear Studies in Machining of Glass-Fiber Reinforced Plastics. Wear, Vol. 132, 1989.
- [15] HASEGAWA, Y., HANASAKY, S., and SATONARA, S. - Characteristics of Tool Wear in Cutting GFRP. 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo, 1984.

- [16] SKF FERRAMENTAS - Manual Técnico, São Paulo, 1987.
- [17] THIOKOL, M., ELEGANTE, T. L. - Filament - Wound Composites. Mechanical Engineering, pp 32-36, December 1986.
- [18] WUNSCH, U.E., SPUR, G. - Turning of Fiber-Reinforced Plastics. Institute of Machine Tools and Manufacturing Technology of Berlin, Manufacturing Review, Vol. 1, June de 1988.
- [19] FERRARESI, D. - Fundamentos da Usinagem dos Metais. Ed. Edgard Blucher, 1977.
- [20] BRAGA, D. U. - Monitoramento do Processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina, Tese de Mestrado, DEF/FEM/UNICAMP, 1992.
- [21] MANNAN, A. M., BROMS, S. - Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Motors Power and Current Measurements. Annals of the CIRP, vol. 38/1/1989.
- [22] DINIZ, A. E. - A Rugosidade Superficial Como Critério de Fim Vida de Uma Ferramenta de Torneamento. X COBEM, Vol. 2, pgs 627 a 630, Rio de Janeiro, 1989.
- [23] DINIZ, A. E., CUPINI, N. L. - Surface Roughness Turning of AISI 1045 Steel with Uncoated Carbide Tools. Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol. 11, número 2, Pgs. 171 a 182, 1989.

- [24] DINIZ, A. E. - A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento: Critério de Fim de Vida da Ferramenta e Fatores de Influência. Tese de Doutorado, UNICAMP, 1989.
- [25] GABOR, H. - Ferramentas para Máquinas CNC de HSS-E, ADX e TiN, Sobracon, São Paulo, 1990.
- [26] HULL, D. - An Introduction to Composite materials. Cambridge University Press, 1981.
- [27] NOVASKI, O. - Determinação das Condições Econômicas de Usinagem Através de Parâmetros Obtidos na Empresa. Tese de Doutorado, DEF/FEM/UNICAMP, 1989.
- [28] HEATH, P. J. - Ultrahard Tool Materials. De Beers Industrial Diamond Division (Pty) Ltd, England.
- [29] SANDIVIK - Coromant - Turning Tools and Inserts. Catálogo C 1000: 3-ENG, Sweden.
- [30] CARVALHO, R. S.- Características de usinagem vistas do ponto de vista econômico. Tese de doutorado, DEF/FEM/UNICAMP, 1991.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- [31] KRUNEEI, E. W. - Machining Applications and Performance of Compax Blank Tool and Borazon Compacts Tools. Conference on Tools and Dies for Industry, The University of Birmigham, General Eletric, October 1986.
- [32] KELLY, A., MILEIKO, S. T. - Fabrication of Composites, Handbook of Composites, vol 04, Elsevier Science Publishers, Amsterdan, 1983.
- [33] De BEERS, I. D. D. - Syndite-PCD Cutting Tools Blanks.
- [34] DÍFER Diamantes Industriais - Catálogo de ferramentas de CBN e Diamante para Usinagem. Catálogo de representante, São Paulo, Dez 1989.
- [35] SHELDON, R. P., - Composite Polimeric Materials, University of Bradford, U.K., 1982.
- [36] CUPINI, N. L., LEITE, S. B. - Torneamento do aço 4340 Temperado com Ferranenta Cerâmica. Sobracon, São Paulo, 1991.
- [37] STEVENS, T., - Carbon Fiber, Poised to Dominate, Mechanical Engineering, pp 35-38, August 1990.
- [38] KÖNING, W., SPUR, G. - Machining of New Materials, Annals of the CIRP, Vol.39/2/90.

- [39] TAGLIAFERRI, V., - CAPRINO, G., - Effect of Drilling Parameters on the Finish and Mechanical Properties of GFRP Composites. Tools Manufacturing, Vol. 30, pp 77-84, 1990.
- [40] KING, R. .L. - A Production Engineers View of Advanced Composite Materials. Material and Design, Vol. 3, 1982.
- [41] VACCARI, J. A. - Usinagem de Compósitos de Matriz de Alumínio Fundido", Maquinas e Metais, Numero 311, dez de 1991.
- [42] ISO/DIS 3685 - Tool life testing with single-point turning tools. International Organization for Standartization, 1975.



## ANEXO I

### RELAÇÃO DE FIGURAS

PÁGINAS

#### CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Principais formas de reforço .....	8
Figura 2.2 - Esquema representativo da fabricação de fibras de carbono .....	13
Figura 2.3 - Comparação da resistência específica e do módulo específico para várias fibras .....	15
Figura 2.4 - Influência da temperatura na resistência mecânica das resinas termofixas .....	23
Figura 2.5 - Esquema do processo de injeção "Spray Up" .....	26
Figura 2.6 - Esquema de moldagem por câmara de vácuo e por câmara de pressão .....	27
Figura 2.7 - Esquema do processo de bobinamento de fibras "Filament Winding".....	28
Figura 2.8 - Impregnação centrífuga .....	29
Figura 2.9 - Resistência à tração e densidade de materiais compósitos e metálicos .....	34
Figura 2.10 - Resistência à tração em função da deformação ....	35
Figura 2.11 - Custos relativos de alguns materiais .....	35

#### CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Número de furos por material de ferramenta .....	39
Figura 3.2 - Broca tipo espada .....	40
Figura 3.3 - broca tipo asa de morcego .....	40
Figura 3.4 - Desgaste da broca no ensaio de furação .....	42

Figura 3.5 - Direção das fibras nos corpos de prova .....	44
Figura 3.6 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras (PRFV) .....	45
Figura 3.7 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras (PRFC) .....	46
Figura 3.8 - Relação entre as forças de corte e passiva, e a direção das fibras (PRFK) .....	47
Figura 3.9 - Relação entre a rugosidade superficial e a direção das fibras .....	48
Figura 3.10 - Causas de deterioração da superfície na usinagem de plástico reforçado com fibras .....	49
Figura 3.11 - Corpos de prova com diferentes ângulos de fibras para o corte semi-ortogonal .....	51
Figura 3.12 - Relação entre as forças de corte e avanço e a direção das fibras .....	52
Figura 3.13 - Relação entre a rugosidade superficial e a direção das fibras .....	53
Figura 3.14 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte .....	56
Figura 3.15 - Efeito do fluido de corte no desgaste da ferramenta .....	57
Figura 3.16 - Mecanismo de corte no torneamento de um laminado .....	59
Figura 3.17 - Rugosidade superficial em função da direção das fibras .....	61
Figura 3.18 - Desgaste de flanco das ferramentas em função do tempo de corte .....	62

Figura 3.19 - Rugosidade superficial em função do ângulo de bobinamento do tubo .....	64
Figura 3.20 - Desgaste de flanco em função do ângulo de bobinamento do tubo .....	65
Figura 3.21 - Lâmina com extremidade de metal duro .....	67
Figura 3.22 - Rebarbação de extremidades .....	70

#### CAPÍTULO IV

Figura 4.1 - Tecido híbrido de fibra de vidro e carbono .....	72
Figura 4.2 - Bobinamento do corpo de prova .....	73
Figura 4.3 - Corpo de prova com tecido bobinado .....	74
Figura 4.4 - Impregnação manual do compósito .....	75
Figura 4.5 - Placa de compósito após a cura .....	76
Figura 4.6 - Compósito na forma de bloco retangular .....	76
Figura 4.7 - Corpo de prova com tecido laminado .....	76
Figura 4.8 - Dispositivo para fixação do corpo de prova com tecido bobinado .....	79
Figura 4.9 - Dispositivo para fixação do corpo de prova com tecido laminado .....	80
Figura 4.10 - Pontos de medida da rugosidade superficial no corpo de prova de tecido bobinado .....	83
Figura 4.11 - Processo de furação do compósito de tecido laminado .....	85
Figura 4.12 - Pontos de medição da rugosidade superficial do compósito de tecido laminado .....	86

## CAPÍTULO V

Figura 5.1 - Desgaste de flanco das ferramentas versus comprimento de corte .....	88
Figura 5.2 - Forças de avanço versus comprimento de corte .....	90
Figura 5.3 - Forças de corte versus comprimento de corte .....	90
Figura 5.4 - Forças de avanço versus desgaste de flanco .....	91
Figura 5.5 - Rugosidade superficial Ra versus comprimento de corte .....	92
Figura 5.6 - Rugosidade superficial R <sub>máx</sub> versus comprimento de corte .....	93
Figura 5.7 - Desgaste de flanco da ferramenta de CBN no torneamento de compósito bobinado .....	94
Figura 5.8 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro. V <sub>c</sub> = 320 m/min .....	95
Figura 5.9 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro ISO P10 no torneamento de aço ABNT 1045 .....	96
Figura 5.10 - Desgaste de flanco da ferramenta em função da velocidade de corte .....	97
Figura 5.11 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro, V <sub>c</sub> = 600 m/min .....	97
Figura 5.12 - Rugosidade superficial Ra versus velocidade de corte, (MD K10) .....	99
Figura 5.13 - Rugosidade superficial R <sub>máx</sub> versus velocidade de corte, (MD K10) .....	100
Figura 5.14 - Rugosidade superficial Ra versus velocidade de corte, (PCD) .....	101
Figura 5.15 - Rugosidade superficial R <sub>máx</sub> versus velocidade de corte, (PCD) .....	101

Figura 5.16 - Evolução dos desgastes das brocas com o comprimento de corte .....	103
Figura 5.17 - Ganho na furação com broca revestida de TiN versus desgaste de flanco .....	103
Figura 5.18 - Desgaste de flanco $V_B = 1,0$ mm, broca de aço rápido com cobertura de TiN .....	104
Figura 5.19 - Desgaste de flanco $V_B = 1,2$ mm, broca de aço rápido sem cobertura de TiN .....	104
Figura 5.20 - Desgastes das ferramentas versus comprimento de corte .....	106
Figura 5.21 - Forças de avanço versus comprimento de corte ...	107
Figura 5.22 - Forças de corte versus comprimento de corte ....	107
Figura 5.23 - Forças de avanço versus desgaste de flanco .....	108
Figura 5.24 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte .....	109
Figura 5.25 - Força de avanço versus comprimento de corte ....	110
Figura 5.26 - Curva de vida da ferramenta de metal duro .....	111
Figura 5.27 - Curva de vida da ferramenta de metal duro .....	111
Figura 5.28 - Desgaste de flanco da ferramenta em função da velocidade de corte .....	112
Figura 5.29 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro. $V_c = 450$ m/min .....	114
Figura 5.30 - Rugosidade superficial $R_a$ em função do ângulo de posição das fibras .....	115
Figura 5.31 - Rugosidade superficial $R_z$ em função do ângulo de posição das fibras .....	115

Figura 5.32 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte (MD) .....	116
Figura 5.33 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC) .....	117
Figura 5.34 - Desgaste de flanco versus comprimento de corte (PCD).....	117
Figura 5.35 - Desgaste de flanco da ferramenta de metal duro. Vc= 320 m/min .....	118
Figura 5.36 - Desgaste de flanco da ferramenta de diamante. Vc= 320 m/min .....	118

#### RELAÇÃO DE TABELAS

PÁGINAS

#### CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Composição do vidro E .....	10
Tabela 2.2 - Propriedades típicas dos Vidros E, S, e D .....	11
Tabela 2.3 - Propriedades de compósitos híbridos contituídos de fibras de carbono e vidro em resina poliéster .....	17
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas de compósitos de tecidos de fibra de vidro impregnados com resina fenólica .....	23
Tabela 2.5 - Características de materiais utilizados para aplicações estruturais .....	32

#### CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais ensaiados .....	41
---	----

Tabela 3.2 - Propriedades do material compósito .....	50
Tabela 3.3 - Parâmetros de corte do ensaio .....	55
Tabela 3.4 - Propriedades do laminado reforçado com fibra de vidro .....	60
Tabela 3.5 - Propriedades da fibra de carbono .....	63

#### CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Equipamentos e Instrumentos .....	81
--	----

#### CAPÍTULO V

Tabela 5.1 - Valores estimados da quantidade de calor gerado .....	98
Tabela 5.2 - Valores estimados da quantidade de calor gerado .....	113
Tabela 5.3 - Custos por aresta e vida das ferramentas .....	120
Tabela 5.4 - Tempos e custos por peça de usinagem para as ferramentas de diamante e metal duro .....	122

ANEXO II

TABELAS DE DADOS DOS EXPERIMENTOS

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO													
DESGASTE $V_B$ (mm) X COMPRIMENTO DE CORTE $l_c$ (m)										$V_c = 320$ m/min $f = 0,1$ mm/rot $a_p = 1$ mm			
MD K10		SIALON		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC		CBN		PCD	
$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$
330	.45	235	.50	199	.40	235	.50	213	.10	418	.10	433	.07
462	.50	462	.95	391	.60	462	.80	418	.30	809	.20	837	.09
895	.65	682	1.4	575	.80	682	1.0	809	.65	1170	.25	1213	.11
1299	.73			921	1.1	895	1.2	1339	.95	1804	.28	1559	.15
1852	.90									2301	.32	2024	.15

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO					
RUGOSIDADE SUPERIFICIAL Ra e Rmáx (μm) X VELOCIDADE DE CORTE $V_c$ (m/min)				$V_c = 320$ m/min $f = 0,1$ mm/rot $a_p = 1$ mm	
FERRAMENTA: METAL DURO K10			FERRAMENTA DIAMANMTE		
$V_c$	Ra	Rmáx	$V_c$	Ra	Rmáx
25	5,9	48	100	6,7	55
100	6,3	50	200	7,3	58
200	6,2	46	300	7,0	55
320	6,1	52	400	7,4	55
600	4,9	42	500	7,3	59



TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO													
FORÇA DE AVANÇO $F_f$ (kgf) X COMPRIM. DE CORTE $l_c$ (m)												Vc=320m/min f=0,1mm/rot ap= 1 mm	
METAL DURO K10		PCD		CBN		SIALON		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> ZrO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> TiC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> SiC	
$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$
330	8	220	5	213	5	235	16	199	13	235	10	213	6
462	11	423	8	418	9	462	29	391	18	462	17	418	11
682	15	837	7	617	10	682	34	575	20	682	26	617	16
895	15	1213	7	809	11			752	22	895	29	809	18
1100	18	1559	7	993	11			921	24			993	20
1299	16	1721	7	1170	11							1170	21
1491	18	2024	8	1339	12							1339	23
1675	17			1501	11								
1852	20			1656	12								
				1804	13								

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO													
FORÇA DE AVANÇO $F_f$ (kgf) X DESGASTE DE FLANCO $V_B$ (mm)												Vc=320m/min f=0,1mm/rot ap= 1 mm	
METAL DURO K10		PCD		CBN		SIALON		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> ZrO <sub>2</sub>		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> TiC		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>+</sup> SiC	
$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$
0,45	7	0,07	8	0,10	9	0,5	16	0,4	13	0,5	10	0,1	6
0,5	11	0,09	7	0,2	11	0,9	29	0,6	18	0,8	17	0,3	11
0,65	15	0,11	7	0,25	11	1,4	34	0,8	20	1,0	26	0,65	18
0,73	16	0,15	7	0,28	13			1,1	24	1,2	29	0,95	23
0,90	20	0,15	8	0,32	13								

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO								
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra e Rmáx (µm) X COMPRIMENTO DE CORTE l <sub>c</sub> (m)						Vc = 320 m/min f = 0,1 mm/rot ap = 1 mm		
METAL DURO K10			PCD			CBN		
l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx	lc	Ra	Rmáx	l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx
330	5,8	50	433	3,2	29	418	7,7	56
462	6,4	50	837	4,7	45	809	8,1	57
895	7,4	56	1213	4,9	46	1170	8,6	62
1299	9,7	62	1559	5,1	43	1804	9,5	69
1852	11,3	73	2024	5,8	51			

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO BOBINADO											
RUGOSIDADE SUPERFICIAL Ra e Rmáx (µm) X COMPRIMENTO DE CORTE l <sub>c</sub> (m)									Vc = 320 m/min f = 0,1 mm/rot ap = 1 mm		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub>			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC			SIALON			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC		
l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx	l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx	l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx	l <sub>c</sub>	Ra	Rmáx
199	7,8	60	205	8,0	59	235	7,4	64	213	7,5	53
391	9,4	75	462	10,5	83	462	12,0	88	418	8,0	72
575	11,0	72	895	13,0	98	682	14,6	100	809	11,1	73
921	13,0	96							1339	12,9	88

TORNEAMENTO DE TECIDO LAMINADO									
DESGASTE $V_B$ (mm) X COMPRIM. DE CORTE $l_c$ (m)									
Ferramenta: METAL DURO k10					f= 0,1 mm/rot $a_p= 1$ mm				
25m/min		100 m/min		200 m/min		320 m/min		450 m/min	
$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$
200	0,3	216	0,35	182	0,35	216	0,40	216	0,65
392	0,42	423	0,48	356	0,45	423	0,55	423	0,90
577	0,53	622	0,60	521	0,60	622	0,70	622	1,1
753	0,65	812	0,70	677	0,70	812	0,80		

DESGASTE $V_B$ x VELOCIDADE CORTE $V_c$				f = 0,1mm/rot $a_p = 1$ mm	
TORNEAMENTO Tecido Bobinado		TORNEAMENTO Tecido Laminado			
$V_c$ (m/min)	$V_B$ (mm) $l_c = 300m$	$V_c$ (m/min)	$V_B$ (mm) $l_c = 300m$	$V_B$ (mm) $l_c = 600m$	
25	0,30	25	0,37	0,55	
100	0,35	100	0,40	0,59	
200	0,40	200	0,42	0,65	
320	0,45	320	0,46	0,68	
600	0,95	450	0,75	1,08	

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO																
RUGOSIDADE $R_a$ e $R_z$ ( $\mu m$ ) x ÂNGULO DE POSIÇÃO FIBRA $\alpha$ (Graus)																
f (mm/ rot)	ÂNGULO DE POSIÇÃO DAS FIBRAS $\alpha$ (Graus)															
	0°		45°		90°		135°		180°		225°		270°		315°	
	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$	$R_a$	$R_z$
0,1	3,3	17	5,7	28	2,5	15	2,3	15	3,0	17	5,4	27	2,5	14	2,6	14
0,2	4,2	24	7,8	40	4,6	25	2,9	17	5,0	26	7,0	36	3,4	19	4,1	23
0,3	6,0	32	9,1	46	5,0	30	3,8	23	5,5	32	10	50	4,2	25	4,6	28

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO									
FORÇA DE AVANÇO $F_f$ (kgf) x COMP. CORTE $l_c$ (m)								$f = 0,1$ mm/rot $ap = 1$ mm	
$V_c = 25$ m/min		$V_c = 100$ m/min		$V_c = 200$ m/min		$V_c = 320$ m/min		$V_c = 450$ m/min	
$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$
200	5	192	6	182	6	216	7	216	11
336	7	376	8	356	8	423	10	423	18
492	8	482	9	521	10	622	14	622	22
640	9	622	9	677	10	812	16		
753	11	812	12						

FURAÇÃO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO				
COMP. DE AVANÇO $l_f$ (mm) X DESGASTE $V_B$ (mm)			$V_c = 15$ m/min $f = 0,13$ mm/rot	
$V_B$ (mm)	BROCA SEM TiN $l_f$ (mm)	BROCA COM TiN $l_f$ (mm)	DIFERENÇA $\Delta l_f$ (mm)	GANHO $\Delta l_f / l_f$ (%)
0,2	50	80	30	60
0,4	100	165	65	65
0,6	160	270	110	70
0,8	250	405	155	62
1.0	405	530	125	30

TORNEAMENTO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO					
DESGASTE $V_B$ (mm) X COMPRIENTO DE CORTE $l_c$ (m)					
$V_c=320\text{m/min}$ $f=0,1$ mm/rot $a_p=1\text{mm}$					
PCD		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC		METAL DURO K10	
$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$	$l_c$	$V_B$
216	0,05	216	0,50	216	0,40
622	0,06	423	0,70	423	0,55
994	0,08	812	1,10	812	0,80
1333	0,09	994	1,35	1168	1,00
1777	0,10			1489	1,20

TORNEAMENTO DE COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO					
FORÇA $F_f$ (kgf) X COMP.CORT. $l_c$ (m)					
$V_c=320\text{m/min}$ $f=0,1\text{mm/rot}$ $a_p=1\text{mm}$					
METAL DURO K10		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC		PCD	
$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$	$l_c$	$F_f$
216	6	216	7	216	2
423	12	423	14	423	4
622	14	622	22	622	5
812	18	812	27	994	5
994	21	994	32	1168	6
1168	23			1489	7
1333	25			1777	8
1489	27				

TORNEAMENTO DE COMPÓSITO TECIDO LAMINADO			
FORÇA DE AVANÇO $F_f$ (kgf) X DESGASTE DE FLANCO $V_B$ (mm)			
$V_c = 320\text{m/min}$ $f = 0,1\text{ mm/rot}$ $a_p = 1\text{ mm}$			
METAL DURO K10		$\text{Al}_2\text{O}_3 +$ SiC	
$V_B$	$F_f$	$V_B$	$F_f$
0,40	6	0,50	7
0,55	12	0,70	14
0,80	18	1,10	27
1,00	23	1,35	32
1,20	27		

FURAÇÃO DO COMPÓSITO DE TECIDO LAMINADO		
DESGASTE $V_B$ X COMPRIMENTO DE AVANÇO $l_f$		
$V_c = 15\text{ m/min}$ $f = 0,13\text{mm/rot}$		
$l_f$ (mm)	$V_B$ (mm)	
	BROCA S/TiN	BROCA C/TiN
135	0,55	0,35
270	0,85	0,60
405	1,00	0,80
540	1,20	1,00