

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi
Reforçado com Fibras de Vidro

Proponente: Paulo Eustáquio de Faria

Orientador: Prof. Alexandre Mendes Abrão, PhD

Co-Orientador: Prof. Haroldo Béria Campos, Dr.

Belo Horizonte – fevereiro de 2007

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Estudo sobre a Furação de Compósito de Resina Epóxi
Reforçado com Fibras de Vidro

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Fevereiro – 2007

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de esforços de diversas pessoas as quais não poderia deixar de agradecer:

Ao Prof. Alexandre Mendes Abrão do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela orientação deste trabalho, pela competência, dedicação e amizade.

Ao Prof. Haroldo Béria Campos do corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, pela co-orientação deste trabalho, pela competência, dedicação e amizade.

Aos Professores Juan Carlos Campos Rubio e Paulo César Matos Rodrigues do corpo docente do Departamento de Engenharia da UFMG, pelo apoio, valiosa orientação e colaboração.

À prof. Cristina Godoy, do Depto de Engenharia Metalúrgica da UFMG, pela utilização dos Laboratório de Revestimentos Tribológicos.

À prof. Marta Afonso de Freitas, do Depto de Engenharia de Produção da UFMG, pelo apoio no planejamento experimental e na análise dos resultados.

Ao Sr. Eduardo Antônio Carvalho, do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, pela colaboração e fotomicrografias empregadas neste trabalho.

Ao discente Ricardo Campos, pelo auxílio prestado na realização dos testes de desgaste.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pela convivência neste período de árduo trabalho.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de estudo e ao programa de cooperação internacional CAPES/GRICES.

Finalmente, mas não por último, gostaria de registrar meus agradecimentos a todos os meus familiares, pai, mãe, irmãos e irmãs, e principalmente a minha querida esposa, Miriam Madalena de Lima, pelo carinho, amor e compreensão nos bons e maus momentos, durante a realização deste trabalho.

Resumo

O desenvolvimento tecnológico tem permitido ao homem produzir aparelhos, equipamentos e máquinas cada vez mais sofisticados, obrigando a busca por matérias-primas que possam atender de forma satisfatória a essas novas necessidades. Materiais como os tradicionais metais, polímeros e cerâmicos ainda são largamente empregados, mas vêm sendo substituídos por materiais compósitos, daí a necessidade de se processar esses materiais para que possam ser utilizados como componentes de produtos diversos. Uma das maneiras de se processar estes materiais é através de operações de usinagem, o que motiva o presente trabalho. Mais especificamente, este trabalho investiga a usinabilidade de material compósito a base de resina epóxi reforçada com fibras de vidro durante a operação de furação, empregando, para tanto, brocas de aço rápido e de metal duro com diferentes geometrias e sob condições de corte distintas. Além da caracterização do material, foram realizados ensaios de medição de força de avanço, avaliação do desgaste das ferramentas de corte, delaminação do furo, rugosidade da parede do furo, desvios dimensional e de circularidade dos furos e avaliação das formas dos cavacos. Os resultados mostraram que o avanço, a gramatura da fibra e a geometria da broca são os principais parâmetros que afetam a força de avanço. Em relação ao desgaste das ferramentas de corte, a broca de aço rápido sofreu desgaste acentuado após a execução de 1000 furos, ao passo que a broca de metal duro apresentou desgaste desprezível após 24000 furos. A abrasão foi o principal mecanismo de desgaste observado, e o uso de ferramenta de metal duro com revestimento apresentou influência sobre a resistência ao desgaste da broca e a força de avanço. A delaminação dos furos foi influenciada pela geometria e pelo desgaste das brocas, isto é, quanto maior o ângulo de posição da ferramenta e o desgaste, maior a delaminação do furo. Além disso, a delaminação foi mais acentuada para valores baixos de avanço. A rugosidade da parede do furo aumentou com a elevação do avanço, mas mostrou-se pouco sensível a variações na velocidade de corte. A variação dimensional (diâmetro) e de circularidade dos furos foram fortemente influenciadas pelo desgaste da broca. A qualidade da parede do furo produzido com a broca de metal duro foi superior à qualidade proporcionada pela broca de aço rápido. Finalmente, a utilização de valores mais altos de avanço resultou na produção de cavacos mais espessos. Já a elevação do desgaste da ferramenta resultou em cavacos na forma de pó.

Palavras-chave: compósitos, delaminação, desgaste, força, furação.

Abstract

The technological development has allowed the manufacture of sophisticated goods, leading to the pursuit of materials able to satisfactorily fulfill these requirements. Materials such as traditional metals, polymers and ceramics are still widely employed; however, they have been increasingly replaced by composite materials, which must be processed to the finished geometry and dimensions. This work is concerned with drilling of glass fibre reinforced epoxy resin using high speed steel and cemented tungsten carbide drills with distinct geometries and under various cutting parameters. In addition to the work material characterization, the experimental work involved measuring of feed force, tool wear, hole delamination, hole wall roughness, dimensional and circularity deviations and chip form. In general, the results indicated that feed rate, bundle thickness and drill geometry were the principal parameters affecting feed force. As far as the tool wear is concerned, the high speed steel drill showed severe wear after drilling 1000 holes, whereas the carbide drill presented negligible wear after producing 24000 holes. Abrasion was the principal wear mechanism observed and the use of coated carbide drill did represent any improvement in tool wear resistance and feed force. Delamination of the holes was affected by drill geometry and wear, i.e., the higher the cutting edge angle and the feed rate, the higher the delamination. Furthermore, the damage is accentuated when feed rate is reduced. The wall surface roughness increases with feed rate, however, it was less sensitive to changes in cutting speed. The dimensional (diameter) and circularity variations were strongly affected by tool wear. The quality of the hole wall generated by the tungsten carbide drill was superior to that produced by the high speed steel tool. Finally, thicker chips were generated when drilling at higher feed rates. Additionally, increasing tool wear resulted in chips in the powder form.

Keywords: composite, delamination, drilling, feed force, tool wear.

SUMÁRIO

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xxi
Lista de Símbolos, Abreviaturas e Siglas	xxv
CAPÍTULO I	1
1.INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	5
2.OBJETIVO	5
CAPÍTULO III	7
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	7
3.1.1	10
3.1.1.1	12
3.1.1.2	14
3.1.1.3	16
3.1.2	18
3.1.3	23
3.1.4	26
3.1.5	27
3.1.6	28
3.2	29
3.2.1	29
3.2.2	30
3.2.3	31

3.2.4	Processo “prepreg”	32
3.2.5	Pulverização	34
3.2.6	Processo SMC ou de moldagem de folha	35
3.3	Processos de Fabricação por Usinagem.....	36
3.4	Mecanismo de Formação do Cavaco	40
3.5	Esforços de Corte no Processo de Usinagem.....	47
3.6	Ferramentas de Corte	57
3.7	Desgaste e Vida da Ferramenta de Corte.....	71
3.8	Qualidade Superficial de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF).....	78
3.8.1	Rugosidade de PRF.....	82
3.8.2	Delaminação	85
3.9	Processos Especiais de Usinagem	96
3.9.1	Usinagem Não Convencional	96
3.9.2	Usinagem com Altíssimas Velocidades.....	99
CAPÍTULO IV.....		101
4.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL		101
4.1	Materiais e Equipamentos	101
4.1.1	Corpos-de-Prova	102
4.1.2	Ferramentas de Corte	103
4.1.3	Caracterização do Compósito	105
4.1.4	Centro de Usinagem.....	106
4.1.5	Sistema de Medição de Forças de Usinagem.....	106
4.1.6	Sistema de Aquisição de Imagens.....	108
4.1.7	Microscópio Eletrônico de Varredura.....	109
4.1.8	Rugosímetro	109
4.1.9	Máquina de Medição de Coordenadas	109
4.1.10	Outros Instrumentos Utilizados nos Experimentos.....	110
4.2	Metodologia.....	111
4.2.1	Fabricação dos Compósitos	111

4.2.2	Ensaio de Caracterização do Compósito	112
4.2.3	Medição da Força de Avanço	113
4.2.4	Avaliação do Desgaste das Ferramentas de Corte	118
4.2.5	Avaliação da Delaminação	118
4.2.6	Qualidade da Parede dos Furos.....	119
4.2.7	Medição da Rugosidade da Parede dos Furos.....	120
4.2.8	Medição do Diâmetro e da Circularidade dos Furos	122
4.2.9	Avaliação da Forma dos Cavacos.....	123
CAPÍTULO V		124
5.RESULTADO E DISCUSSÃO.....		124
5.1	Caracterização dos Corpos-de-Prova	124
5.2	Força de Avanço	127
5.2.1	Influência da Geometria da Ferramenta de Corte.....	128
5.2.2	Influência da Gramatura da Fibra de Reforço.....	129
5.2.3	Influência do Desgaste da Ferramenta.....	131
5.3	Desgaste das Ferramentas de Corte.....	138
5.4	Delaminação do Corpo-de-Prova	146
5.4.1	Influência do Tipo de Broca	146
5.4.2	Influência da Gramatura da Fibra	152
5.4.3	Influência do Número de Furos	156
5.5	Qualidade da Parede do Furo.....	162
5.6	Rugosidade	164
5.7	Diâmetro e Circularidade dos Furos	168
5.8	Formas de Cavaco	176
CAPÍTULO VI.....		178
6.CONCLUSÃO.....		178
CAPÍTULO VII.....		183
7.PROPOSTA PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO.....		183

8.REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	184
ANEXO – I	195
ANEXO – II	197

Lista de Figuras

Figura 3.1 - As fases de um compósito (Daniel e Ishai, 1994).....	9
Figura 3.2 - Diagrama esquemático da classificação dos materiais compósitos, segundo Daniel e Ishai (1994).....	11
Figura 3.3 - Representação esquemática do arranjo (a) unidirecional e (b) multidirecional para compósitos do tipo laminado com várias camadas, Smith (1998).	18
Figura 3.4 - Fibras sintéticas: (a) aramida, (b) carbono e (c) vidro.	23
Figura 3.5 - Tipos de tecedura usadas em compósitos (Ávila et al, 2001).	26
Figura 3.6 - Partes em materiais compósitos da aeronave Embraer EMB-145 (Ribeiro, 2002).	29
Figura 3.7 - Diagrama esquemático mostrando o processo de pultrusão, de acordo com Smith (1999).	31
Figura 3.8 - Representação esquemática da técnica de enrolamento de filamento, segundo Smith (1999).	32
Figura 3.9 - Representação esquemática da técnica de “prepreg”, de acordo com Callister (2002).	33
Figura 3.10 - Representação do método por pulverização, segundo Smith (1999).	35
Figura 3.11 - Representação esquemática do método SMC, conforme Smith (1998).	36
Figura 3.12 - Divisão dos custos de produção por usinagem (Kopac, 1998).	39
Figura 3.13 - Representação esquemática do corte de compósitos em várias direções, de acordo com Santhanakrishnan et al (1993).	40
Figura 3.14 - Diagrama da cunha cortante, segundo Trent (1984).	41

Figura 3.15 - Desenho esquemático do mecanismo de corte ortogonal de compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV), de acordo com Wang et al (1995).....	44
Figura 3.16 - Representação esquemática da operação de aplainamento de compósito, segundo Wang e Zhang (2003).....	45
Figura 3.17 - Efeito da orientação das fibras sobre a rugosidade da superfície, para profundidade de corte 0,001mm, conforme Wang e Zhang (2003).....	45
Figura 3.18 - Efeito da orientação das fibras sobre a rugosidade da superfície, para profundidade de corte 0,05mm, conforme Wang e Zhang (2003).....	46
Figura 3.19 - Representação esquemática do mecanismo de corte das fibras no aplainamento de um compósito, conforme Wang e Zhang (2003).....	46
Figura 3.20 - Círculo de Merchant, de acordo com Ferraresi (1977).....	48
Figura 3.21 - Brocas: (a) Stub Length e (b) Brad & Spur, apresentadas por Davim et al (2004a).....	50
Figura 3.22 - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a força de avanço, conforme Davim et al (2004a).....	51
Figura 3.23 - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a pressão de corte (k_s), de acordo com Davim et al (2004a).....	51
Figura 3.24 - Força de avanço em função diâmetro da broca. (El-Sonbaty et al 2004)	52
Figura 3.25 - Torque em função do diâmetro da broca. (El-Sonbaty et al 2004).....	53
Figura 3.26 - Potência de corte em função do avanço e da velocidade de corte para as brocas Straight Shank e Brad & Spur, segundo Davim e Reis (2003b).	54
Figura 3.27 - Pressão específica de corte em função do avanço e da velocidade de corte para as brocas Straight Shank e Brad & Spur, conforme Davim e Reis (2003b).....	54
Figura 3.28 - Representação esquemática da orientação das fibras durante o corte ortogonal, mostrado por Bhatnagar et al (1995).....	55

- Figura 3.29** - Variação da força (F_t) em função de diferentes ângulos das fibras (θ) e ângulos de saída da ferramenta (γ), segundo Bhatnagar et al (1995).56
- Figura 3.30** - Variação da força (F_c) em função de diferentes ângulos das fibras (θ) e ângulos de saída da ferramenta (γ), conforme Bhatnagar et al (1995).56
- Figura 3.31** - Materiais para ferramentas de corte (Stoeterau apud Lanna, 2006).57
- Figura 3.32** - Representação esquemática das propriedades dos materiais para ferramentas de corte, apresentado por WALTER (2002).59
- Figura 3.33** - Características e propriedades do sistema conjugado para recobrimento de ferramentas (Rickerby e Matthews apud Batista e Lima, 1997).60
- Figura 3.34** - Classificação das técnicas avançadas da engenharia de superfície, conforme Holmberg e Matthews (1994).60
- Figura 3.35** - Geometria de ponta da ferramenta, mostrada em An et al (1997).63
- Figura 3.36** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função do avanço, conforme An et al (1997).64
- Figura 3.37** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função da profundidade de corte, conforme An et al (1997).64
- Figura 3.38** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função da velocidade de corte, conforme An et al (1997).65
- Figura 3.39** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função do avanço, de acordo com An et al (1997).65
- Figura 3.40** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função da profundidade de corte, de acordo com An et al (1997).66
- Figura 3.41** - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função da velocidade de corte, de acordo com An et al (1997).66
- Figura 3.42** - Desenho esquemático das duas brocas, conforme Piquet et al (2000).67

- Figura 3.43** - Furos produzidos pelas duas brocas: (a) e (b) entrada e saída do furo feitos com a broca convencional, (c) e (d) entrada e saída do furo feitos com a broca específica, segundo Piquet et al (2000).....68
- Figura 3.44** - Gráfico da força de avanço em função do avanço para placas sem e com pré-furação, de acordo com Tsao e Hocheng (2003a).69
- Figura 3.45** - Brocas empregadas nos testes: (a) helicoidal, (b) Candle Stick e (c) Saw, mostradas em Tsao e Hocheng (2004b).....69
- Figura 3.46** - Desenho esquemático do sistema empregado para gerar a imagem e medir a delaminação, apresentado por Tsao e Hocheng (2004b).70
- Figura 3.47** - Imagem gerada pela C-Scan Ultrasonic: para as broca (a) helicoidal, (b) Candle Stick e (c) Saw, mostradas em Tsao e Hocheng (2004b).....70
- Figura 3.48** - Representação esquemática das formas de desgastes ocorridos em ferramentas de corte, mostrada em Diniz (2003).....72
- Figura 3.49** - Representação esquemática do mecanismo de desgaste da ferramenta de corte em função da temperatura de corte, conforme Kopac et al (2001).....73
- Figura 3.50** - Corpos-de-prova de materiais compósitos: (a) bobinado e (b) laminado, representados em Ferreira e Cupini (1993).....74
- Figura 3.51** - Desgastes de flanco versus comprimento de corte, empregando-se diversos materiais para ferramenta de corte, conforme Ferreira e Cupini (1993).....75
- Figura 3.52** - Desgaste de flanco em função do comprimento de corte, e da ferramenta de corte, para vários materiais, conforme (Ferreira et al, 1999).....77
- Figura 3.53** - Desgaste de franco sem desgaste de cratera: ferramenta K10, $v_c=310\text{m/min}$, $f=0,12\text{mm/rev}$, $a_p=1\text{mm}$, mostrado em Ferreira et al (1999). .78
- Figura 3.54** - Diagrama das tolerâncias geométricas, mostrado em Cavaco (2002).79
- Figura 3.55** - Evolução da precisão dimensional atingida pelo processo de usinagem no decorrer do tempo, conforme Taniguchi (1983).....81

- Figura 3.56** - Variação de R_{max} em função das forças: (a) F_S e (b) F_D , respectivamente, conforme Ogawa et al (1997).82
- Figura 3.57** - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a rugosidade (R_a), segundo Davim et al (2004a).83
- Figura 3.58** - Fresas de metal duro classe K10 empregadas nos experimentos: (a) fresa de dois canais e (b) fresa de seis canais, mostradas em Davim e Reis (2004d).83
- Figura 3.59** - Rugosidade em função do comprimento de corte, para ferramentas de materiais diferentes, conforme Ferreira e Cupini (1993).84
- Figura 3.60** - Representação esquemática da definição do ângulo da aresta de corte (γ), direção das fibras e das áreas (A), (B), (C) e (D), conforme Aoyoma et al (2001).86
- Figura 3.61** - Micrografia (a) com os danos causados na área A e micrografia (b) com os danos causados na área D, de acordo com Aoyoma et al (2001).87
- Figura 3.62** - Representação esquemática da furação com suporte em (a) e sem suporte em (b), mostrado em Capello (2004).87
- Figura 3.63** - Fotografia dos furos: em (a) apresenta-se o furo com um pouco de delaminação utilizando-se suporte, e em (b) apresenta-se o furo com delaminação sem utilizar o suporte, conforme Capello (2004).88
- Figura 3.64** - Mecanismo de delaminação, segundo Capello (2004).89
- Figura 3.65** - Influência do avanço e do diâmetro do furo do suporte sobre a área delaminada, conforme Capello (2004).89
- Figura 3.66** - Dispositivo para amortecer o avanço da broca, conforme Capello (2004).90
- Figura 3.67** - Fotografia dos furos: (a) furo com delaminação gerado sem utilizar suporte, (b) furo com pouca delaminação, utilizando-se amortecedor e (c) furo com pouca delaminação, utilizando-se suporte, conforme (Capello, 2004).90

- Figura 3.68** - Desenho esquemático da furação de compósito com delaminação: (a) entrada e (b) saída da broca, mostrado em Davim e Reis (2003b).91
- Figura 3.69** - Fator de delaminação em função do avanço e da velocidade de corte, para as duas brocas, de acordo com Davim e Reis (2003b).92
- Figura 3.70** - Brocas empregadas nos testes: (a) helicoidal HSS, (b) 4 canais K10 e (c) helicoidal K10, mostradas em Davim e Reis (2003e).93
- Figura 3.71** - Fator de delaminação em função de f e v_c , para os dois tipos de ferramenta (HSS e K10) com as mesmas geometrias, conforme Davim e Reis (2003e). ..93
- Figura 3.72** - Fator de delaminação em função de f e v_c , com ferramentas K10 com geometrias diferentes, de acordo com Davim e Reis (2003e).94
- Figura 3.73** - Diagrama esquemático da medida do dano máximo (w_{max}) no fresamento do compósito, apresentado em Davim et al (2004c).95
- Figura 3.74** - Fator de delaminação em função do avanço e da velocidade de corte, para os dois tipos de compósitos, conforme Davim et al (2004c).95
- Figura 3.75** - Extensão do dano em função do tempo de irradiação na furação de PRFA e PRFV utilizando-se laser.98
- Figura 3.76** - Faixas possíveis de velocidade de avanço e velocidade de corte para diferentes materiais usinados com alta velocidade, conforme Weck et al (1999).100
- Figura 4.1** - Tipo de tecido empregado na fabricação dos compósitos.102
- Figura 4.2** - Brocas com diâmetro de 5mm empregadas nos ensaios de furação:(a) EDP27199, (b) A1141, (c) A1163 , (d) A1167A e (e) A1163TiN.104
- Figura 4.3** - Máquina de ensaios universal SHIMADZU, modelo AG-IS MS.....105
- Figura 4.4** - Centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560.....106
- Figura 4.5** - Sistema de medição de força de usinagem.107

Figura 4.6 - Sistema de aquisição de imagens.....	108
Figura 4.7 - Rugosímetro portátil MITUTOYO, modelo SURFTEST 301.	109
Figura 4.8 - Máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D...	110
Figura 4.9 - Ensaio de resistência mecânica à tração realizado no compósito.....	112
Figura 4.10 - Corpo-de-prova preso à máquina, no ensaio de parada rápida.....	113
Figura 4.11 - Placa de alumínio usada como suporte de fixação sobre o dinamômetro.....	114
Figura 4.12 - Placa de alumínio usada como suporte de fixação sobre a mesa da máquina.....	114
Figura 4.13 - Detalhe da montagem utilizada para a furação dos corpos-de-prova.	115
Figura 4.14 - Tela gráfica mostrada no monitor do computador do sistema de medição de força, com os gráficos de força das direções x, y e z, respectivamente...	116
Figura 4.15 - Corpos-de-prova após a furação: (a) placa utilizada para medição da força e (b) placa empregada para desgastar a broca.....	117
Figura 4.16 - Área do furo e área delaminada.	119
Figura 4.17 - Corpos-de-prova utilizados para avaliar a qualidade da parede do furo.....	120
Figura 4.18 - Corpo-de-prova com corte transversal e parede do furo em destaque.....	121
Figura 4.19 - Medição do diâmetro e da circularidade do furo.	122
Figura 5.1 - Tensão verdadeira contra deformação verdadeira.	125
Figura 5.2 - Desgaste em função da distância percorrida no ensaio de esfera sobre disco.	125
Figura 5.3 - Coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio de esfera sobre disco.	126
Figura 5.4 - Fotomicrografia do ensaio de parada rápida para o compósito reforçado com fibras:(a) ampliação de 15 vezes, (b) ampliação de 500 vezes.	127

- Figura 5.5** - Força de avanço em função do avanço para três velocidades de corte e quatro tipos de brocas.128
- Figura 5.6** - Força de avanço em função do avanço para três gramaturas de malha.130
- Figura 5.7** - Força de avanço em função do número de furos para a broca de aço rápido A1141.....131
- Figura 5.8** - Força de avanço em função do número de furos para a broca de metal duro A1163.....132
- Figura 5.9** - Força de avanço em função do avanço para furação do milésimo furo, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.133
- Figura 5.10** - Força de avanço em função do número de furos para as brocas de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$135
- Figura 5.11** - Força de avanço em função do número de furos para as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN.....136
- Figura 5.12** - Força de avanço em função do número de furos, para a broca de metal duro A1163 empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$137
- Figura 5.13** - Fotomicrografia do desgaste das arestas transversal, principal e secundária da broca de aço rápido A1141: (a) ampliação de 15 vezes, (b) ampliação de 350 vezes e (c) ampliação de 750 vezes.....140
- Figura 5.14** - Valor da área delaminada em função das velocidades de corte 55 e 86m/min e avanços de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot, respectivamente, empregando-se a broca de aço rápido A1141.....158
- Figura 5.15** - Valor da área delaminada em função do número de furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot}$ utilizando-se a broca de aço rápido A1141....160
- Figura 5.16** - R_a em função do avanço, para $v_c=30\text{m/min}$164
- Figura 5.17** - R_a em função do avanço, para $v_c=60\text{m/min}$165
- Figura 5.18** - R_a em função do avanço, para $v_c=90\text{m/min}$165

Figura 5.19 - R_a em função da velocidade de corte, para $f=0,1\text{mm/rot}$	166
Figura 5.20 - R_a em função da velocidade de corte, para $f=0,5\text{mm/rot}$	166
Figura 5.21 - R_a em função da velocidade de corte, para $f= 1,0\text{mm/rot}$	167
Figura 5.22 - Rugosidade média aritmética (R_a) (μm) em função da velocidade de corte (m/min) e do avanço (mm/rot).....	168
Figura 5.23 - Medição do diâmetro do furo 1 para a broca de aço rápido A1141.....	169
Figura 5.24 - Medição do diâmetro do furo 1000 para a broca de aço rápido A1141.....	169
Figura 5.25 - Medição do diâmetro do furo 1 para a broca de metal duro A1163.	170
Figura 5.26 - Medição do diâmetro do furo 1000 para a broca de metal duro A1163.	170
Figura 5.27 - Diâmetro dos furos em função dos números de furos para as brocas de aço rápido A1141, de metal duro revestida A1163TiN e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$	171
Figura 5.28 - Medição da circularidade do furo 1 para a broca de aço rápido A1141.	172
Figura 5.29 - Medição da circularidade do furo 1000 para a broca de aço rápido A1141.	173
Figura 5.30 - Medição da circularidade do furo 1 para a broca de metal duro A1163.....	173
Figura 5.31 - Medição da circularidade do furo 1000 para a broca de metal duro A1163.	174
Figura 5.32 - Circularidade dos furos em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141, de metal duro revestida A1163TiN e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$	175
Figura II.1 - Detalhamento do procedimento para furação do compósito.	199
Figura II.2 - Representação esquemática da imagem da área do furo, da área delaminada e da linha que demarca a região com delaminação.....	200
Figura II.3 - Representação esquemática da área total medida pelo software.	201
Figura II.4 - Representação esquemática da área delaminada em torno do furo.	201

- Figura II.5** - Representação esquemática da placa de compósito presa sobre a mesa da máquina de medição.202
- Figura II.6** - Representação esquemática da lateral do furo da placa de compósito sendo tocado pela esfera de rubi.203
- Figura II.7** - Representação esquemática da lateral do furo sendo tocado pela esfera de rubi em oito pontos distintos.....203

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades de compósitos de matriz metálica reforçada com fibra contínua e alinhada, de acordo com Callister (2002).....	13
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de compósitos de matriz cerâmica reforçados por whisker de SiC, conforme Smith (1998).....	15
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas de compósitos de matrizes poliméricas de resina epóxi, reforçadas com fibras de vidro, carbono e aramida, contínuas e alinhadas nas direções longitudinais e transversais, Callister (2002).....	16
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas de alguns polímeros termoplásticos, conforme Smith (1999).	19
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas de alguns polímeros termoplásticos estruturais, de acordo com Smith (1999).....	20
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas de alguns plásticos termoendurecíveis, segundo Smith (1999).	21
Tabela 3.7 - Propriedades de fios de fibras de vidro, carbono e aramida para reforço de polímeros, de acordo com Smith (1999).....	24
Tabela 3.8 - Classificação das formas e dos tipos de cavacos de acordo com a norma ISO 3685/1993	43
Tabela 3.9 - Propriedades dos materiais empregados em ferramentas de corte, conforme Abrão et al (1993).....	58
Tabela 3.10 - Propriedades de revestimentos para ferramenta de corte Abele e Dörr (2002).....	63
Tabela 3.11 - Parâmetros de Rugosidade, Mummery (1990).	80
Tabela 3.12 - Principais processos de usinagem não convencionais, de acordo com Metals Handbook, (1989).	97

Tabela 4.1 - Valores das gramaturas das fibras dos tecidos e das espessuras média das placas de compósito empregadas nos testes.....	103
Tabela 4.2 - Descrição técnica das brocas utilizadas nos ensaios de furação.....	103
Tabela 4.3 - Dados técnicos do dinamômetro KISTLER, modelo 9257BA.....	107
Tabela 4.4 - Parâmetros de corte empregados nos testes de força de avanço.....	117
Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizado para medição da rugosidade na parede do furo.....	121
Tabela 5.1 - Análise de variância para a força de avanço medida na furação do milésimo furo, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.	134
Tabela 5.2 - Fotografias das pontas das brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, após os furos 1 e 1000.....	139
Tabela 5.3 - Fotomicrografias da broca de aço rápido A1141 após 1000 furos para diferentes parâmetros de corte.	141
Tabela 5.4 - Fotomicrografias da broca de metal duro A1163 após 1000 furos para diferentes parâmetros de corte.	142
Tabela 5.5 - Evolução do desgaste da broca de aço rápido A1141 em função do número de furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot}$	143
Tabela 5.6 - Fotografias das pontas e arestas principal e secundária de corte para as brocas de metal duro A1163, de metal duro revestido A1163TiN e de aço rápido A1141, após os furos 1, 1000, 10000, 20000 e 24000.....	144
Tabela 5.7 - Fotomicrografias das brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestido A1163TiN, após 10000 furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$	145
Tabela 5.8 - Fotomicrografia da broca de metal duro A1163 após 24000 furos empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$	146

Tabela 5.9 - Delaminação na entrada e saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro EDP27199.	147
Tabela 5.10 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de aço rápido A1141.....	148
Tabela 5.11 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro A1163.	149
Tabela 5.12 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro A1167A.	150
Tabela 5.13 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha fina, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.....	153
Tabela 5.14 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha média, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.	154
Tabela 5.15 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha grossa, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.....	155
Tabela 5.16 - Delaminação na entrada e na saída dos furos 1 e 1000, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.....	157
Tabela 5.17 - Delaminação na entrada e na saída dos furos feitos com a broca de aço rápido A1141, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot.}$	159
Tabela 5.18 - Delaminação na entrada e na saída dos furos feitos com as brocas de metal duro A1163, de metal duro revestida A1163TiN e de aço rápido A1141, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$	161
Tabela 5.19 - Fotomicrografias das paredes dos furos 1 e 1000 feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=71\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot.}$	163
Tabela 5.20 - Formas de cavacos do compósito em função dos parâmetros de corte para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.....	176
Tabela 5.21 - Formas de cavacos do compósito em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.....	177

Tabela I.1 - Simbologias dos Desvios de Formas Macrométricos. (Manfé et al 1977) ...	195
Tabela I.2 - Classificação dos Acabamentos (R_a) em Função do Processo de Usinagem, de acordo com Vázquez (1999).	196
Tabela II.1 - Propriedades Gerais da Resina Epóxi Araldite – M/HY956.	197

Lista de Símbolos, Abreviaturas e Siglas

Lista de Símbolos

A	–	área da secção de corte
a_e	–	penetração de trabalho
a_p	–	profundidade de usinagem
D	–	diâmetro nominal
D_{max.}	–	diâmetro máximo
f	–	avanço
F_c	–	força de corte
F_d	–	fator delaminação
F_f	–	força de avanço
F_n	–	força normal
F_p	–	força passiva
F_t	–	força de atrito
F_u	–	força de usinagem
F_X	–	força na direção x
F_Y	–	força na direção y
F_Z	–	força na direção z
F_z	–	força de cisalhamento
K_s	–	pressão específica de corte
P_c	–	potência de corte
R_a	–	rugosidade média aritmética
R_{pm}	–	rugosidade média aritmética de pico
R_q	–	rugosidade quadrática média
R_t	–	altura máxima da rugosidade
R_{vm}	–	rugosidade média aritmética de vale
R_y	–	rugosidade máxima
R_z	–	rugosidade média

R_{3z}	–	rugosidade média do terceiro pico e vale
rot	–	rotação
rpm	–	rotação por minuto
v_c	–	velocidade de corte
w	–	largura
w_{max}	–	largura máxima

Lista de Símbolos Gregos

α	–	ângulo de folga
β	–	ângulo de cunha
χ	–	ângulo de posição
γ	–	ângulo de saída
ϕ	–	ângulo de cisalhamento
θ	–	ângulo de direção das fibras
ξ	–	força de avanço crítica

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANOVA	–	análise de variância
ASME	–	“American Society of Mechanical Engineers” (Sociedade Americana de Engenharia Mecânica)
AWF	–	“Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung” (Associação de Produção Econômica)
CBN	–	nitreto cúbico de boro
CERMET	–	cerâmica e metal
CMC	–	“ <i>ceramic matrix composites</i> ” (compósitos de matriz cerâmicas)
CVD	–	“ <i>chemical vapour deposition</i> ” (deposição química de vapor)
DETA	–	dietilnitroamina

ISO	–	“ <i>International Standard Organization</i> ” (Organização Internacional de Padronização)
DGEBA	–	diglicídica e éter de bisfenol
MMC	–	“ <i>metal matrix composites</i> ” (compósitos de matriz metálicas)
NBR	–	norma brasileira
HSS	–	“high speed steel”
PAN	–	poliacrilointrito
PCD	–	diamante policristalino
PVD	–	“ <i>physical vapour deposition</i> ” (deposição física de vapor)
PMC	–	“ <i>polymer matrix composites</i> ” (compósitos de matriz polimérica)
PRF	–	polímero reforçado com fibras
PRFA	–	polímero reforçado com fibras de aramida
PRFC	–	polímero reforçado com fibras de carbono
PRFV	–	polímero reforçado com fibras de vidro
SMC	–	“sheet molding compound”

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Muitos dos produtos modernos exigem materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas individualmente pelas ligas metálicas, cerâmicas ou materiais poliméricos convencionais. Portanto, fez-se necessário criar uma nova geração de materiais para atender a essas exigências. Os materiais compósitos são projetados de modo a conjugar essas características desejáveis. No projeto de compósitos, são combinados de maneira engenhosa vários tipos de materiais, entre eles os metais, as cerâmicas e os polímeros, para produzir essa categoria de materiais com características extraordinárias. Um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais microconstituintes ou macroconstituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros.

Muitos materiais compósitos são formados apenas por duas fases. A primeira é chamada matriz (contínua) e envolve a outra fase. A esta segunda, chama-se freqüentemente fase dispersa (reforço). No que se refere à fase matriz, o compósito pode ser classificado em três grupos: metálico, cerâmico e polimérico. Já em relação à fase dispersa, pode ser classificado em três categorias: particulados, fibras contínuas e fibras descontínuas. Entre os materiais utilizados para matrizes, destacam-se os polímeros, que são, com ampla margem de diferença, os mais empregados na fabricação de compósitos reforçados com fibras. Por sua vez, as resinas poliméricas, as mais empregadas em compósitos reforçados com fibras, são as resinas de poliéster insaturado e as resinas epoxídicas.

As resinas de poliéster insaturado são mais baratas, mas não são normalmente tão resistentes quanto as resinas epoxídicas. Os poliésteres insaturados são usados em larga escala como matrizes em materiais poliméricos reforçados por fibras de vidro. As resinas epoxídicas são mais caras, mas apresentam vantagens especiais, como por exemplo, boas propriedades mecânicas e menor contração após cura do que as resinas de poliéster. As

resinas epoxídicas são normalmente usadas como material para a matriz de compósitos reforçados com fibras de carbono e fibras de aramida, mas também são utilizadas com fibras de vidro. As aplicações desses materiais envolvem cascos de barcos, painéis de construção e painéis estruturais de automóveis, aeronaves e vários tipos de aparelhos domésticos. Além disso, as resinas epoxídicas possuem as seguintes vantagens: ampla variedade de propriedades, já que estão disponíveis em um grande número de materiais, agentes reativos de cura e modificadores; ausência de voláteis durante a cura; baixa alteração dimensional durante a cura; excelente resistência contra substâncias químicas e solventes; e excelente adesão a uma variedade de partículas, fibras e outros substratos. Por outro lado, entre as principais desvantagens encontram-se seu custo relativamente alto, já citado, e o longo tempo de cura.

As propriedades dos compósitos também dependem das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A maioria dos compósitos foi criada para melhorar combinações de características mecânicas, tais como: rigidez, tenacidade e resistência nas condições ambiente e sob altas temperaturas. Entretanto as características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de carga.

A importância dos compósitos em engenharia deriva do fato de que, ao combinar-se dois ou mais materiais diferentes, pode-se obter um material composto cujas propriedades são superiores, ou melhores, em alguns aspectos, às propriedades de cada um dos componentes. Tecnicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de uma fibra. Os objetivos de projetos de compósitos reforçados com fibras incluem, com frequência, resistência e rigidez altas em relação à massa desses compósitos. Essas características são expressas em termos dos parâmetros resistência específica e módulo de resistência específica, os quais correspondem, respectivamente, à razão entre o limite de resistência à tração e a densidade relativa e a razão entre o módulo de elasticidade e a densidade relativa. É possível produzir compósitos

reforçados com fibra com resistência específica e módulo de resistência específica excepcionalmente altos que empregam materiais de baixa densidade para a fibra e a matriz.

Para fabricar compósitos reforçados com fibras que atendam a determinadas especificações de projeto, as fibras devem estar distribuídas uniformemente no interior da matriz polimérica e, na maioria dos casos, também devem estar orientadas na mesma direção e aplicação da força.

Os compósitos produzidos na forma de placas, tubos, barras e peças semi-acabadas necessitam de acabamento ou de um processamento posterior para que possam ser utilizados como peças ou componentes de um conjunto. Portanto, esses materiais devem ser considerados como matérias-primas para outros processos de fabricação. Normalmente estes compósitos são processados pelos mesmos equipamentos utilizados pela indústria de metal-mecânica.

Neste trabalho será estudada a operação de furação de compósitos poliméricos de resina epóxi reforçada com fibras de vidro. Apesar de se fazer uso das mesmas operações e equipamentos empregados na usinagem de materiais metálicos, a usinagem de polímeros reforçados com fibras (PRF) difere muito dos materiais metálicos, pois os compósitos têm uma estrutura diversificada e heterogênea e são formados por fibras dispersas, alinhadas ou não. A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente experimental e envolver um número grande de variáveis.

Assim, os mesmos conceitos intensamente estudados e analisados para compreensão da usinagem de materiais metálicos também devem ser estudados e estendidos para a usinagem de materiais compósitos para que se possa obter desempenho satisfatório, nos pontos de vista técnico e econômico. Embora pesquisas já estejam sendo feitas nesse sentido, a grande complexidade dos fenômenos envolvidos justifica a intensificação do trabalho nessa área.

Entre as operações de usinagem, a furação é uma das mais utilizadas pela indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo tem pelo menos um furo e,

somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto durante o processo de obtenção da peça bruta. Em geral, as peças têm que ser furadas em cheio ou terem seus furos aumentados gradativamente através da pré-furação. A furação de compósitos PRF tem apresentado diversos problemas, entre eles delaminação na entrada e na saída do furo, aumento na rugosidade da parede interna do furo e variações dimensionais e geométricas. São problemas que precisam ser investigados, pois não se sabe o seu grau de influência sobre as propriedades mecânicas da peça. Nessa operação também foram detectados problemas, como desgaste da ferramenta de corte, que conseqüentemente gera um aumento da força de usinagem e uma piora na qualidade do furo da peça.

Finalmente, para compreender a usinabilidade dos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras (PRF), é necessário que se faça um estudo no qual sejam investigados todos os fatores que possam interferir no processo, e assim permitir um maior controle sobre esses fatores.

CAPÍTULO II

2. OBJETIVO

Diante do exposto no capítulo anterior, fica evidente a necessidade de se agregar novos conhecimentos àqueles existentes a respeito da usinabilidade de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras (PRF), principalmente devido à crescente utilização desses materiais por diversos segmentos da indústria. Existe um consenso entre a maioria dos autores consultados a respeito da escassez de informações sobre o comportamento desses materiais quando submetidos às operações de usinagem e condições de corte distintas.

Neste trabalho, pretende-se investigar a influência dos parâmetros de furação (velocidade de corte e avanço), juntamente com o material e geometria da ferramenta de corte, seguidos pela espessura da fibra de reforço do compósito e o número de furos sobre a usinabilidade de compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro. Mais especificamente, pretende-se analisar como esses parâmetros afetam a força de avanço durante a furação e os danos (delaminação na entrada e saída dos furos), qualidade e rugosidade da parede dos furos, juntamente com a variação de diâmetro e circularidade causados pela furação. Para tanto, este trabalho está dividido da seguinte forma: introdução, objetivo, revisão bibliográfica, procedimento experimental, resultado e discussão, conclusão e proposta para continuidade deste trabalho.

O capítulo I apresentou a introdução, onde é feita uma apresentação inicial e são discutidos alguns aspectos gerais sobre compósitos, dando-se ênfase aos compósitos poliméricos reforçados com fibras, suas aplicações, e procurando justificar o estudo sobre sua usinabilidade.

O capítulo II mostra os objetivos desta pesquisa, que é estudar a usinabilidade de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro (PRF), com ênfase na furação de compósitos poliméricos de resina epóxi reforçados com fibras de vidro (PRFV).

O capítulo III apresenta uma revisão bibliográfica, na qual se faz um apanhado sobre os diversos tipos de materiais compósitos, com destaque para os compósitos poliméricos reforçados com fibras, suas propriedades e sua fabricação. Em seguida faz-se uma breve descrição do processo de usinagem, para depois apresentar os principais fatores que influenciam a usinabilidade de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras (PRF), e assim finalizar com alguns processos especiais de usinagem.

O capítulo IV mostra o procedimento experimental, onde são apresentados os equipamentos, os materiais empregados como corpos-de-prova, as ferramentas de corte e a metodologia empregada para a realização desta pesquisa.

O capítulo V apresenta os resultados e suas discussões.

O capítulo VI mostra as principais conclusões deste trabalho.

O capítulo VII relata sugestões de novas pesquisas sobre o tema.

O capítulo VIII tem a relação das referências bibliográficas que serviram de base para a realização deste trabalho.

CAPÍTULO III

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo pode ser dividido em duas partes distintas. Na primeira parte, será feita uma descrição pormenorizada do que é um compósito, apresentando as definições que são dadas ao material, seguidas dos diversos tipos de compósitos e suas classificações, juntamente com os tipos de matrizes e reforços empregados. Destaque especial será dado para as matrizes poliméricas reforçadas com fibras de vidro, carbono e aramida. Propriedades como resistência à tração, ao impacto, à fadiga, à ruptura, módulo de elasticidade e dureza dos compósitos serão discutidas de forma sucinta, juntamente com as propriedades mecânicas das fibras de vidro, carbono e aramida. As diversas formas para se produzir compósitos poliméricos reforçados com fibras e suas aplicações também serão tratadas. A segunda parte desta revisão se iniciará com uma breve descrição dos principais conceitos relativos à usinagem de materiais. Depois, se discutirá o mecanismo de formação do cavaco, forças de usinagem, pressão específica de corte, potência, tensões e deformações em usinagem, dando-se ênfase ao material de interesse para este trabalho. Materiais, geometria, desgaste e vida das ferramentas de corte também serão discutidos. Finalmente, será discutida a qualidade da superfície produzida por operações de usinagem em polímeros reforçados com fibras.

3.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos não têm uma definição universalmente aceita. A palavra compósito deriva de composto, ou seja, qualquer coisa formada por partes (ou constituintes) diferentes. Na escala microestrutural, diversos materiais podem ser considerados compósitos, uma vez que são formados por agrupamentos atômicos diferentes. Já na escala macroestrutural, onde os constituintes são diferentes e podem ser identificados a olho nu, há também uma diversidade de materiais considerados compósitos. Portanto, as dificuldades em se estabelecer uma definição para material compósito reside nas limitações dimensionais impostas aos constituintes que formam o material, de acordo

com Smith (1998). Para dar uma descrição razoável para o material compósito, o referido autor o define da seguinte forma: “*Um material compósito é formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais microconstituintes ou macroconstituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência, são insolúveis uns nos outros*”.

Segundo Ferrante (2002), uma definição satisfatória de compósitos deve abordar seus componentes, arranjo e “funcionamento”, quando em conjunto. Esses requisitos são razoavelmente preenchidos pela seguinte definição: “*um material composto é formado por dois ou mais componentes, com identidade química e formas diferentes, que se conservam distintos após o processamento e que são separados por uma interface mais ou menos definida. A adesão entre esses componentes é tal que as cargas são transferidas para os elementos de maior resistência mecânica, as fibras, que estão geralmente dispersas no componente que atua como matriz*”.

A maioria dos materiais compósitos consiste numa mistura de um material de reforço ou de enchimento (ou fibras), devidamente selecionado, com outro material compatível que serve de ligante (ou matriz), de modo a obterem-se determinadas características e propriedades.

Geralmente, os componentes não se dissolvem uns nos outros e podem ser fisicamente identificados pelas interfaces que os separam. Os diferentes constituintes dos compósitos podem estar presentes em fases macroscopicamente distintas, como no caso de materiais laminados, ou podem estar misturados em uma escala microscópica, como no caso de dispersões e particulados.

Apesar da dificuldade em se definir um material compósito, muitos estudos têm sido feitos para desenvolver novos materiais que possam substituir as ligas metálicas, cerâmicas e poliméricas, com o objetivo de atender às exigências tecnológicas modernas. No projeto de materiais compósitos, os constituintes são combinações de metais, cerâmicas e polímeros que darão origem a uma nova geração de materiais com melhores propriedades mecânicas.

Muitas das novas gerações de materiais compósitos são formadas por duas fases, como mostrado na figura 3.1: uma é chamada matriz; é contínua e envolve a outra fase, esta,

chamada dispersa. As propriedades dos compósitos dependem das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. Entre os constituintes de um compósito, a matriz tem como principal função a união das fibras de reforço. Além disso, a matriz separa as fibras individuais de modo a impedir a abrasão entre elas; também transfere e distribui as cargas aplicadas. A ligação entre as fibras e a matriz deve ser suficientemente forte para evitar a separação interfacial ou extração entre elas (Ribeiro, 2000).

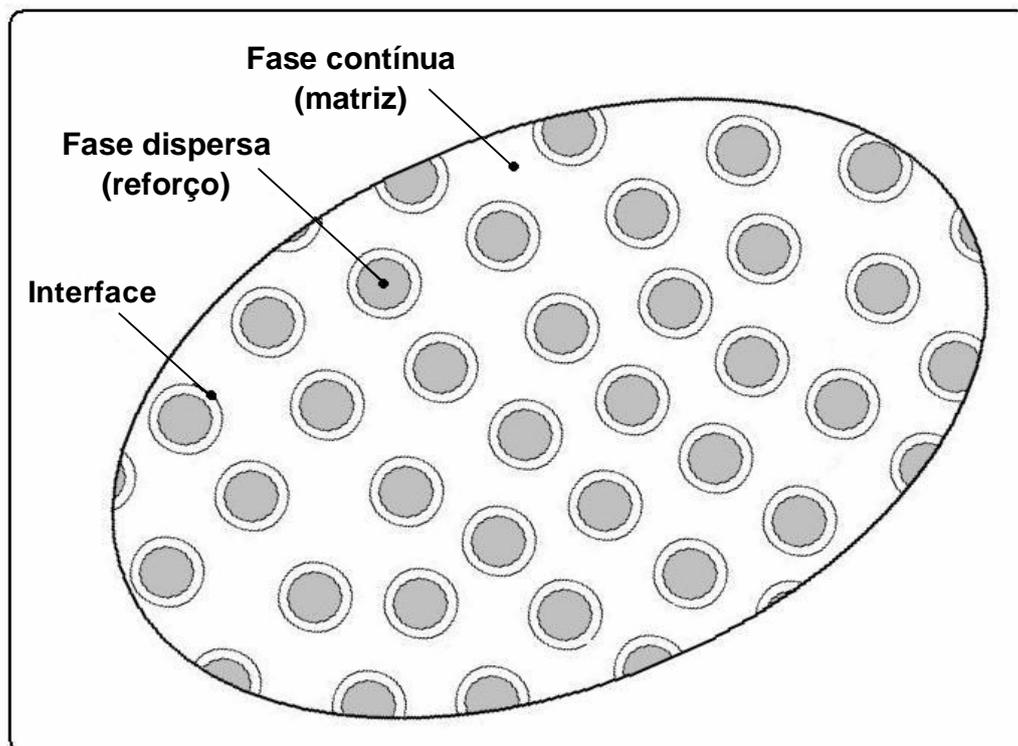


Figura 3.1 - As fases de um compósito (Daniel e Ishai, 1994).

Os altos valores de resistência e rigidez continuam a ser a combinação que lança os materiais compósitos para novas áreas. No entanto, a grande capacidade de amortecimento e o baixo coeficiente de expansão térmica são características que podem ser adaptadas para aplicações específicas. Os compósitos avançados reduzem os problemas de fadiga e dão uma maior flexibilidade de concepção e fabricação, o que pode reduzir significativamente o número de peças necessárias. Outra vantagem dos materiais compósitos é a resistência à corrosão e ao desgaste sob temperatura elevada, especialmente em aplicações industriais.

Podem-se obter materiais leves, com boa ductilidade, materiais duros e resistentes aos choques, cortes e à propagação de trincas. Essas características podem conduzir a custos mais baixos de ciclo de vida do produto, segundo Marques (2003).

3.1.1 Tipos e Classificação de Compósitos

No que se refere à fase matriz, um compósito pode ser classificado em três grupos: metálico, cerâmico e polimérico. Com relação à fase dispersa, também pode ser classificado em três categorias gerais: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas *whiskers* e compósito de fibras contínuas, como mostra a figura 3.2.

Segundo Ribeiro (2000), matriz é o constituinte do material composto que tem como principal função unir as fibras ou partículas do reforço. Além disso, a matriz separa as fibras individuais de modo a impedir a abrasão entre elas. A ligação entre as fibras e a matriz deve ser suficientemente forte para evitar a separação interfacial ou extração entre elas, mantendo assim as fibras orientadas apropriadamente, sendo então capaz de transferir e distribuir para as fibras as cargas aplicadas. A matriz deve envolver completamente as fibras de modo a reduzir a probabilidade de ocorrência de espaços vazios na interface. As fibras são geralmente pré-revestidas com um fino filme de material apropriado para aumentar essa capacidade de impregnação e a adesão interfacial. Apesar de muitos materiais plásticos poderem ser utilizados como matrizes, as resinas de poliéster e de epóxi são as mais empregadas.

O arranjo ou orientação das fibras entre si, sua concentração e sua distribuição têm influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Em relação à orientação das fibras, são possíveis duas configurações: um alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras em uma única direção e um alinhamento totalmente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. A melhor combinação geral das propriedades dos compósitos é obtida quando a distribuição das fibras é uniforme.

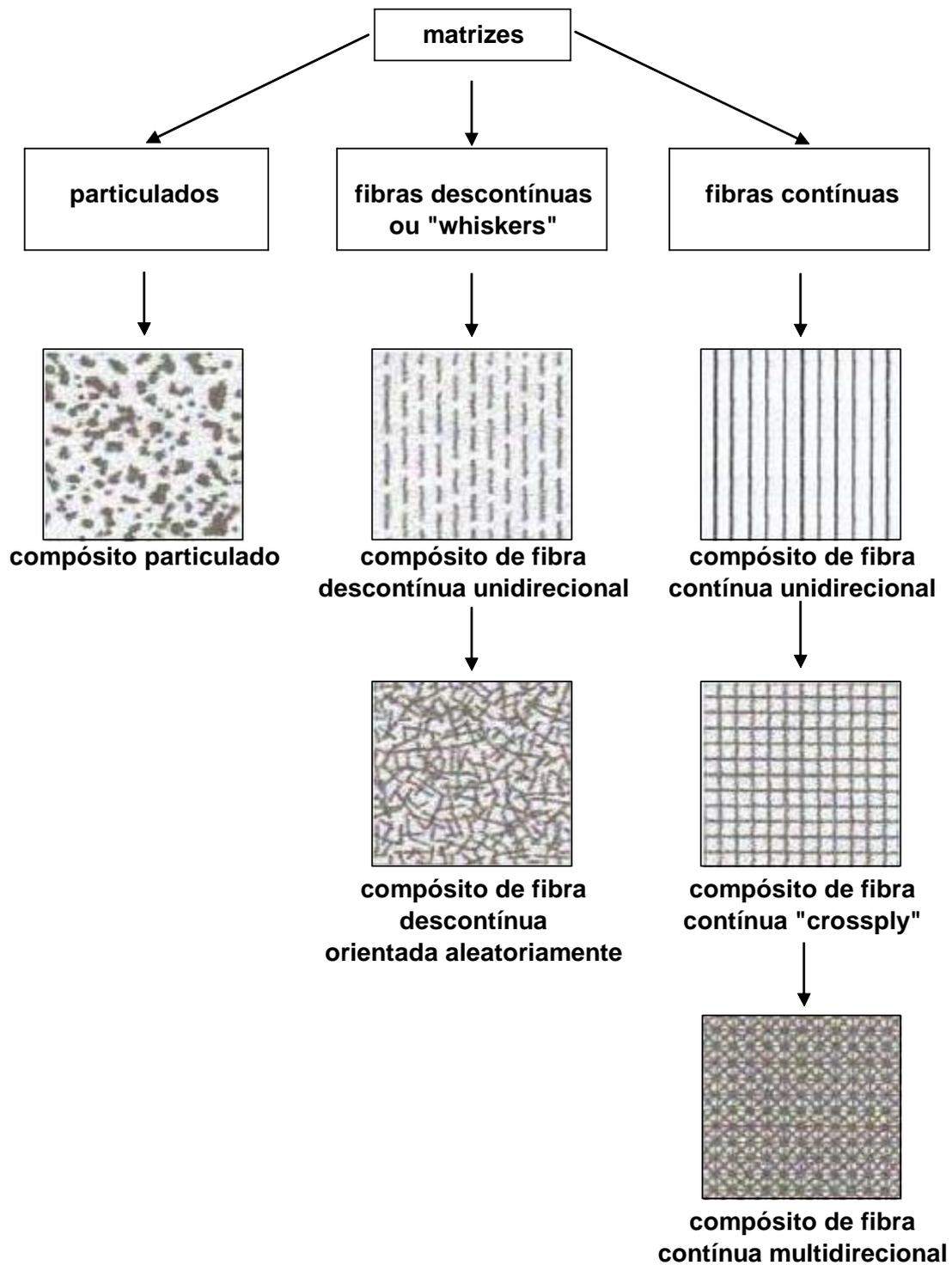


Figura 3.2 - Diagrama esquemático da classificação dos materiais compósitos, segundo Daniel e Ishai (1994).

Compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de diversos fatores, entre os quais os comportamentos tensão-deformação das fases fibras e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. Além do mais, as propriedades de um compósito que possui as suas fibras alinhadas são altamente anisotrópicas, isto é, dependem da direção na qual elas são medidas, segundo Callister (2002).

Os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas têm uma eficiência de reforço menor que as fibras contínuas. Apesar disso, eles estão se tornando cada vez mais utilizados. Fibras de vidro picadas são reforços desse tipo usados com maior frequência; contudo, fibras descontínuas de carbono e aramida também são empregadas. Esses compósitos com fibras curtas podem ser produzidos com módulo de elasticidade e limite de resistência à tração que se aproximam de 90% e 50%, respectivamente, dos seus análogos com fibras contínuas. Já os compósitos com fibras descontínuas e aleatórias são aplicados onde tensões são totalmente multidirecionais. A eficiência do reforço é de apenas um quinto se comparado com os compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal. Entretanto, nesse caso, as características mecânicas são isotrópicas.

A orientação e o comprimento da fibra para um compósito particular dependerão do nível e da natureza da tensão aplicada, bem como dos custos de fabricação. As taxas de produção para os compósitos com fibras curtas (tanto os alinhados como os com orientação aleatória) não são elevadas, e formas complexas podem ser moldadas, o que nem sempre é possível quando se utiliza um reforço com fibras contínuas. Ademais, no caso dos compósitos com fibras curtas, os custos de fabricação são consideravelmente menores do que para as fibras contínuas e alinhadas.

3.1.1.1 Compósitos de Matriz Metálica

O desenvolvimento dos compósitos de matriz metálica (MMC – *Metal Matrix Composites*) iniciou-se em meados da década de 1960 com a produção de fibras de boro e de carboneto de silício para reforçar metais leves, particularmente as ligas de alumínio. Consideráveis pesquisas foram feitas nos Estados Unidos na década de 1970, aplicando-se compósitos de

matriz metálica em lançadores de foguetes e aeronaves militares. Atualmente, muitos compósitos de matriz metálica ainda estão em fase de desenvolvimento, ou no início de produção comercial; porém, não tão intensamente como os compósitos de matriz polimérica, conforme Deniculi (1999).

Os compósitos de matrizes metálicas têm como matriz um metal dúctil. O processamento para a fabricação desses compósitos envolve pelo menos duas etapas: consolidação ou síntese (isto é, introdução do reforço no interior da matriz), seguida por uma operação de modelagem. Uma gama de técnicas de consolidação está disponível, algumas das quais relativamente sofisticadas.

O reforço introduzido no interior da matriz pode ser na forma de partículas, fibras contínuas ou descontínuas *whiskers*. As concentrações variam normalmente entre 10% e 60% em volume. O reforço pode melhorar a rigidez específica, a resistência específica, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional.

Os materiais para fibras contínuas incluem o carbono, o carboneto de silício, o boro, o óxido de alumínio e os metais refratários. Por outro lado, os reforços descontínuos consistem principalmente em *whiskers* de carboneto de silício, fibras picadas de óxido de alumínio e de carbono, e particulados de carboneto de silício e óxido de alumínio. Na tabela 3.1, são apresentadas algumas propriedades de diversos compósitos de matriz metálica reforçados com fibras contínuas e alinhadas (Callister, 2002).

Tabela 3.1 - Propriedades de compósitos de matriz metálica reforçada com fibra contínua e alinhada, de acordo com Callister (2002).

Fibra	Matriz	Teor de Fibra (%vol)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Tração Longitudinal (GPa)	Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)
Carbono	6061 Al	41	2,44	320	620
Boro	6061 Al	48	-	207	1515
SiO ₂	6061 Al	50	2,93	230	1480
Al ₂ O ₃	380,0 Al	24	-	120	340

Algumas combinações de reforços de matriz são altamente reativas a temperaturas elevadas. Conseqüentemente, a degradação do compósito pode ser causada pelo processamento a altas temperaturas ou ao se sujeitar o compósito a temperaturas elevadas durante seu regime de serviço. Esse problema é comumente resolvido pela aplicação de um revestimento superficial de proteção ao reforço ou pela modificação da composição da liga, conforme Herakovich (1998).

As propriedades de fluência e ruptura a altas temperaturas apresentadas por algumas ligas a base de níquel e cobalto (chamadas superligas) podem ser melhoradas através de um reforço com fibras de metais refratários, tais como o tungstênio. Também é mantida uma excelente resistência à oxidação a altas temperaturas e uma excelente resistência ao impacto. Os componentes que incorporam esses compósitos suportam temperaturas mais elevadas de operação e apresentam melhor eficiência para motores e turbinas.

Recentemente, alguns fabricantes de automóveis introduziram componentes de motores que constam de uma matriz em liga de alumínio reforçada com fibras de alumínio e fibras de carbono. Esse compósito metálico é leve e é também resistente ao desgaste e à distorção térmica. As aplicações estruturais aeroespaciais incluem compósitos avançados com matriz metálica em liga de alumínio. De acordo com Callister (2002), fibras de boro são usadas como reforço para ônibus espaciais, e fibras contínuas de grafita foram usadas no telescópio espacial Hubble.

3.1.1.2 Compósitos de Matriz Cerâmica

O desenvolvimento de compósitos de matriz cerâmica (CMC – *Ceramic Matrix Composites*) tem ficado aquém do desenvolvimento de outros compósitos, principalmente por causa das altas temperaturas envolvidas nas etapas de fabricação de compósitos de matriz cerâmica, sendo necessária à utilização de reforçadores que suportem altas temperaturas. Outro motivo é, segundo Deniculi (1999), o aparecimento de tensões térmicas entre a matriz e o reforçador durante o resfriamento, devido à diferença de coeficientes de expansão térmica. Os compósitos de matrizes cerâmicas podem ser

fabricados utilizando-se prensagem a quente, estampagem isostática a quente e técnicas de sinterização na fase líquida, conforme Callister (2002).

Os principais tipos de compósitos de matriz cerâmica, de acordo com o tipo de reforço usado, são os de fibras contínuas, os de fibras descontínuas e os reforçados por partículas. As duas principais variedades de fibras contínuas que têm sido usadas nos compósitos de matriz cerâmica são as de carboneto de silício (SiC) e as de óxido de alumínio (Al₂O₃). Já para fibras descontínuas *whiskers* e particulados é utilizado o carboneto de silício (SiC), de acordo com Smith (1998). A tabela 3.2 apresenta duas propriedades mecânicas de compósitos de matriz cerâmica reforçada por *whiskers* de SiC.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas à temperatura ambiente de compósitos de matriz cerâmica reforçados por *whisker* de SiC, conforme Smith (1998).

Matriz	Teor de SiC (%vol.)	Resistência à Flexão (MPa)	Tenacidade à Fratura (MPa)
Si ₃ N ₄	0	400 - 650	5,0 - 7,0
	10	400 - 500	6,5 - 9,5
	30	350 - 450	7,5 - 10,0
Al ₂ O ₃	0	-	4,5
	10	400 - 510	7,1
	20	520 - 790	7,5 - 9,0

Os materiais compósitos de matriz cerâmica são inerentemente resistentes à oxidação e à deterioração sob temperaturas elevadas. Não fosse pela predisposição desses materiais à fratura frágil, alguns seriam candidatos ideais para uso em aplicações a altas temperaturas e sob severas condições de tensão, especialmente para componentes em motores de turbinas para automóveis e aeronaves, conforme Herakovich (1998).

Os compósitos cerâmicos de (Al₂O₃) reforçados com *whisker* de SiC são utilizados como ferramentas de corte para usinagem de ligas metálicas a base de níquel e cobalto. A vida das ferramentas a base desses materiais é superior à das ferramentas de metal duro (Sandvik Coromant, 2002).

3.1.1.3 Compósitos de Matriz Polimérica

Os compósitos de matriz polimérica (PMC – *Polymer Matrix Composites*) consistem de uma resina polimérica como fase matriz e fibras como meio de reforço. Esses materiais são usados na mais ampla diversidade de aplicações dos compósitos, bem como nas maiores quantidades, em vista de suas propriedades à temperatura ambiente, de sua facilidade de fabricação e de seu custo.

Existe uma considerável variedade de processos disponíveis para fabricação de compósitos de matriz polimérica. Esses processos variam desde simples técnicas manuais até métodos automatizados que permitem produzir uma grande quantidade de componentes de alta complexidade. A escolha do método utilizado vai depender do custo, da forma do componente, do tamanho do lote e do desempenho exigido.

Algumas propriedades mecânicas de compósitos com matrizes poliméricas de resina epóxi, reforçadas com fibras de vidro, carbono e aramida estão indicadas na tabela 3.3. Desta forma, pode ser feita uma comparação entre as características mecânicas desses três materiais, tanto para a direção longitudinal como para a direção transversal.

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas de compósitos de matrizes poliméricas de resina epóxi, reforçadas com fibras de vidro, carbono e aramida, contínuas e alinhadas nas direções longitudinais e transversais, Callister (2002).

Propriedades	Vidro	Carbono	Aramida
Densidade (g/cm ³)	2,1	1,6	1,4
Módulo de Tração:			
Longitudinal (GPa)	45	145	76
Transversal (GPa)	12	10	5,5
Limite de Resistência à Tração:			
Longitudinal (MPa)	1020	1240	1380
Transversal (MPa)	40	41	30
Deformação no Limite de Resistência à Tração:			
Longitudinal (%)	2,3	0,9	1,8
Transversal (%)	0,4	0,4	0,5

A principal vantagem dos compósitos de matriz polimérica é que sua fabricação envolve altas pressões e baixas temperaturas, evitando-se problemas associados com a degradação do reforço. Por essa razão, o desenvolvimento de compósitos de matriz polimérica ocorreu rapidamente. Compósitos reforçados com fibras de vidros, depois do concreto, são os mais utilizados, conforme Deniculi (1999). As propriedades dos compósitos de matriz polimérica podem variar numa grande faixa, dependendo dos tipos de matrizes e reforços utilizados e das combinações dessas matrizes e reforços.

Segundo Callister (2002), as principais desvantagens dos compósitos de matriz polimérica são a impossibilidade de trabalho a altas temperaturas, a instabilidade dimensional (devido a altos coeficientes de expansão térmica), a sensibilidade à radiação e, em alguns casos, a absorção da umidade do ambiente.

De acordo com Callister (2002), as propriedades mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades da fibra, mas também da orientação segundo a qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de carga, sendo que um certo comprimento crítico de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material compósito. Esse comprimento crítico depende do diâmetro da fibra e da sua resistência final (ou limite de resistência à tração), bem como da força de ligação entre a fibra e a matriz (ou da tensão-limite de escoamento cisalhante da matriz), a que for menor.

Outros fatores que influenciam as propriedades mecânicas dos compósitos são o arranjo ou orientação das fibras entre si, a concentração das fibras e a sua distribuição. Em relação à orientação das fibras, são possíveis dois extremos: um alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e um alinhamento totalmente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas ou parcialmente orientadas ou todas orientadas aleatoriamente.

A figura 3.3 apresenta dois casos possíveis de orientação das fibras: na figura 3.3 (a), unidirecional, tem-se todas as camadas de fibras na mesma direção, ou seja, os ângulos

formados entre as fibras são de zero grau. Na figura 3.3 (b), multidirecional, tem-se as camadas de fibras com ângulos dispostos em direções diferentes, ou seja, os ângulos formados entre as camadas de fibras são, sucessivamente, 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° , -45° , $+45^\circ$, 90° e 0° . Além dessas orientações, é possível projetar compostos com outras combinações.

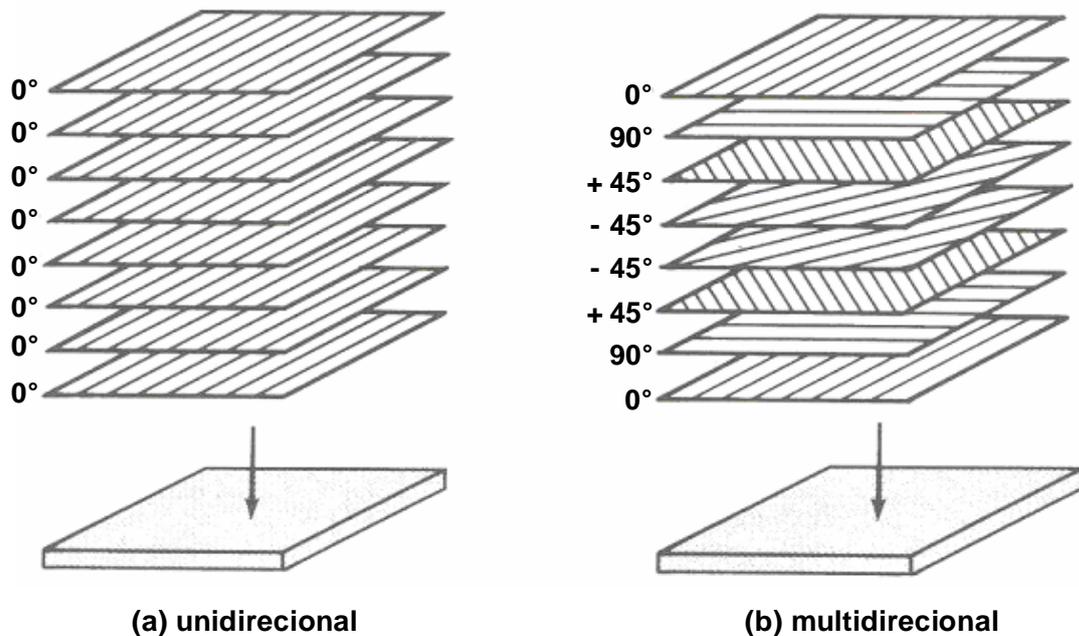


Figura 3.3 - Representação esquemática do arranjo (a) unidirecional e (b) multidirecional para compósitos do tipo laminado com várias camadas, Smith (1998).

3.1.2 Tipos de Matrizes Poliméricas

Etimologicamente, a palavra polímero significa “muitas partes”. Um material polimérico pode ser considerado como constituído por muitas partes, ou unidades, ligadas quimicamente entre si de modo a formar um sólido. Dependendo do modo como estão ligados química e estruturalmente, os plásticos podem ser divididos em duas classes: termoplásticos e termoendurecíveis.

Os polímeros termoplásticos amolecem quando são aquecidos (e por fim se liquefazem) e endurecem quando são resfriados, processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Esses materiais são normalmente fabricados pela aplicação simultânea de calor e pressão. Em nível molecular, à medida que a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias são reduzidas (devido ao aumento do movimento molecular), de modo tal que o movimento relativo de cadeias adjacentes são facilitadas quando uma tensão é aplicada. Além disso, os termoplásticos são relativamente moles e dúcteis. A maioria dos polímeros lineares são aqueles que possuem estruturas ramificadas com cadeias flexíveis e são termoplásticos, conforme Smith (1999). Na tabela 3.4, são indicadas a densidade, a resistência à tração, a resistência ao impacto, a resistência dielétrica e temperatura máxima de utilização de alguns polímeros termoplásticos de uso geral.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas de alguns polímeros termoplásticos, conforme Smith (1999).

Material	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Resistência Dielétrica (kV/mm)	Temp. Máx. de Utilização (°C)
Polietileno:					
baixa densidade	0,92 - 0,93	6,0 - 17,0		19	80 - 100
alta densidade	0,95 - 0,96	20,0 - 37,0	20 - 750	19	80 - 120
PVC	1,49 - 1,58	52,0 - 62,0	53 - 300		110
Polipropileno	0,90 - 0,91	33,0 - 38,0	20 - 120	26	105 - 150
Estireno	1,08	69,0 - 83,0	20 - 25	70	60 - 105
ABS de uso geral	1,05 - 1,07	41	320	15	70 - 95
Acrílico	1,11 - 1,19	76	120	18,0 - 20,0	55 - 110
Acetato	1,2 - 1,3	21,0 - 55,0	60 - 360	10,0 - 24,0	60 - 105
Politetrafluoroetileno	2,1 - 2,3	7,0 - 28,0	135 - 215	16 - 20	290

Considera-se plástico estrutural um termoplástico que possua um conjunto de propriedades que o tornem especialmente útil em aplicações de engenharia, de acordo com Smith (1999). Essa definição é arbitrária, já que não existe nenhum plástico que, de alguma forma, não possa ser considerado um plástico estrutural. Na tabela 3.5, indicam-se os valores de densidade, resistência à tração, resistência ao impacto, resistência dielétrica e temperatura máxima de utilização de alguns polímeros termoplásticos estruturais.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas de alguns polímeros termoplásticos estruturais, de acordo com Smith (1999).

Material	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Resistência Dielétrica (kV)	Temp. Máx.de Utilização (°C)
Nylon	1,13 - 1,15	62 - 83	105	15	82 - 150
Poliacetal	1,42	70	75	13	90
Policarbonato	1,2	62	640 - 850	15	120
Poliéster:					
PET	1,37	72	43	-	80
PBT	1,31	55 - 57	64 - 70	23 - 28	120
Óxido de Polifenileno	1,06 - 1,10	54 - 66	267	16 - 20	80 - 105
Polissulfona	1,24	70	64	17	150
Sulfureto de Polifenileno	1,34	70	16	23	260

Os polímeros termoendurecíveis se tornam permanentemente duros quando submetidos ao calor e não amolecem com um aquecimento subsequente. Durante o tratamento térmico inicial, ligações cruzadas covalentes são formadas entre cadeias moleculares adjacentes. Essas ligações prendem as cadeias entre si para resistir aos movimentos vibracionais e rotacionais a temperaturas elevadas. As ligações cruzadas geralmente são extensas: 10% a 50% das unidades (meros) de suas cadeias. Os polímeros termoendurecíveis são geralmente mais duros, mais resistentes e mais frágeis do que os polímeros termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. A maioria dos polímeros com ligações cruzadas e em rede são do tipo termoendurecível. Na tabela 3.6, são apresentados valores de densidade, resistência à tração, resistência ao impacto, resistência dielétrica e temperatura máxima de utilização para alguns plásticos termoendurecíveis.

Uma grande variedade de técnicas pode ser empregada na conformação de materiais poliméricos. O método usado para um polímero específico depende de diversos fatores: se o material é termoplástico ou termoendurecível; se termoplástico, a temperatura na qual ele amolece; a estabilidade atmosférica do material que está sendo conformado; a geometria e o formato do produto acabado.

A fabricação de materiais poliméricos ocorre normalmente a temperaturas elevadas e, com frequência, com a aplicação de pressão. Os termoplásticos são conformados acima das suas temperaturas de transição vítrea, se amorfos, ou acima de suas temperaturas de fusão, se

semicristalinos. Os termoendurecíveis são normalmente fabricados em dois estágios: em primeiro lugar, ocorre a preparação de um polímero linear (algumas vezes chamado pré-polímero) na forma de um líquido, que possui um baixo peso molecular. Esse material é convertido no produto final, duro e rígido, durante o segundo estágio, que é realizado normalmente em molde que possui a forma desejada. Nesta segunda fase, que é chamada de “cura”, pode ocorrer o aquecimento e/ou adição de catalisadores, e freqüentemente sob pressão, segundo Callister (2002). Entre os tipos mais comuns de matrizes poliméricas termoendurecíveis destacam-se as de resina epóxi, poliéster e vinil éster.

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas de alguns plásticos termoendurecíveis, segundo Smith (1999).

Material	Densidade (g/cm ³)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Impacto (J/m)	Resistência Dielétrica (kV)	Temp. Máx. de Utilização (°C)
Fenólico:					
com serradura	1,34 - 1,45	35 - 62	10,0 - 32,0	10,0 - 16,0	150 - 177
com mica	1,65 - 1,92	38 - 48	16,0 - 21,0	14,0 - 16,0	120 - 150
com fibra de vidro	1,69 - 1,95	35 - 124	16,0 - 960,0	6,0 - 16,0	177 - 288
Poliéster:					
com fibra de vidro SMC	1,7 - 2,1	55 - 138	427 - 1174	13,0 - 16,0	150 - 177
com fibra de vidro BMC	1,7 - 2,3	28 - 70	800 - 854	12,0 - 17,0	150 - 177
Melamina:					
com celulose	1,45 - 1,52	36 - 62	10,0 - 21,0	14,0 - 16,0	120
com fibra de lã/algodão	1,50 - 1,55	48 - 62	21,0 - 26,0	12,0 - 13,0	120
com fibra de vidro	1,8 - 2,0	35 - 70	32 - 960	7,0 - 12,0	150 - 200
uréia, com celulose	1,47 - 1,52	38 - 90	10,0 - 21,0	12,0 - 16,0	77
Alquilamida:					
com fibra de vidro	2,12 - 2,15	28 - 65	32 - 534	14,0 - 18,0	230
com fibra mineral	1,60 - 2,30	20 - 62	16,0 - 26,0	14,0 - 18,0	150 - 230
Epoxídica:					
s/ material de enchimento	1,06 - 1,40	28 - 60	10 - 533	16,0 - 26,0	120 - 260
com fibra mineral	1,6 - 2,0	35 - 124	16,0 - 21,0	12,0 - 16,0	150 - 260
com fibra de vidro	1,7 - 2,0	70 - 210		12,0 - 16,0	150 - 260

A reação de polimerização (cura) para transformar a resina líquida para o estado sólido é iniciada somando-se quantias pequenas de um agente reativo de cura. Esse agente reativo de cura é o dietilnitroamina (DETA). Átomos de hidrogênio do grupo de amina (NH₂) de uma molécula de DETA reagem com o grupo epoxídico de moléculas de diglicídica e éter de bisfenol A (DGEBA). Como a reação é contínua, moléculas de DGEBA formam

ligações com DETA, e uma estrutura de cadeia tridimensional é lentamente formada. O material resultante é um sólido de resina epóxi, conforme Filetin (2001).

O tempo de cura e a temperatura de serviço para completar a reação de polimerização dependem do tipo e da quantidade do agente reativo de cura. Com alguns agentes, a reação inicia-se e prossegue em temperatura ambiente, mas com outros, são exigidas temperaturas elevadas. Por outro lado, algumas vezes, os aceleradores são somados ao líquido de mistura para acelerar uma reação lenta e reduzir o tempo de cura, segundo Rotheron (1995).

De acordo com Rotheron (1995), a matriz de epóxi, como uma classe, apresenta as seguintes vantagens principais quando comparada com outros tipos de matrizes termoendurecíveis: ampla variedade de propriedades, já que um grande número de materiais, agentes reativos de cura e modificadores estão disponíveis; ausência de voláteis durante a cura; baixa alteração dimensional durante a cura; excelente resistência contra substâncias químicas e solventes; excelente adesão a uma variedade de partículas, fibras, e outros substratos. Por outro lado, entre as principais desvantagens encontra-se seu custo relativamente alto e um longo tempo de cura. O problema de absorção de umidade é reduzido mudando-se a composição química da resina. Já a fragilidade ou baixa tensão de ruptura é um problema inerente às ligações de qualquer resina.

As resinas de poliéster têm uma grande variedade de propriedades. Entretanto, suas propriedades têm qualidade inferior às da resina epóxi. Essas resinas de poliéster têm como vantagem uma viscosidade baixa, um tempo de cura reduzido e um baixo custo. A principal desvantagem da resina de poliéster é sua alta contração volumétrica. Embora isso permita uma facilidade no preenchimento do molde, a diferença de contração entre a resina e as fibras resultam em depressões desiguais na superfície moldada, conforme Rotheron (1995).

As resinas de vinil éster possuem características combinadas das resinas epóxi, como excelente resistência química e à tração, e das resinas de poliéster insaturadas, como viscosidade baixa e cura rápida. Porém, a contração volumétrica das resinas de vinil éster está na faixa de 5% a 10%, que é uma faixa mais alta que das resinas epóxi. Tais resinas de

vinil éster exibem também forças adesivas moderadas, comparadas com as resinas epóxi. Entretanto, a temperatura de deflexão e estabilidade térmica podem ser melhoradas usando-se resinas epóxi resistentes ao calor, como tipos fenólicos-novolac, de acordo com Rothon (1995).

3.1.3 Tipos de Fibras para Reforços de Materiais Poliméricos

Os três principais tipos de fibras sintéticas que se usam para reforçar materiais poliméricos são: vidro, aramida (ou aramídica) e carbono (vide figura 3.4). As fibras de vidro são, com grande vantagem, o reforço mais usado e o mais barato. As fibras de aramida e de carbono apresentam resistência mecânica elevada e baixa densidade. Apesar do seu preço mais elevado, são utilizadas em muitas aplicações, especialmente na indústria aeroespacial. A tabela 3.7 apresenta algumas propriedades mecânicas das fibras de vidro, carbono e aramida.

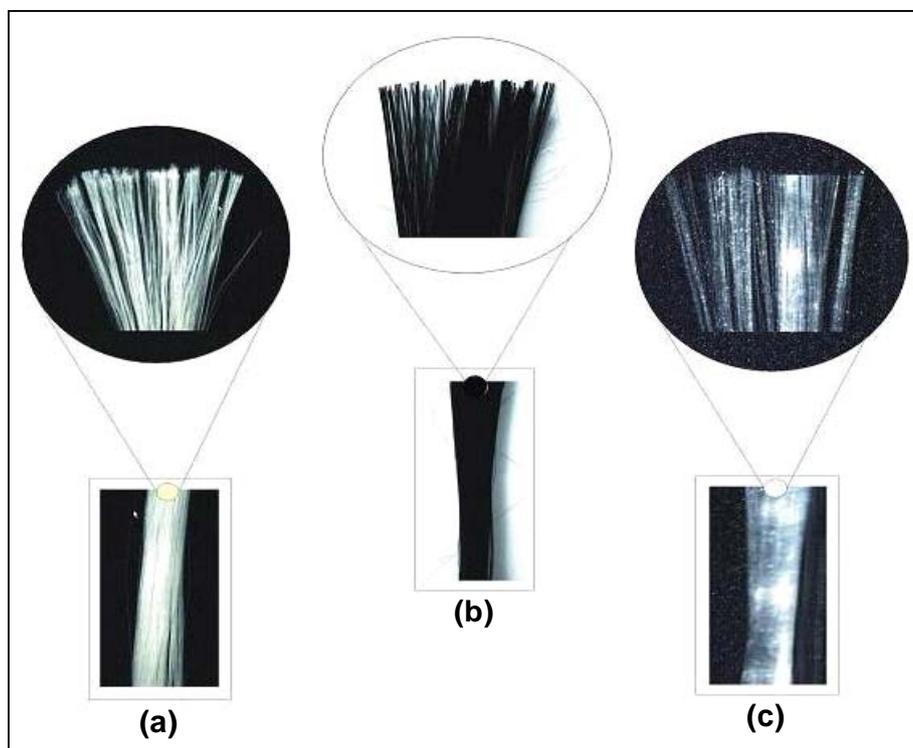


Figura 3.4 - Fibras sintéticas: (a) aramida, (b) carbono e (c) vidro.

Tabela 3.7 - Propriedades de fios de fibras de vidro, carbono e aramida para reforço de polímeros, de acordo com Smith (1999).

Propriedades	Vidro	Carbono	Aramida
Resistência à tração (MPa)	2410	3100	3617
Módulo de elasticidade em tração (GPa)	69	220	124
Alongamento (%)	3,5	1,4	2,5
Densidade (g/cm³)	2,54	1,75	1,48

As fibras de vidro são usadas para reforçar matrizes poliméricas de modo a se obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão entre resistência e peso; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; boas propriedades de isolamento elétrico; facilidade de fabricação; e custo relativamente baixo. Conforme Hull (1995), muitas composições de minerais têm sido utilizadas para produzir fibras de vidro. Essas fibras de vidro podem ser produzidas a partir da sílica (SiO₂), através da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Essas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre depois de prolongado tratamento às altas temperaturas. Fiorelli (2002) afirma que entre as vantagens do uso da fibra de vidro em reforços de estruturas destacam-se seu baixo custo em relação às fibras de carbono e às fibras de aramida e sua alta resistência ao impacto e à corrosão.

Compósitos poliméricos reforçados com fibras de carbono são caracterizados pelo fato de apresentarem uma combinação de baixo peso, resistência mecânica muito elevada e elevado módulo de elasticidade. Essas propriedades fazem com que os materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com estas fibras sejam especialmente atrativos para aplicações aeroespaciais. Segundo Ribeiro (2000), as fibras de carbono foram desenvolvidas para atender à indústria aeroespacial e podem ser obtidas por vários processos, sendo que suas propriedades são fortemente influenciadas pelas técnicas de fabricação. As fibras de carbono para esses compósitos são fabricadas principalmente a partir de dois precursores: o poliácilonitrilo (PAN) e o breu (ou piche). Infelizmente, os custos relativamente elevados das fibras de carbono fazem com que sua utilização seja limitada em outros setores da indústria.

As fibras de aramida (poliamida aromática) foram introduzidas no comércio em 1972 pela Du Pont®, sob o nome comercial de Kevlar®, e até a presente data existem dois tipos comerciais: o Kevlar 29® e o Kevlar 49®. O Kevlar 29® é uma fibra de aramida de elevada resistência mecânica e baixa densidade, concebida para determinadas aplicações, como por exemplo, para proteção balística, cordas e cabos. O Kevlar 49® é caracterizado por possuir resistência mecânica e um módulo de elasticidade elevado e densidade baixa. As propriedades do Kevlar 49® fazem com que as suas fibras sejam usadas como reforço de matrizes poliméricas de compósitos com aplicação nas indústrias aeroespacial, marítima, automobilística e outras. De acordo com Ribeiro (2000), a aramida é mais leve que a fibra de carbono e está disponível em diferentes estruturas cristalinas. Quanto maior o alinhamento das moléculas, maior será a cristalização e maior o módulo de elasticidade. Diferentemente das fibras de vidro e de carbono, que possuem valores de módulo de elasticidade sob tração e compressão muito próximos entre si, a aramida exibe um módulo de elasticidade sob compressão significativamente menor do que aquele apresentado sob tração. Ela possui resistência ao impacto superior à das fibras de vidro e de carbono, sendo, por esse motivo, utilizada em capacetes militares, aeronaves e tanques.

As características mecânicas de um compósito reforçado com fibras não dependem somente das propriedades das fibras, mas também do grau segundo o qual uma carga aplicada é transmitida para as fibras pela fase matriz. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de carga. Um certo comprimento crítico de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material compósito. Esse comprimento crítico depende do diâmetro da fibra e da sua resistência final (ou limite de resistência à tração), bem como da força de ligação entre a fibra e a matriz, conforme Callister (2002).

O arranjo ou orientação das fibras entre si, a concentração das fibras e sua distribuição tem influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Normalmente, as fibras contínuas estão alinhadas, enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas, orientadas todas aleatoriamente ou parcialmente orientadas. A melhor combinação geral das propriedades dos compósitos é obtida quando a distribuição das fibras é uniforme.

Os compósitos do tipo tecedura, ou *Woven Fabrics* são formados pelo entrelaçamento das fibras, de modo a se conseguir o arranjo desejado. Esses materiais podem suprir algumas desvantagens dos compósitos unidirecionais. Dessa forma, os tecidos podem ter as mais variadas formas, cada uma delas projetadas para satisfazer certos requisitos, tais como estabilidade geométrica e resistência mecânica uniforme em duas direções. Nasseh (2000) menciona que, na tentativa de melhorar as propriedades do laminado, pode-se utilizar tecidos híbridos, fabricados a partir de dois ou mais tipos de fibras, oferecendo a possibilidade de agrupar as vantagens dos materiais e minimizar as desvantagens. A figura 3.5 mostra alguns padrões de tecidos usados nos compósitos.

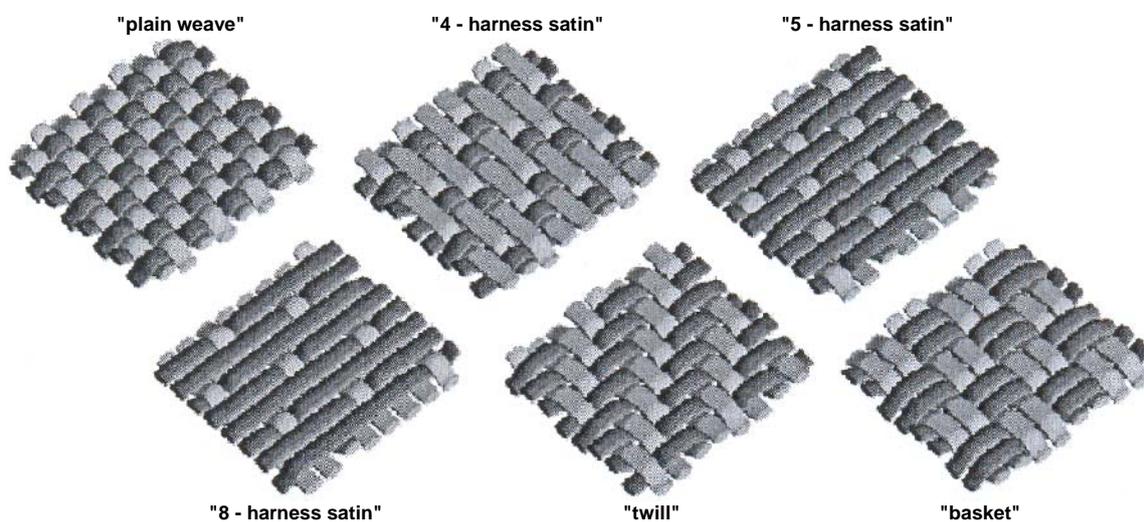


Figura 3.5 - Tipos de tecedura usadas em compósitos (Ávila et al, 2001).

3.1.4 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro

As fibras de vidro, contínuas ou descontínuas, são largamente utilizadas como reforço em matrizes poliméricas e são produzidas em grande quantidade. O diâmetro da fibra normalmente varia entre $3\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$. O vidro é popular como material de reforço na forma de fibras por diversas razões, de acordo com Callister (2002): é facilmente estirado na forma de fibras de alta resistência a partir do seu estado fundido; é um material amplamente disponível e pode ser fabricado economicamente para formar um polímero reforçado com vidro, empregando-se uma ampla variedade de técnicas de fabricação de

materiais compósitos; como uma fibra, ele é relativamente forte, e quando se encontra no interior de uma matriz de plástico produz um compósito que possui resistência específica muito alta; quando associado com diferentes polímeros, ele possui uma inércia química que o torna um compósito útil para aplicações em meio a uma variedade de ambientes corrosivos.

Existem várias limitações para esse grupo de materiais. Apesar de possuírem resistência elevada, eles não são muito rígidos, sendo inadequados para algumas aplicações. A maioria dos materiais em fibras de vidro está limitada a aplicações sob temperaturas de serviço abaixo de 200°C. Sob temperaturas mais altas, a maioria dos polímeros começa a escoar ou a se deteriorar. A temperatura de serviço pode ser estendida até aproximadamente 300°C pelo uso de sílica fundida de alta pureza para as fibras e de alguns polímeros de alta resistência, segundo Callister (2002). Muitas aplicações das fibras de vidro são familiares: carcaças de meios de transporte automotivos e marítimos, tubulações de plásticos, recipientes para armazenamento e pisos industriais.

3.1.5 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Carbono

O carbono é um material para fibras de alto desempenho e o reforço mais comumente utilizado em compósitos avançados de matriz polimérica. As razões para tal são, conforme Callister (2002), as seguintes: as fibras de carbono possuem os maiores módulos específicos e as maiores resistências específicas entre todos os materiais fibrosos de reforço; essas fibras de carbono mantêm um elevado módulo de tração e resistência mesmo a temperaturas elevadas, a oxidação a temperatura elevadas, no entanto, pode ser um problema; a temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por uma ampla variedade de solventes ácidos ou básicos; essas fibras exibem múltiplas características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos que as incorporam possuam propriedades específicas; foram desenvolvidos processos de fabricação das fibras e dos compósitos que são relativamente baratos e que tem boa relação custo-benefício.

Atualmente, os compósitos poliméricos reforçados com carbono estão sendo largamente empregados em equipamentos esportivos e de recreação (varas de pescar, tacos de golfe, entre outros), em carcaças de motores a jato (enroladas com filamentos), em vasos de pressão e em componentes estruturais de aeronaves, tanto militares como comerciais (como asas), e em helicópteros.

3.1.6 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Aramida

Essas fibras possuem módulo de tração e limites de resistência à tração longitudinal mais elevados do que os de outros materiais poliméricos reforçados. Entretanto, esses compósitos poliméricos reforçados são relativamente fracos quando submetidos à compressão. Além disso, esse material é conhecido pela tenacidade e pela resistência ao impacto, à fluência e à fadiga. Embora as aramidas sejam termoplásticas, elas são, todavia, resistentes à combustão e estável até em temperaturas relativamente elevadas. A faixa de temperaturas ao longo da qual esses compósitos mantêm as suas elevadas propriedades mecânicas situa-se entre -200°C e 200°C . Quimicamente, eles são suscetíveis à degradação por ácidos e bases fortes, mas são relativamente inertes frente a outros solventes e produtos químicos, Callister (2002).

As fibras aramidas são utilizadas mais freqüentemente em compósitos que possuem matrizes poliméricas de epóxi e poliéster. Uma vez que as fibras são relativamente flexíveis e de certa forma dúcteis, esses materiais podem ser processados de acordo com as operações têxteis mais comuns. As aplicações típicas desses compósitos incluem produtos balísticos, artigos esportivos, pneus, cordas, carcaças de mísseis, vasos de pressão e são usados também como substitutos para o amianto de freios automotivos e em revestimentos de embreagens e gaxetas.

A figura 3.6 mostra um exemplo de aplicação desses compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, carbono e aramida em aeronaves. O Nomex[®], mostrado na figura, é um material celular do tipo colméia fabricado pela Du Pont e utilizados em estruturas tipo sanduíches.

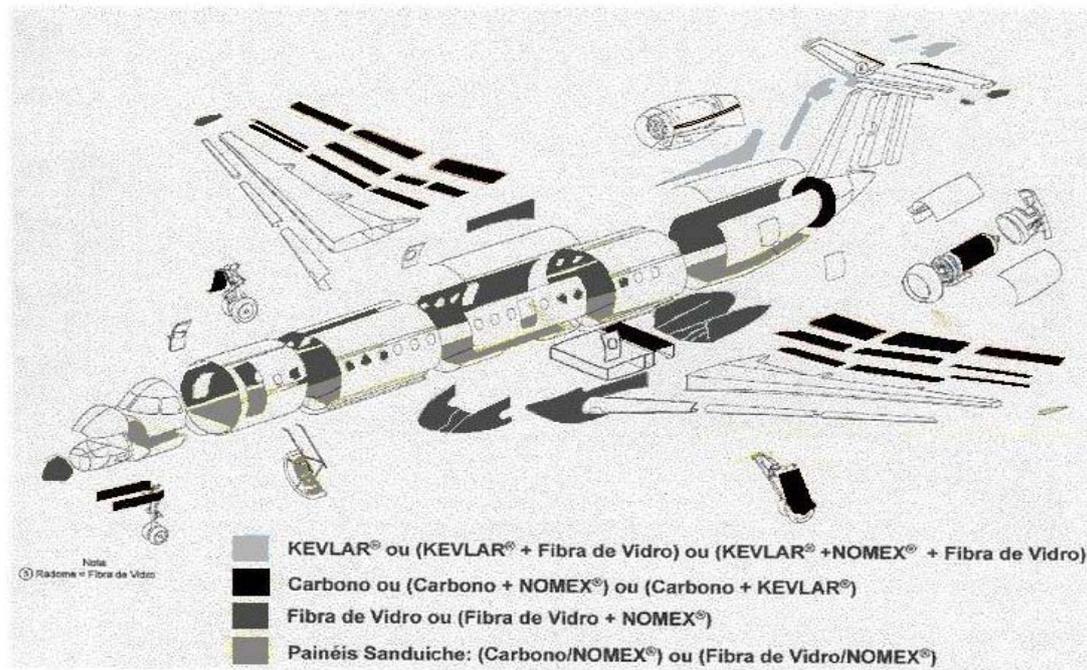


Figura 3.6 - Partes em materiais compósitos da aeronave Embraer EMB-145 (Ribeiro, 2002).

3.2 Produção de Compósitos Reforçados com Fibras

Para fabricar compósitos reforçados com fibras contínuas que atendam a determinadas especificações de projeto, as fibras devem estar distribuídas uniformemente no interior da matriz polimérica e, na maioria dos casos, também devem estar orientadas na mesma direção. Serão apresentadas as técnicas desenvolvidas através das quais são produzidos artigos de utilidade feitos a partir desses materiais.

3.2.1 Processo de deposição manual

Esse é o método mais simples para produzir uma peça com reforço por fibras. Para se fabricar uma peça por esse processo, aplica-se, em primeiro lugar, um revestimento de gel ao molde aberto. O reforço de fibras, o qual consiste normalmente num tecido ou manta, é em seguida colocado manualmente no molde. A resina polimérica misturada com

catalisador e acelerador é vazada com o auxílio de um pincel ou pulverizador. Depois, passa-se um rolo ou espátula, para que a resina molhe completamente o reforço e libere o ar que possa ter ficado aprisionado no interior da peça. Para aumentar a espessura da parede da peça que se quer produzir, adicionam-se mais camadas. Com esse método, podem fabricar-se cascos de barcos, depósitos, coberturas e painéis para construção.

3.2.2 Pultrusão

É uma técnica usada para fabricação de componentes que possuem comprimentos contínuos e que têm um formato de seção reta e constante (isto é, barras, tubos, vigas etc.). Com essa técnica, que está ilustrada na figura 3.7, os feixes (ou cabos) de fibras são, em primeiro lugar, impregnados com uma resina polimérica. Esses feixes são então estirados através de um molde de aço que pré-conforma a peça de acordo com a forma desejada, além de estabelecer a razão resina/fibra. O material passa então através de um molde de cura, que é usinado com precisão, de modo a conferir à peça sua forma final. Esse molde também é aquecido com o objetivo de dar início ao processo de cura da matriz de resina. Um dispositivo estira o material através dos moldes e também determina a velocidade de produção. Seções tubulares e ocas tornam-se possíveis pelo uso de mandris centrais ou pela inserção de núcleos ocos. De acordo com Callister (2002), os principais reforços são as fibras de vidro, carbono e aramida, que são adicionadas normalmente em concentrações entre 40% e 70% em volume. Os materiais comumente utilizados como matrizes incluem poliéster, éster vinílico e a resina epóxi.

A pultrusão é um processo contínuo que pode ser facilmente automatizado. As taxas de produção são relativamente altas, o que torna esse processo muito eficaz em termos de custos. Além disso, é possível obter uma ampla variedade de formas, e não existe qualquer limite prático ao comprimento do material que pode ser fabricado, conforme Callister (2002).

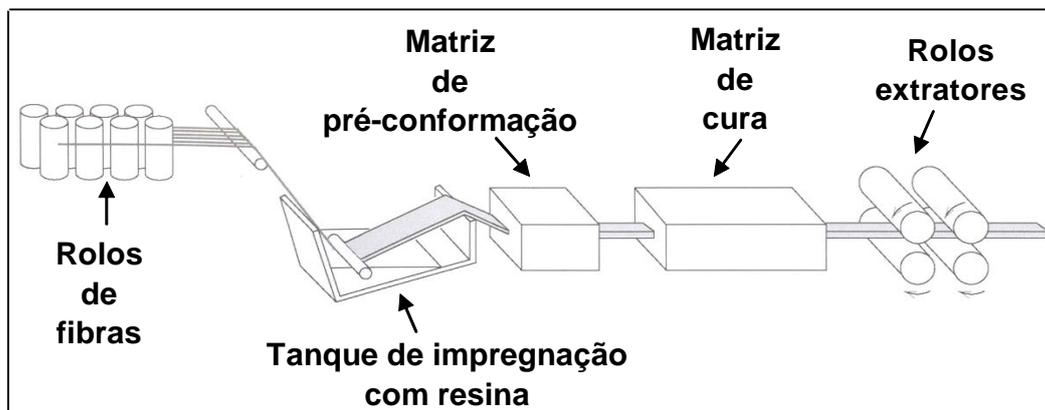


Figura 3.7 - Diagrama esquemático mostrando o processo de pultrusão, de acordo com Smith (1999).

3.2.3 Enrolamento de filamento

É um processo segundo o qual as fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira exata e de acordo com um padrão predeterminado para compor formas ocas (geralmente cilíndricas). As fibras, na forma de fios individuais ou de feixes, são primeiramente alimentadas através de um banho de resina, e em seguida enroladas continuamente ao redor de um mandril, em geral utilizando-se equipamentos de enrolamento automático (vide figura 3.8). Após ter sido aplicado o número apropriado de camadas, a cura é executada ou em um forno ou a temperatura ambiente. Em seguida, o mandril é removido. Como alternativa, “prepregs” estreitos e delgados (isto é, feixes impregnados) com 10mm ou menos em largura, podem ser enrolados em filamentos.

São possíveis vários padrões de enrolamento (circunferência, helicoidal e polar), de forma a dar as características mecânicas desejadas. As peças enroladas em filamentos possuem razão resistência-massa muito alta. Ainda, essa técnica permite um alto grau de controle sobre a uniformidade e a orientação do enrolamento, e, quando automatizado, o processo é mais atrativo economicamente. As estruturas mais comuns feitas a partir do enrolamento de filamento são as carcaças de motores de foguetes, tanques de armazenamento, tubulações e vasos de pressão. Atualmente, estão sendo utilizadas técnicas de fabricação

para produção de uma ampla variedade de formas estruturais. Tais formas não estão limitadas necessariamente a superfícies de revolução (por exemplo, viga de perfil “I”). Essa tecnologia está avançando muito rapidamente, pois apresenta uma excelente relação benefício-custo.

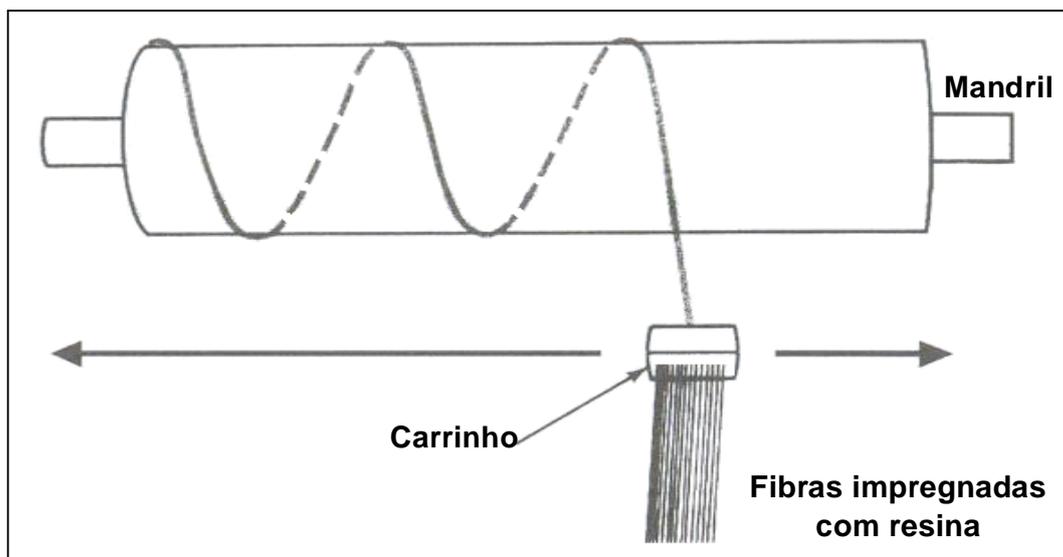


Figura 3.8 - Representação esquemática da técnica de enrolamento de filamento, segundo Smith (1999).

3.2.4 Processo “prepreg”

É o termo utilizado pela indústria dos compósitos para representar reforços com fibras contínuas pré-impregnadas com uma resina polimérica apenas parcialmente curada. Esse material é enviado para o fabricante na forma de uma fita. O produto é então moldado diretamente e curado por completo sem haver a necessidade de adicionar qualquer resina. Essa é provavelmente a forma de material compósito mais amplamente utilizada para aplicações estruturais.

O processo “prepreg”, que está representado esquematicamente para polímeros termofixos na figura 3.9, começa pela colimação de uma série de feixes de fibras contínuas enroladas em uma bobina. Essas mechas são então laminadas em sanduíches e prensadas entre folhas

de papel de liberação e de suporte, utilizando-se rolos aquecidos, em um processo conhecido por “calandragem”. A folha de papel de liberação é revestida com uma fina película de uma solução de resina aquecida, com viscosidade relativamente baixa, de modo tal a proporcionar a completa impregnação das fibras. Uma lâmina espalha a resina para formar uma película com espessura e largura uniforme. O produto final “prepreg” (a fita delgada que consiste em fibras contínuas e alinhadas, estando estas inseridas em uma resina parcialmente curada) é preparado para embalagem, sendo enrolado em uma bobina de papelão. Como está representada na figura 3.9, a folha de liberação é removida à medida que a fita impregnada é enrolada na bobina. A espessura típica para a fita varia entre 0,08mm e 0,25mm; a largura das tiras varia entre 25mm e 1525mm; enquanto o teor de resina fica geralmente entre um valor aproximado 35% e 45% em volume, segundo Callister (2002).

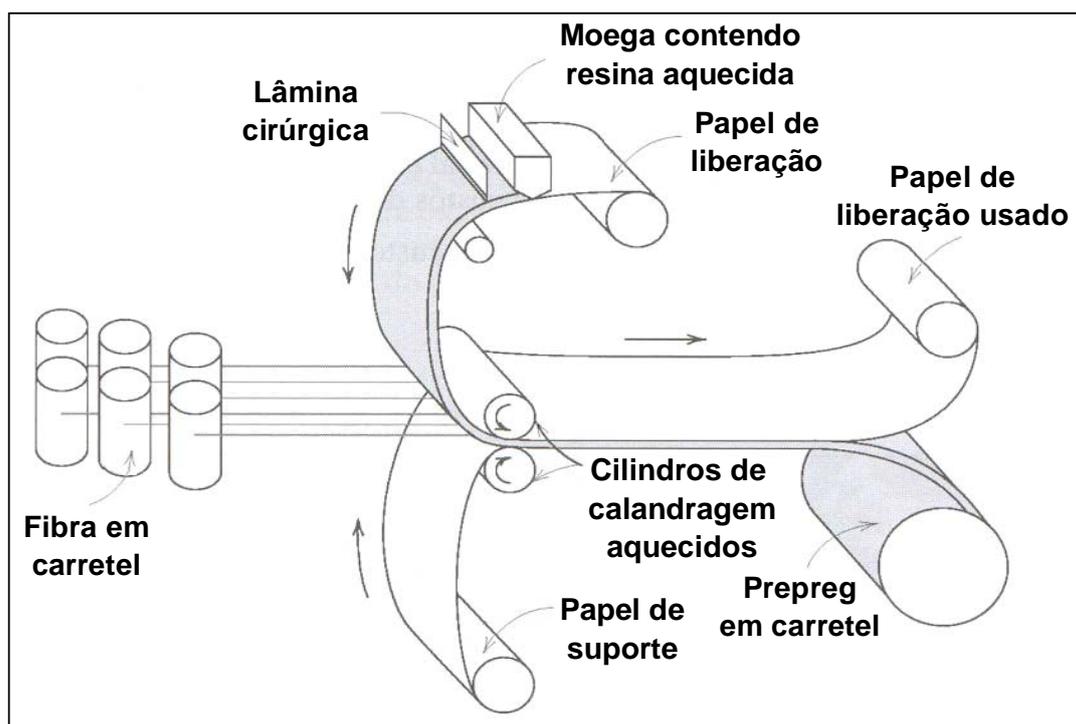


Figura 3.9 - Representação esquemática da técnica de “prepreg”, de acordo com Callister (2002).

O processo efetivo de fabricação começa com o “descarregamento”, ou seja, a colocação da fita “prepreg” sobre uma superfície trabalhada. Normalmente, várias camadas são colocadas (após a remoção do papel de suporte) para proporcionar a espessura desejada. O arranjo da colocação das camadas pode ser unidirecional; porém, com maior frequência, a orientação das fibras é alternada de modo a produzir um laminado com camadas cruzadas ou com camadas em ângulo. A cura final é obtida pela aplicação simultânea de calor e pressão.

O procedimento de descarregamento pode ser executado de forma totalmente manual. Desse modo, o operador tanto corta os comprimentos das fitas como também as posiciona sobre a superfície trabalhada de acordo com a orientação desejada. Alternativamente, os padrões da fita podem ser cortados a máquina e, então, colocados manualmente na posição apropriada. Os custos de fabricação podem ser reduzidos pela automação da colocação e do posicionamento das fitas, além de outros procedimentos de fabricação.

3.2.5 Pulverização

A pulverização (ou método de *spray*) para produção de placas ou cascas em plástico reforçado por fibras é semelhante ao método de deposição manual e pode ser usada para obter cascos de barcos, banheiras e bases de chuveiro além de outras formas de médio ou grande tamanho. Caso se use fibra de vidro, esse processo consiste na deposição simultânea, sobre um molde, de resina (com catalisadores) e de pedaços de feixes de fibras, usando-se para tal uma pistola de corte e projeção, a qual é alimentada por multifio de feixes contínuos, conforme ilustrado na figura 3.10. A camada depositada sobre o molde é, em seguida, densificada através da passagem de um rolo que remove o ar que possa estar aprisionado e que assegura a impregnação da fibra de reforço pela resina. Pode se adicionar várias camadas a fim de se obter a espessura desejada. A cura é normalmente realizada a temperatura ambiente, mas pode ser acelerada por aquecimento a uma temperatura moderada.

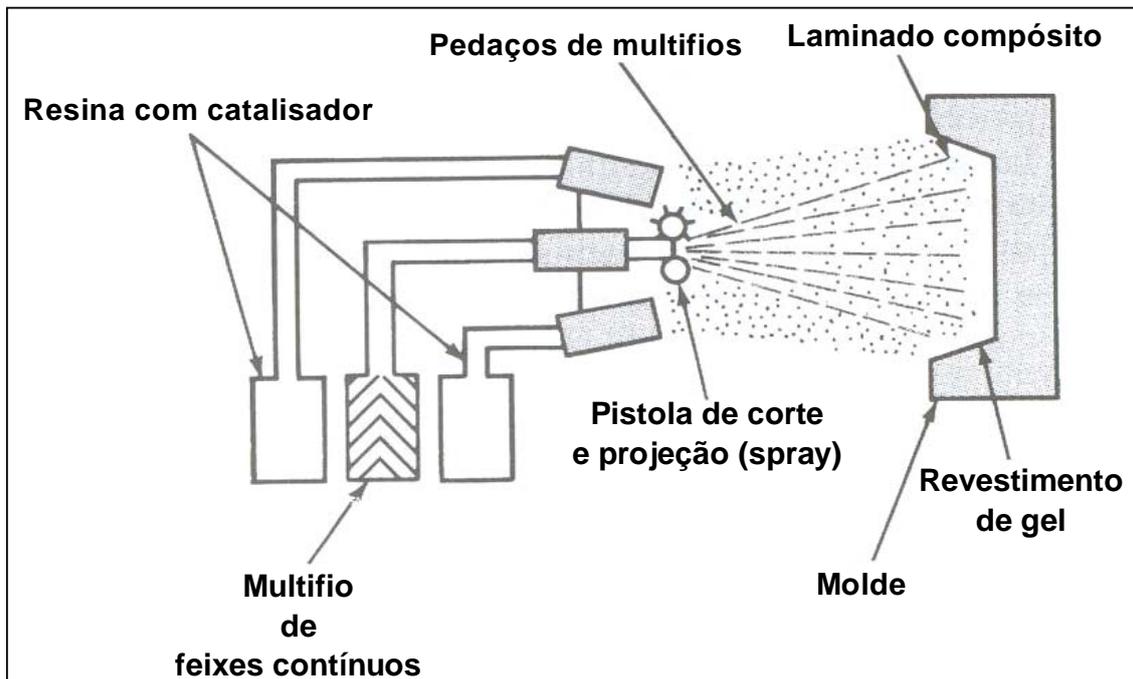


Figura 3.10 - Representação do método por pulverização, segundo Smith (1999).

3.2.6 Processo SMC ou de moldagem de folha

É um dos mais recentes processos usado para produzir peças de polímeros reforçados por fibras, especialmente para a indústria automotiva. Esse processo permite um bom controle da resina e a obtenção de boas propriedades de resistência mecânica, facilitando a produção em quantidade de peças de grande dimensão e muito uniforme, figura 3.11.

A folha de SMC (*sheet molding compound*) usada para a moldagem é normalmente obtida através de um processo contínuo altamente automatizado. Um feixe contínuo de fibra de vidro é cortado em comprimento de cerca de 50mm. Os feixes contínuos resultantes são depositados sobre uma camada de pasta formada pela mistura de uma resina e a respectiva “carga” (isto é, materiais de enchimento), e que essa mistura é passada sobre um filme de polietileno. A seguir, deposita-se outra camada da mistura de resina e carga sobre a camada anterior, de modo a obter um sanduíche de fibra contínua de vidro e pasta de resina com a respectiva carga. Esse sanduíche, com a parte de cima e a parte de baixo cobertas por polietileno, é compactado e enrolado. Esses rolos de folha de SMC são, em seguida,

armazenados numa câmara de envelhecimento, durante cerca de 1 a 4 dias, para que a folha possa absorver bem as fibras de vidro. Os rolos de SMC são então deslocados para junto de uma prensa e cortados em pedaços com a forma adequada para a peça, colocando-se as folhas de SMC no interior de um molde metálico aquecido (1500°C). Uma vez fechado o molde, aplica-se pressão (7kPa) através da prensa hidráulica, e o SMC flui de modo uniforme através do molde, obtendo-se a peça final. Por vezes, durante a operação de prensagem, injeta-se através do molde um revestimento para melhorar a qualidade da superfície da peça obtida pelo método SMC, conforme Smith (1999).

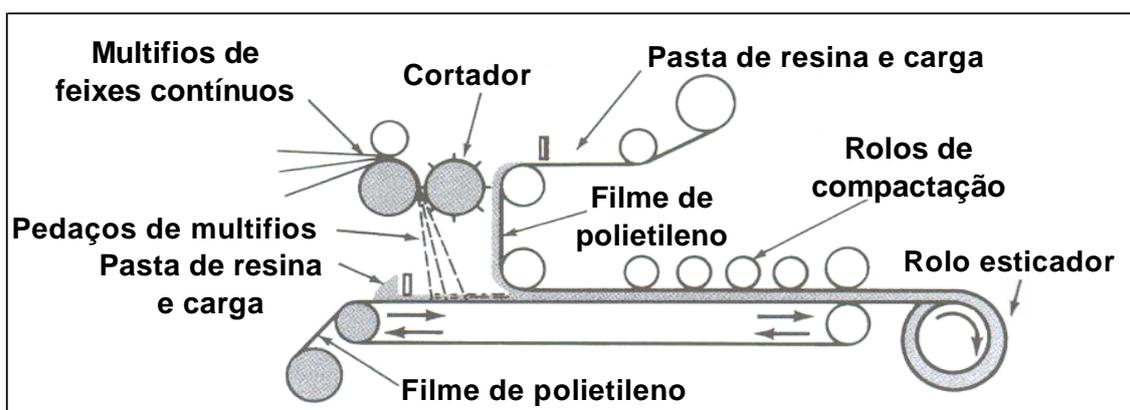


Figura 3.11 - Representação esquemática do método SMC, conforme Smith (1998).

3.3 Processos de Fabricação por Usinagem

O grau de desenvolvimento de uma sociedade industrial pode ser avaliado pela sua capacidade de agregar valor aos bens e serviços oferecidos. Essa capacidade se reflete diretamente na qualidade de vida dos indivíduos dessa sociedade, que poderão ser dotados de conhecimentos científicos e tecnológicos, capazes ou não de transformar matéria-prima e componentes de alto valor agregado. Assim, a geração, a disseminação e a gestão desses conhecimentos disponibilizam à sociedade o potencial necessário à produção de bens de maior rentabilidade. Isso eleva o padrão de vida dos indivíduos, quando essa mesma sociedade se mostra capaz de realizar esse potencial, alcançando, assim, sucesso no desenvolvimento industrial. No Brasil, alguns setores industriais têm atingido esse objetivo, e os benefícios já podem ser observados na qualidade de vida e nas exigências de formação profissional e educacional dos indivíduos pertencentes a esses setores.

Fabricar é transformar matérias-primas em produtos acabados, por vários processos, seguindo planos bem organizados, em todos os aspectos. Portanto, não é nenhuma surpresa que nos países industrializados a fabricação compreende um terço do produto interno bruto. A fabricação é utilizada desde o início da civilização, quando se produziam vários artigos de madeira, pedra, cerâmica e metal. Houve muito desenvolvimento com o passar dos anos, e nos dias atuais grandes quantidades de materiais e processos estão disponíveis para fabricar produtos que variam desde um simples componente até produtos altamente sofisticados.

A fabricação de componentes geralmente envolve mais de uma operação. A escolha de um método particular sobre outros vai depender de um grande número de fatores. Na seleção do processo, os seguintes fatores devem ser considerados: tipo de material e suas propriedades; propriedades finais desejadas; tamanho, forma e complexidade do componente; tolerâncias e acabamento superficial requerido; processo subsequente envolvido; projeto e custo de ferramental; efeito do material na vida da ferramenta ou matriz; resíduos gerados e seu valor; disponibilidade do equipamento e experiências operacionais; *lead time* necessário para iniciar produção; número de partes requeridas e taxa de produção desejadas; custo total de processamento, entre outros (Machado e Silva, 1999).

Entre os processos de fabricação, destaca-se a usinagem como o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavaco algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo mundo (Trent, 1984). Apesar dessa popularidade, trata-se, ainda, de um processo bastante imprevisível, e a definição paradoxal que se segue relata com precisão toda a sistemática que o envolve. É um processo complexo e simples ao mesmo tempo, onde se produzem peças, removendo-se excesso de material, na forma de cavacos. É complexo devido às dificuldades em se determinar as imprevisíveis condições de corte. É simples porque, uma vez determinadas as condições ideais de corte, o cavaco se forma corretamente, dispensando qualquer tipo de ação especial do operador. As condições ideais de corte consistem de: material e geometria adequada da ferramenta de corte; velocidade de corte e avanço adequado para uma profundidade de corte predeterminada; fluido de corte adequado. Nessas condições ideais

de corte, pode-se produzir peças dentro de especificações de formas e tamanhos com ótimos acabamentos ao menor custo possível (Machado e Silva, 1999).

A usinagem tem ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, envolvendo um número bastante grande de variáveis. Shaw (1984) resume o problema da seguinte maneira: “É praticamente impossível prever o desempenho no corte dos materiais. entretanto, isso não quer dizer que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor, sendo que cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e propriamente interpretado contribui para o nosso entendimento do processo, e entendimento é o passo mais próximo da capacidade de prever”.

De um modo geral, a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo (índice de usinabilidade), um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como a vida da ferramenta, a força de usinagem, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade, as características do cavaco. A usinabilidade não é, portanto, uma grandeza específica de um dado material, tal como a resistência à tração, o alongamento, o módulo de elasticidade e outras propriedades, de acordo com Ferraresi (1977).

Mas essa classificação da usinabilidade de um material pode não ser a mesma, quando obtido em condições diferentes. Por isso, Trent (1984) sugere que a usinabilidade não seja uma propriedade, mas o modo de o material se comportar durante o corte. Dessa forma, a usinabilidade é muito mais uma função da operação que uma função de uma ou mais propriedades do material. Em termos gerais, a usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material.

Diniz (2003) afirma que a usinabilidade não depende somente das condições intrínsecas do material, mas também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema “máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação” e dos tipos de trabalho executados pela ferramenta (operação empregada, corte

contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta). Assim, um material pode ter um valor de usinabilidade baixo sob certas condições de usinagem e um valor maior sob outras condições.

Estes custos envolvidos no processo de usinagem são divididos entre ferramentas, equipamentos, fluidos de corte (quando utilizado), entre outros (Kopac, 1998). A figura 3.12 apresenta, de forma sumária, a parcela do custo que cabe a cada parte do processo.

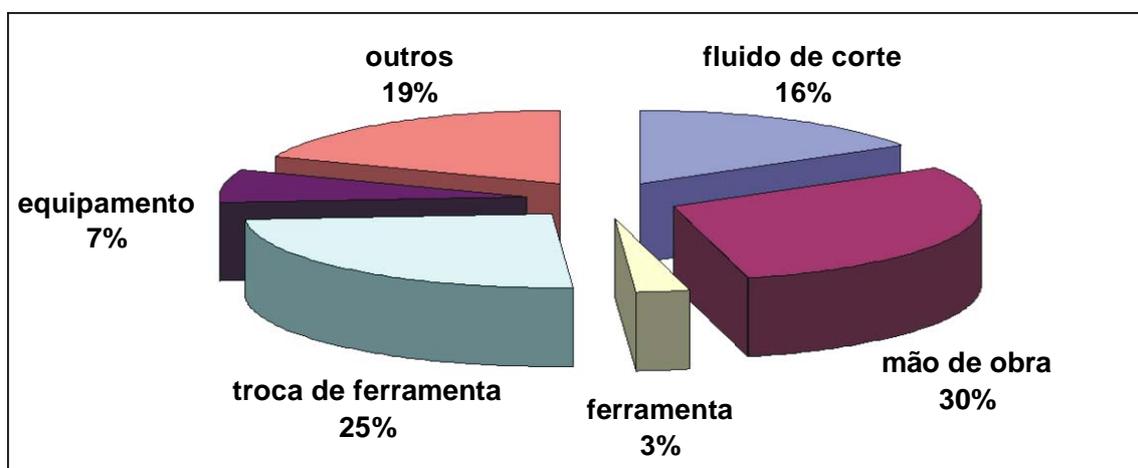


Figura 3.12 - Divisão dos custos de produção por usinagem (Kopac, 1998).

A usinagem de polímero reforçado com fibra (PRF) difere significativamente da usinagem dos materiais metálicos em função da diversidade estrutural que esses materiais apresentam. Os compósitos são formados por conjuntos de fibras dispostas em feixes paralelos ou na forma picada e de tecidos suportados por uma matriz de resina polimérica. As figuras 3.13 de (a) a (h) mostram algumas configurações típicas do mecanismo de corte em compósitos reforçados com fibras, onde pode se ter fibras em diversas orientações em relação à direção de corte. A disposição dessas fibras na matriz define o mecanismo de corte durante a usinagem e, conseqüentemente, o tipo de cavaco produzido, as forças de corte, a vida da ferramenta, a rugosidade e a integridade da peça, conforme Santhanakrishnan et al (1993).

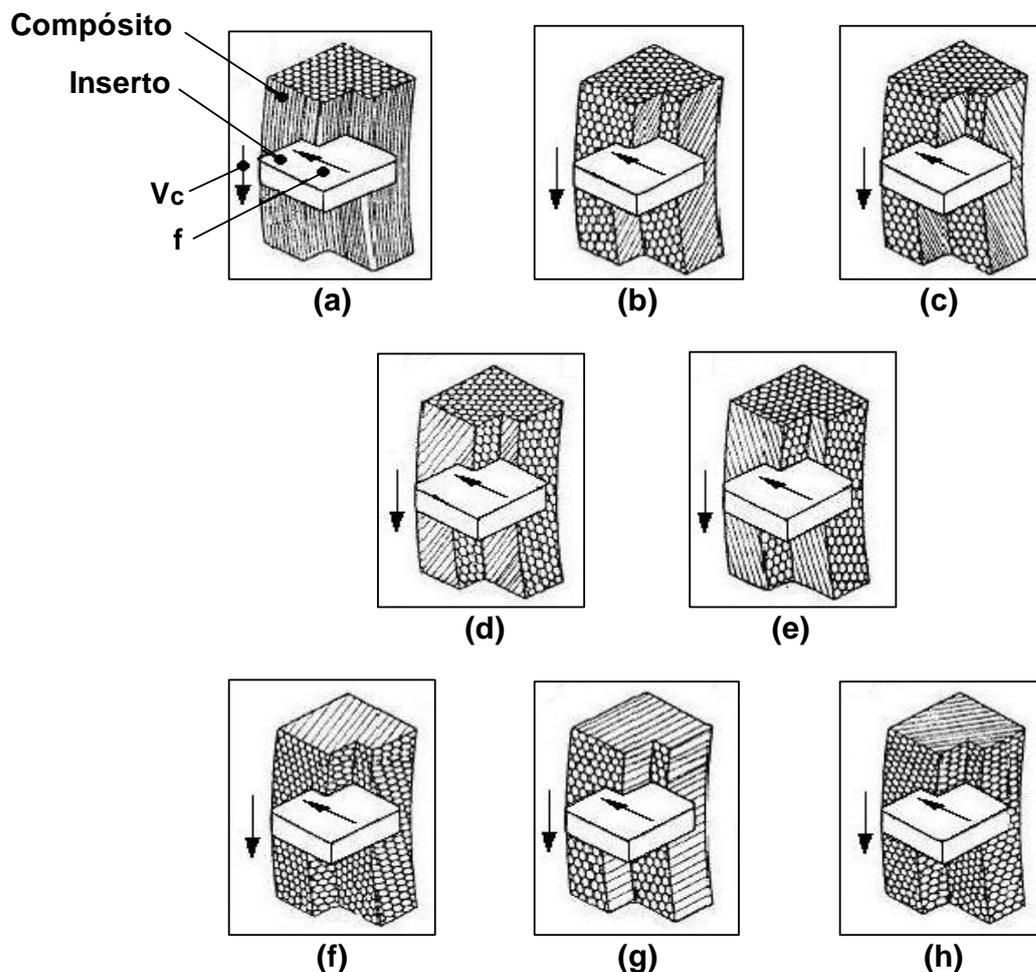


Figura 3.13 - Representação esquemática do corte de compósitos em várias direções, de acordo com Santhanakrishnan et al (1993).

3.4 Mecanismo de Formação do Cavaco

Lucas (2005) afirma que uma série de modelos de formação de cavaco tem sido proposta para descrever o mecanismo desse fenômeno. O consenso é que esses modelos, na verdade, apenas se aproximam das condições reais em que o processo se dá nas interfaces. Mas essas análises teóricas, juntamente com observações das regiões de deformação, a partir de análise de raízes de cavaco, contribuem para o entendimento do mecanismo da formação do cavaco.

O conhecimento do mecanismo de formação do cavaco é muito importante, pois sua formação influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desempenho e o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado, a penetração do fluido de corte, o acabamento superficial, a exposição do operador a risco de acidentes, entre outros.

As principais etapas existentes durante o processo de formação de cavacos de materiais metálicos são: deformação elástica (ou recalque); deformação plástica; ruptura; e movimento sobre a superfície de saída da ferramenta. A figura 3.14 ilustra os elementos principais no corte ortogonal durante a formação do cavaco, de acordo com Trent (1984).

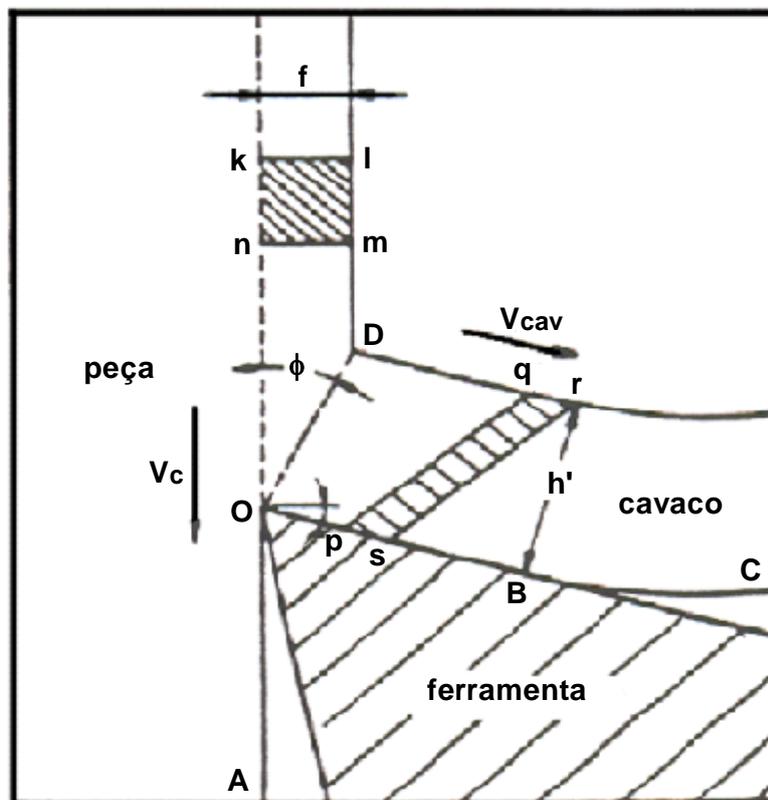


Figura 3.14 - Diagrama da cunha cortante, segundo Trent (1984).

A ação da ferramenta recalca o volume $klmn$ (figura 3.14). Nesse ponto, o material começa a sofrer deformações elásticas. Com o prosseguimento do processo, o limite de escoamento é vencido, e o material passa a se deformar plasticamente. Deformações plásticas continuam acontecendo até que as tensões não sejam mais suficientes para manter esse

regime. Assim, fica definida uma zona de cisalhamento primária, que facilita o estudo representado por apenas “um plano” (este, definido pela linha “OD” da figura 3.14).

Após o material entrar no regime plástico, o avanço da ferramenta faz com que as tensões ultrapassem o limite de resistência do material, ainda dentro da zona de cisalhamento primária, promovendo a ruptura, que se inicia com a abertura de uma trinca no ponto “O” (figura 3.14), e que pode se estender até o ponto “D”, segundo o plano “OD”. A extensão de propagação da trinca, que depende principalmente da ductilidade (ou fragilidade) do material da peça, vai determinar a classe do cavaco, isto, é, contínuo ou de ruptura.

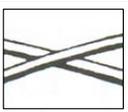
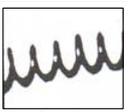
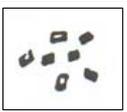
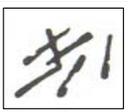
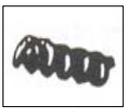
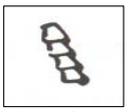
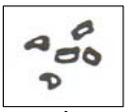
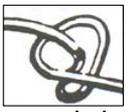
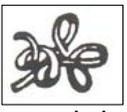
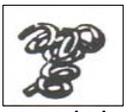
Ao ter passado pela região de cisalhamento primário, o volume de material *klmn* se movimenta sobre a superfície de saída da ferramenta e sai como um componente ou lamela do cavaco. Entretanto, ao atravessar a zona de cisalhamento primário, esse volume se deforma plasticamente para um novo formato *pqrs* (figura 3.14). Quando uma pequena região junto à interface com a ferramenta sofre altíssimas deformações plásticas cisalhantes, desenvolvem-se altíssimas temperaturas, o que compromete a resistência das ferramentas. Essa região é definida como zona de cisalhamento secundária, representada na figura 3.14 como o plano OB.

Esse mecanismo gera uma nova superfície na peça e dá origem à formação de cavaco ou um fluxo de elementos de cavacos quebrados em pedaços, dependendo das propriedades do material da peça. Com isso, pode-se classificar os cavacos em função da classe ou da forma. Quanto às classes, os cavacos são: cavaco contínuo, cavaco parcialmente contínuo, cavaco descontínuo e cavaco segmentado. Para as três primeiras classes, a classificação depende muito da ductilidade (ou fragilidade) do material da peça e das condições de corte. A última classe são cavacos originados na presença de “cisalhamento termoplástico catastrófico”, conforme Machado e Silva (1999).

Quanto à forma, os cavacos são classificados como: cavaco em fita, cavaco helicoidal, cavaco espiral e cavaco em lascas ou pedaços. A norma ISO 3685/1993, classifica com mais detalhes as formas e os tipos de cavacos, vide tabela 3.8. O material da peça é o principal fator que vai influenciar na classificação quanto à forma dos cavacos. Entretanto,

a classe do cavaco também será influenciada. Cavacos contínuos, parcialmente contínuos e segmentados podem apresentar qualquer forma, dependendo das condições de corte e do uso ou não de quebra-cavacos. O avanço é o parâmetro que mais influencia na forma do cavaco. Apesar das condições de corte poderem ser escolhidas para se evitar, ou pelo menos reduzir a tendência de formação do cavaco contínuo, o método mais eficiente é o uso de dispositivos que promovem a quebra mecânica. Esses dispositivos são conhecidos como quebra cavacos.

Tabela 3.8 - Classificação das formas e dos tipos de cavacos de acordo com a norma ISO 3685/1993

cavaco em fita	cavaco tubular	cavaco espiral	cavaco helicoidal (tipo arruela)	cavaco helicoidal (tipo cônico)	cavaco em arco	cavaco simples	cavaco tipo agulha
 longo	 longo	 plano	 longo	 longo	 conectado	 solto	 solto
 curto	 curto	 cônico	 curto	 curto	 solto		
 emaranhado	 emaranhado		 emaranhado	 emaranhado			

No caso específico de PRF, um estudo experimental sobre o mecanismo de corte ortogonal usando-se ferramenta de PCD foi feito por Wang et al (1995), vide figura 3.15. Segundo os autores, três mecanismos de corte sofrem forte influência da orientação das fibras. Nas fibras orientadas a 0°, o mecanismo de formação do cavaco inclui a fratura ao longo da interface matriz-fibra, atribuído ao dobramento da fibra, seguido por fratura perpendicular a direção do seu eixo. Na orientação positiva até 75°, a formação do cavaco constitui compressão induzida e cisalhamento perpendicular na direção do eixo da fibra. A liberação do cavaco ocorre por fratura ao longo da interface matriz-fibra. Na orientação 90° a negativa, a formação e a remoção do cavaco serão por fratura e cisalhamento ao longo da interface matriz-fibra, com suas macrodeformações sobre a superfície. Essas macrodeformações ocorrem devido à carga de compressão da ferramenta. Outra observação feita pelos autores foi referente à influência da geometria da ferramenta sobre a

força resultante de corte. Tal geometria apresentou os menores valores para fibras orientadas a 0° e para ferramentas com ângulo de saída, $\gamma_0=10^\circ$, e ângulo de folga, $\alpha_0=17^\circ$. Um outro resultado observado é que aumentando-se γ_0 aumenta-se também a força de corte resultante. Segundo os autores, isso foi devido à influência do aumento da força de avanço.

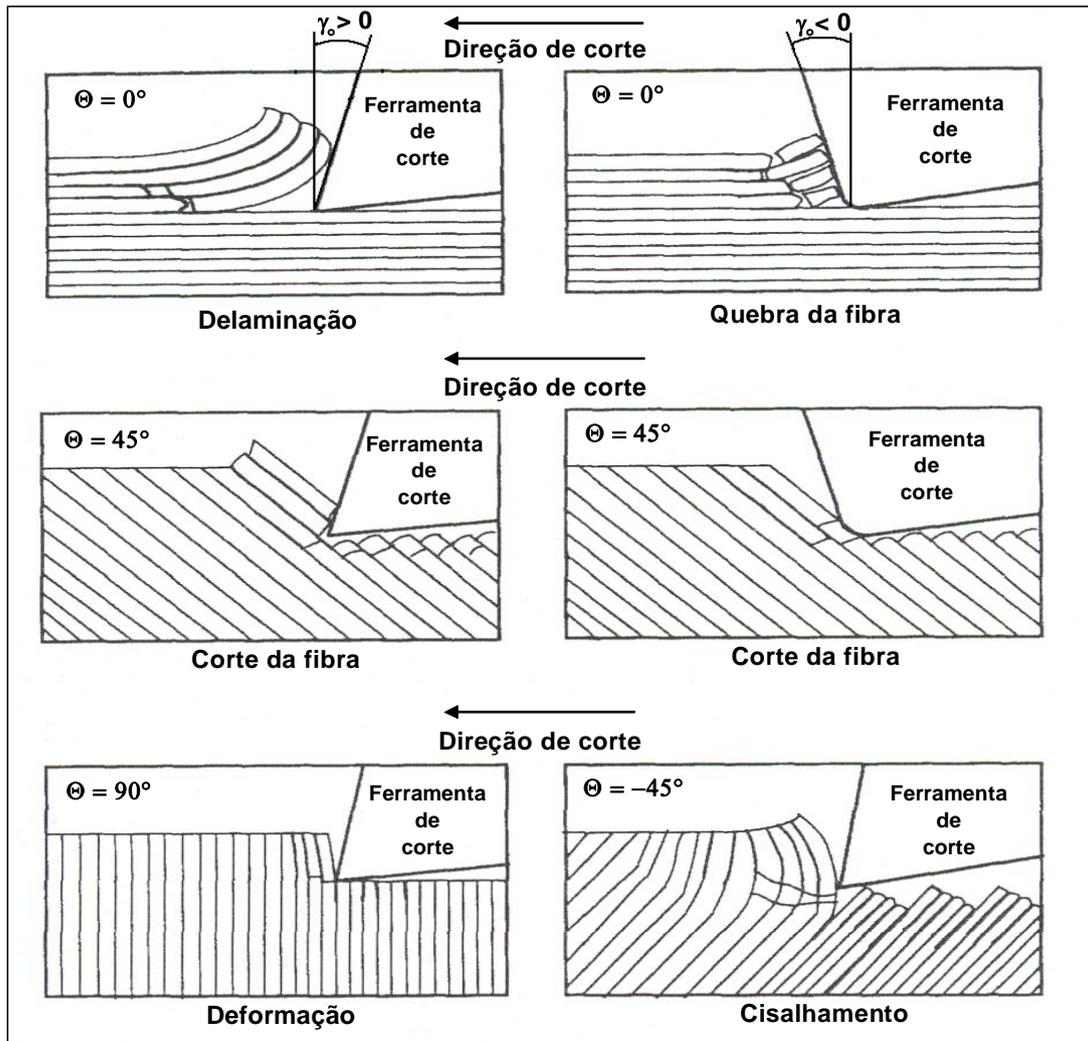


Figura 3.15 - Desenho esquemático do mecanismo de corte ortogonal de compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV), de acordo com Wang et al (1995).

Já Wang e Zhang (2003) estudaram o corte ortogonal de fibras unidirecionais de um polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC). Para o experimento, empregou-se a operação de aplainamento, (vide figura 3.16), com velocidade de corte de 1m/min. Os materiais utilizados foram dois compósitos comerciais: *prepregs F593* e *MTM56*.

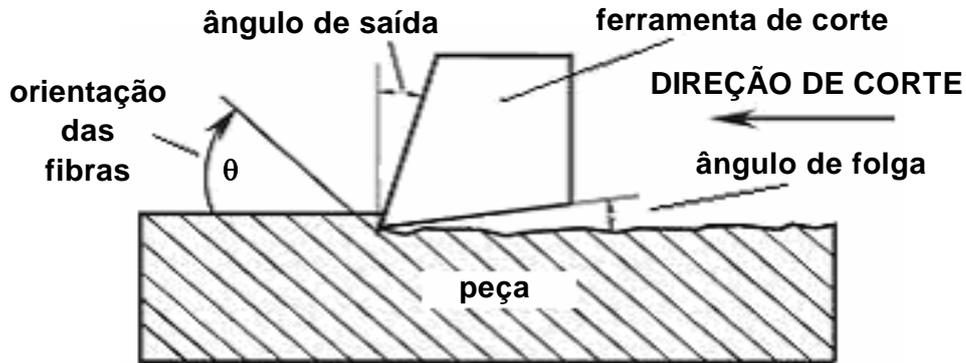


Figura 3.16 - Representação esquemática da operação de aplainamento de compósito, segundo Wang e Zhang (2003).

Os autores analisaram a influência do ângulo de direção das fibras (θ) e da profundidade de corte sobre a rugosidade da superfície, como mostrado nas figuras 3.17 e 3.18. Nas figuras (3.17 e 3.18), pode-se observar que a orientação das fibras e o ângulo de saída da ferramenta não tiveram influência significativa sobre a rugosidade da superfície para $\theta < 90^\circ$. Porém, para uma profundidade de corte de 0,001mm, e θ entre 90° e 150° , ocorreu uma variação na rugosidade em função do ângulo de folga da ferramenta, figura 3.17. Para uma profundidade de corte de 0,05mm e com $\theta > 90^\circ$, também ocorreu uma variação na rugosidade em função do ângulo de saída da ferramenta, conforme a figura 3.18.

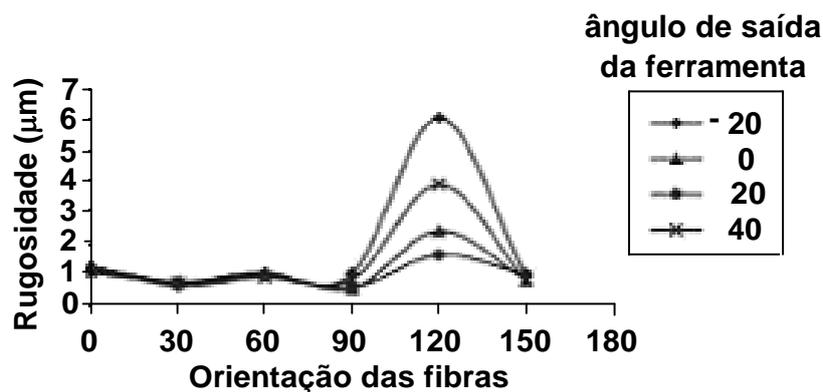


Figura 3.17 - Efeito da orientação das fibras sobre a rugosidade da superfície, para profundidade de corte 0,001mm, conforme Wang e Zhang (2003).

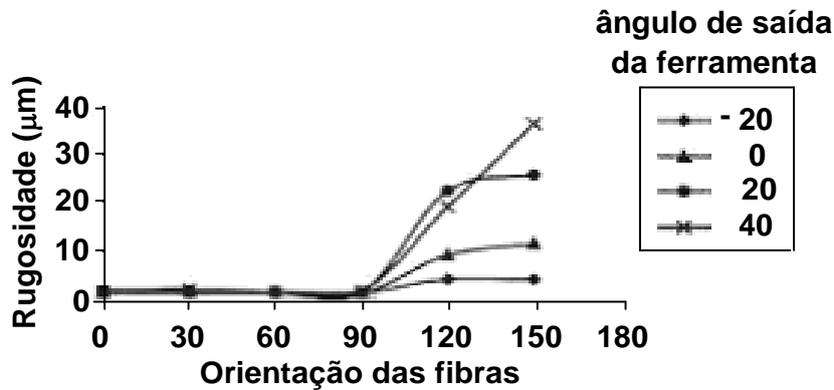


Figura 3.18 - Efeito da orientação das fibras sobre a rugosidade da superfície, para profundidade de corte 0,05mm, conforme Wang e Zhang (2003).

De acordo com os autores, esses fenômenos são explicados pela variação do mecanismo de deformação na zona de corte quando a profundidade de corte e a orientação das fibras mudam, como mostra a figura 3.19.

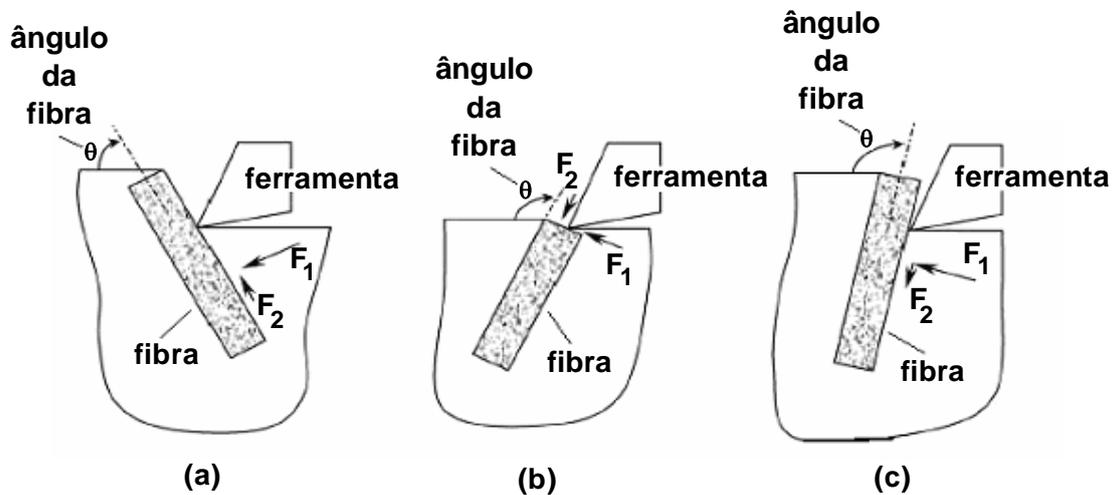


Figura 3.19 - Representação esquemática do mecanismo de corte das fibras no aplainamento de um compósito, conforme Wang e Zhang (2003).

Quando θ é menor que 90° , figura 3.19(a), a fibra é empurrada perpendicularmente ao seu eixo pela força F_1 e na direção da superfície da peça. Nesse caso, a fibra que está apoiada sofre uma pequena deflexão. Ao mesmo tempo, a força F_2 , longitudinal ao eixo da fibra,

cria uma tensão, quebrando a fibra e a resina na região. O resultado é uma superfície com danos pequenos, figura 3.17. Quando $\theta > 90^\circ$, a situação torna-se mais complicada: se a profundidade de corte é menor que o diâmetro da fibra, o corte se dá na extremidade da fibra, submetendo-a a uma compressão axial, figura 3.19 (b). Nesse caso, ocorre a flexão e a quebra da fibra e da resina na região. O resultado é uma superfície com alto grau de rugosidade, figura 3.18. Já quando $\theta > 90^\circ$ e a profundidade de corte é maior que o diâmetro da fibra, figura 3.19(c), a força F_l empurra a fibra perpendicularmente ao seu eixo, na direção externa da peça. Nesse caso, a fibra não tem apoio e se rompe retirando parte da resina. Daí, tem-se também uma superfície com alto grau de rugosidade.

Ghidossi et al (2006) também afirma que os danos sofridos pelos compósitos durante a usinagem são fortemente influenciados pelo ângulo formado entre a direção da fibra e a aresta de corte da ferramenta. Esses danos são de dois tipos: cratera, para as fibras orientadas a 15° ; e quebra subsuperficial para as fibras orientadas na direção de 45° .

3.5 Esforços de Corte no Processo de Usinagem

O conhecimento acerca do comportamento e da ordem de grandezas dos esforços de corte em operações de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. Existem pelo menos duas abordagens no estudo dos esforços de corte. A primeira delas é teórica, partindo-se da fenomenologia de formação do cavaco. Assim, através de algumas simplificações, como a suposição de que o corte é ortogonal (corte com componentes de forças em somente duas direções), calcula-se os diversos esforços que ocorrem em torno do plano de cisalhamento do cavaco e da superfície de saída da ferramenta. A segunda abordagem é empírica. Nela, os esforços de corte são equacionados utilizando-se coeficientes retirados de procedimentos experimentais.

As forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta. A força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem é chamada de

força de usinagem F_u . Em princípio, nem a direção nem o sentido da força de usinagem são conhecidos, tornando-se impossível medi-la e conhecer melhor as influências de diversos parâmetros sobre o seu valor. Então, não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas.

Para melhor entender como as forças de usinagem atuam na cunha cortante, o corte ortogonal deve ser considerado, como mostra o círculo de Merchant da figura 3.20. Esse círculo é obtido trasladando-se a força resultante F_u para a ponta da ferramenta, fazendo-se com que seu módulo iguale ao diâmetro do círculo. Esse artifício permite que a relação entre as diversas componentes da força F_u sejam geometricamente evidentes.

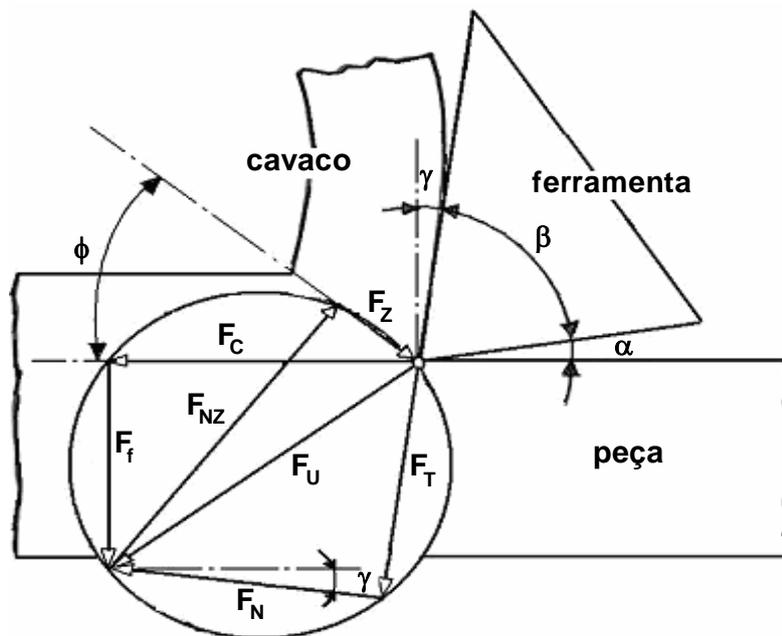


Figura 3.20 - Círculo de Merchant, de acordo com Ferraresi (1977).

A resultante F_u pode ser decomposta em duas componentes ortogonais: F_t , a força de atrito, responsável pela energia consumida no plano de cisalhamento secundário, e em F_n , a força normal, perpendicular a F_t . Da mesma maneira, pode ser decomposta em F_z , a força de cisalhamento no plano de cisalhamento primário, responsável pela energia consumida para cisalhar o material naquele plano, e em F_{nz} , a força que exerce esforço de compressão no plano de cisalhamento primário, perpendicular a F_z . A resultante F_u pode ainda ser

decomposta em F_c , a força de corte, na direção de corte, responsável pelo trabalho total realizado no corte, e em F_f , a força de avanço, na direção de avanço e perpendicular a F_c .

No caso do corte oblíquo (ou tridimensional), o tratamento é análogo ao corte ortogonal, com a diferença que agora uma terceira componente de F_u está presente, transportando a resultante da força de usinagem do plano para o espaço. A terceira componente é a força passiva F_p (projeção de F_u perpendicular ao plano de trabalho).

De uma maneira simples e clara, pode-se afirmar que todos os fatores que contribuem para a movimentação livre do cavaco por sobre a superfície de saída atuam no sentido de diminuir a força de usinagem. Se as condições da interface se apresentarem como uma restrição ao escoamento livre do cavaco, a ação da ferramenta sobre a superfície inferior da cunha do cavaco tem que ser maior, ou seja, deve ter sua força aumentada, de modo a vencer essa restrição. Dentro desse raciocínio, a força de usinagem pode ser considerada dependente de dois fatores principais, segundo Trent (1984): a área de contato cavaco-ferramenta e a resistência ao cisalhamento, do material da peça, nos planos de cisalhamento primário e secundário. Com isso, qualquer parâmetro pode ser analisado, com base nos seus efeitos sobre esses dois fatores principais. Muitos parâmetros vão atuar de acordo com os dois fatores, e os resultados vão depender da predominância de um sobre o outro. Apesar dessa análise ser de grande utilidade, a predominância dos fatores deve ser comprovada experimentalmente.

A pressão específica de corte (K_s) é outro parâmetro do esforço de corte definida como a relação entre a força de corte (F_c) e a área da seção de corte (A). Essa pressão específica de corte também pode ser entendida como sendo a energia efetiva consumida para arrancar uma unidade de volume de material da peça. É considerada um bom índice de usinabilidade dos materiais. Todos os fatores que alteram o valor de F_c sem alterar o valor de A alteram proporcionalmente o valor de K_s . É verificado experimentalmente que o fator mais influente é o avanço. Vários modelos, como os de Taylor, ASME, AWF, Kronenberg e Kienzle, foram propostos para se calcular K_s . As fórmulas mais utilizadas são as de Kronenberg e Kienzle, por apresentarem valores mais próximos dos reais.

O comportamento das componentes de força de usinagem e grandezas derivadas em função dos parâmetros de corte foi assunto de interesse de alguns estudos sobre a usinagem de polímeros reforçados com fibras (PRF), descritos a seguir.

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre os parâmetros velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a força de avanço (F_f) e a pressão de corte (k_s), Davim et al (2004a) efetuaram furos em um PRFV, utilizando dois tipos de brocas: *Stub Length* e *Brad & Spur*, mostradas na figura 3.21.

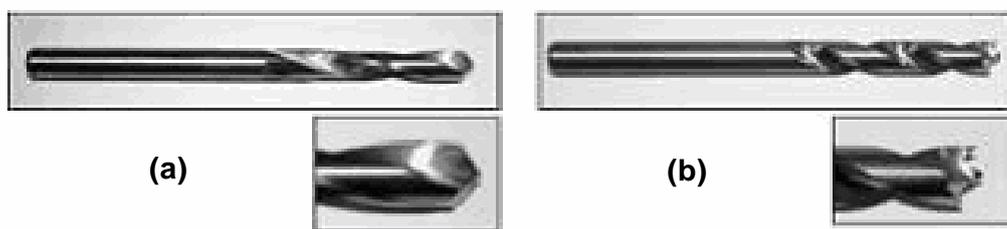


Figura 3.21 - Brocas: (a) *Stub Length* e (b) *Brad & Spur*, apresentadas por Davim et al (2004a).

Os autores concluíram que a força de avanço, figura 3.22, sofreu uma forte influência do avanço para duas brocas, enquanto a velocidade de corte teve uma influência pequena. Além disso, a broca *Stub Length* apresentou valores de F_f bem superiores, possivelmente devido à sua geometria (helicoidal).

Outro resultado obtido pelos autores (vide figura 3.23), mostra a pressão específica de corte (k_s) em função do avanço. Aqui também o avanço teve uma grande influência sobre a pressão específica de corte, para as duas brocas, enquanto a velocidade de corte (v_c) praticamente não apresentou influência.

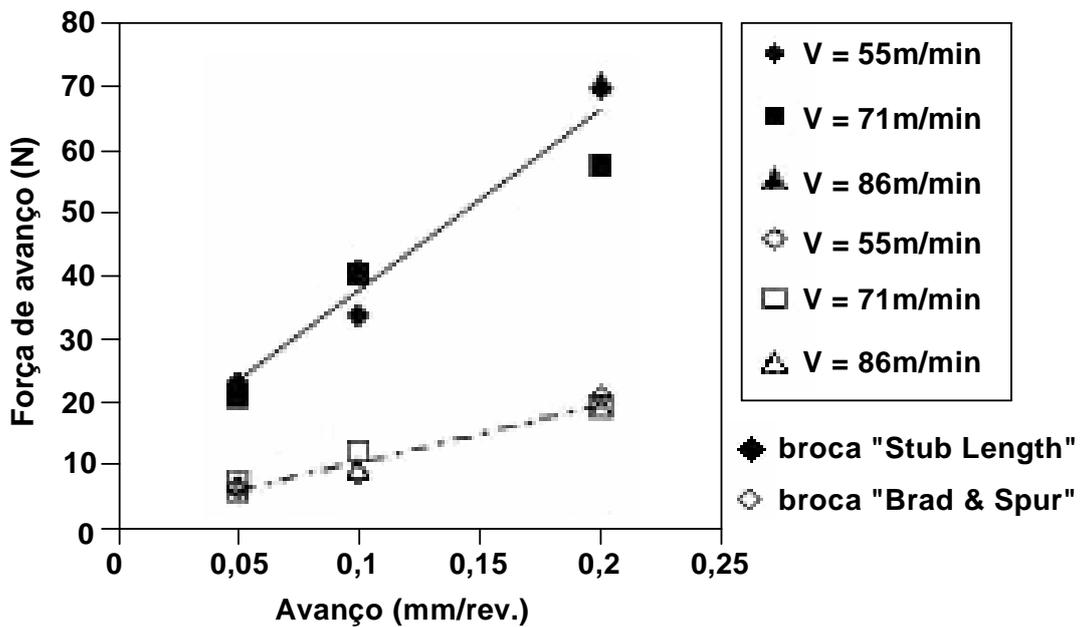


Figura 3.22 - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a força de avanço, conforme Davim et al (2004a).

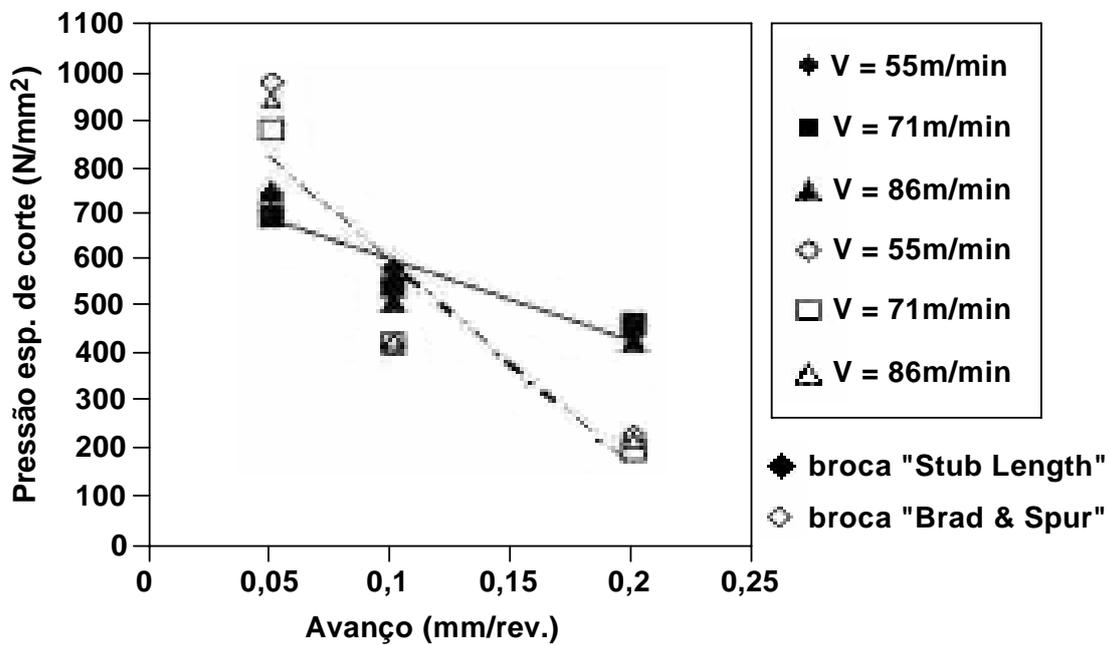


Figura 3.23 - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a pressão de corte (k_s), de acordo com Davim et al (2004a).

Comparando-se os dois resultados, observa-se que a broca *Stub Length* apresentou maior variação para a força de avanço e menor variação para a pressão específica de corte, enquanto a broca *Brad & Spur* apresentou resultados inversos. Uma das causas dessa inversão, talvez seja a geometria das ferramentas, pois as arestas de corte das brocas são bem diferentes, de acordo com os respectivos autores.

Para estudar o efeito do diâmetro da broca sobre a força de avanço e o torque, El-Sonbaty et al (2004) utilizaram brocas helicoidais de aço rápido com diâmetros de 8mm, 9mm, 10mm, 11mm, 12mm, e 13mm para furar PRFV com uma rotação constante de 875rpm, obtendo-se assim diferentes velocidades de corte. Foram utilizados avanços de 0,5mm/rev, 0,1mm/rev e 0,23mm/rev. As figuras 3.24 e 3.25 mostram, respectivamente, a força de avanço e o torque em função do aumento do diâmetro da broca, da velocidade de corte e do avanço. O aumento da força de avanço e do torque em função do diâmetro da broca pode ser atribuído à resistência que o cavaco oferece para a sua formação, devido à maior área de seção transversal do cavaco. Com o aumento do avanço, a força de avanço e o torque também crescem pelo mesmo motivo. Entretanto, nota-se que a influência do avanço sobre a força de avanço e o torque é superior à influência da velocidade de corte.

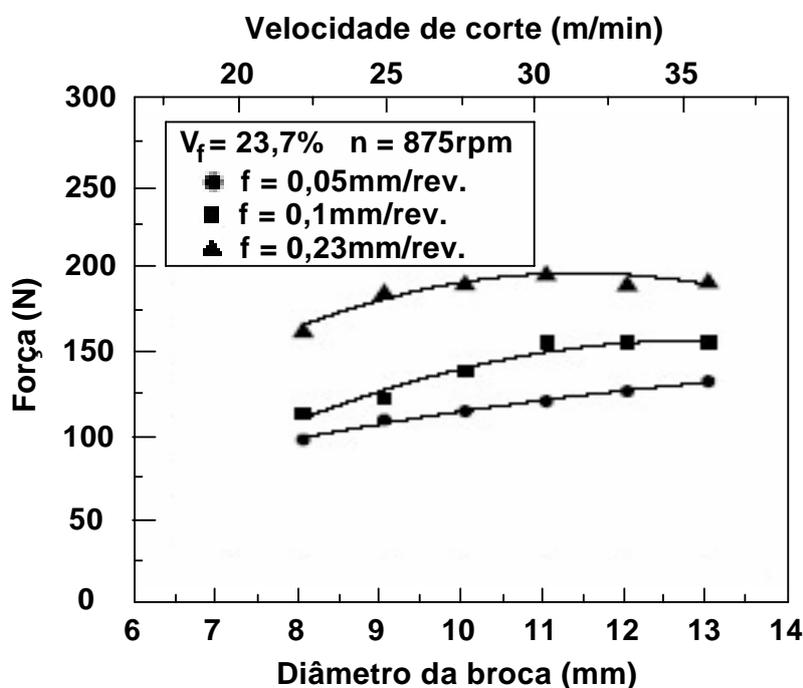


Figura 3.24 - Força de avanço em função diâmetro da broca. (El-Sonbaty et al 2004)

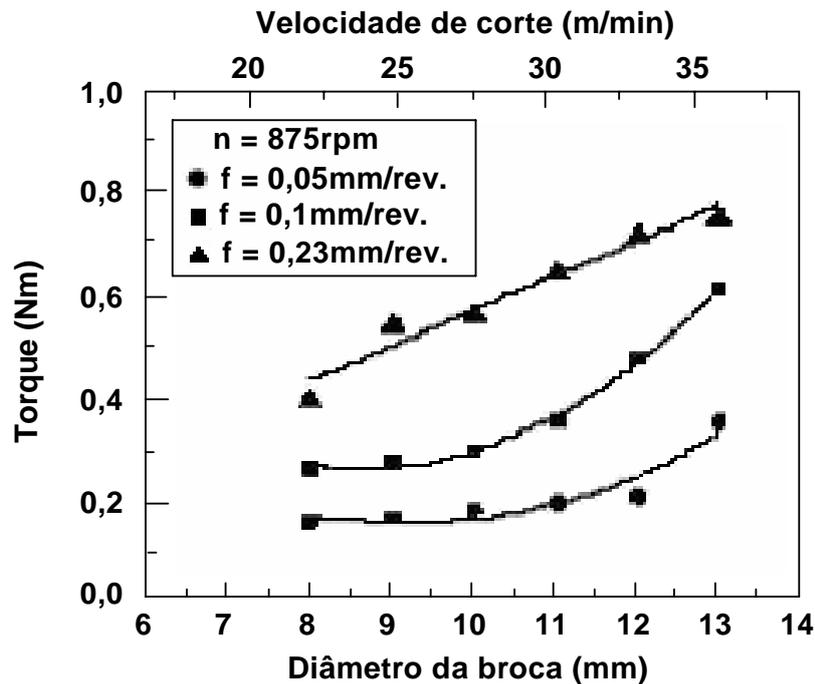


Figura 3.25 - Torque em função do diâmetro da broca. (El-Sonbaty et al 2004)

Procurando estabelecer uma relação entre velocidade de corte (v_c) e avanço (f) com a potência de corte (P_c) e a pressão específica de corte (k_s), Davim e Reis (2003b) fizeram um estudo experimental e estatístico da furação de PRFC. Para o planejamento experimental e a análise dos resultados, utilizaram, respectivamente, a técnica de Taguchi e a análise de variância (ANOVA). No experimento, utilizaram-se placas de compósito PRFC com 3mm de espessura e dois tipos de brocas com 5mm de diâmetro. A influência dos parâmetros de corte sobre a potência de corte, mostrada na figura 3.26, indica que a potência de corte aumenta de modo proporcional ao avanço e a velocidade de corte. O gráfico também mostra que a broca *Straight Shank* necessitou de menor potência em comparação com a broca *Brad & Spur*. A análise estatística indicou que o avanço foi o parâmetro que teve a maior influência sobre a potência de corte para as duas brocas.

A influência dos parâmetros de corte sobre a pressão específica de corte é mostrada na figura 3.27. Observa-se que a pressão específica de corte decresce para ambos os parâmetros de corte e que a broca *Straight Shank* apresenta menor k_s em comparação com a

broca *Brad & Spur*. A análise estatística aponta o avanço como parâmetro que teve a maior influência sobre pressão específica de corte para as duas brocas.

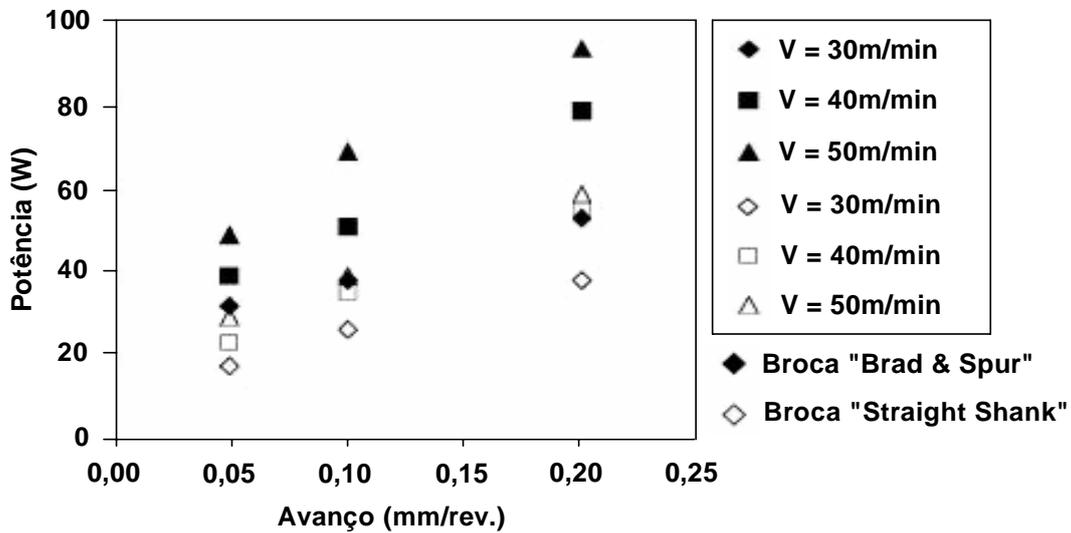


Figura 3.26 - Potência de corte em função do avanço e da velocidade de corte para as brocas *Straight Shank* e *Brad & Spur*, segundo Davim e Reis (2003b).

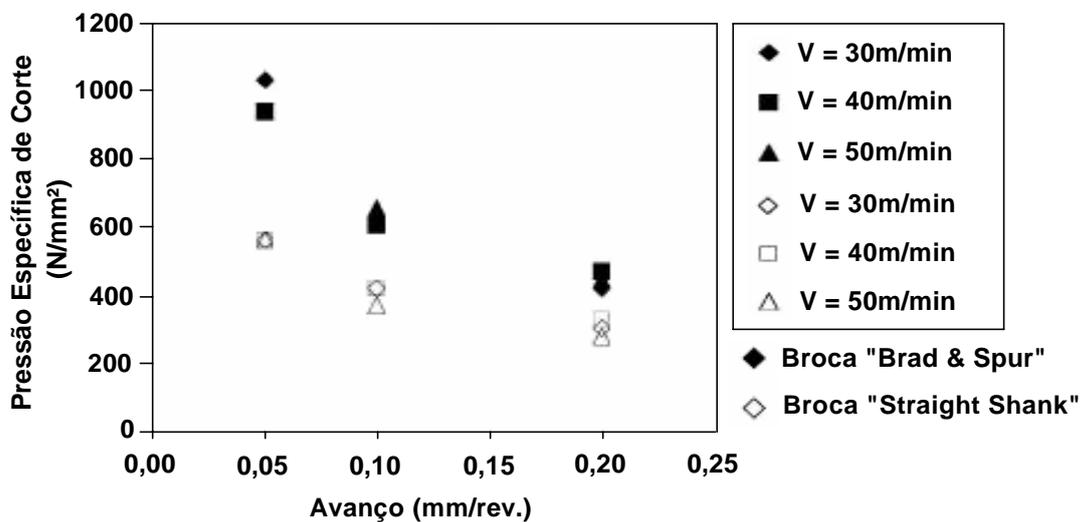


Figura 3.27 - Pressão específica de corte em função do avanço e da velocidade de corte para as brocas *Straight Shank* e *Brad & Spur*, conforme Davim e Reis (2003b).

Davim et al (2004c) investigaram a influência dos parâmetros de corte v_c e f sobre a força de usinagem F_u , fresando dois tipos de PRFV. Os tipos de compósitos utilizados para os experimentos são produzidos comercialmente (*VUP9731®* e *ATLAC382-05®*) com 65% de fibra de vidro e matriz de poliéster. A fresa empregada tem 3mm de diâmetro e é de metal duro da classe ISO K10. O método de Taguchi foi usado no planejamento experimental e na análise de variância para a avaliação dos resultados. A força de usinagem resultante foi calculada com a soma vetorial de F_x , F_y e F_z , medidas ortogonalmente. Os resultados mostraram que F_u cresce de forma diretamente proporcional a f e decresce proporcionalmente ao aumento de v_c para os dois materiais. A análise de variância mostrou que f foi a grandeza mais influente sobre F_u .

Bhatnagar et al (1995) fizeram algumas experiências fresando PRFC laminado com fibras orientadas em diversas direções. A direção das fibras θ pode ser vista no esquema da figura 3.28. Os ângulos das fibras variaram de 0° a 180° . Entretanto, os autores dividiram as amostras em dois grupos: 0° a 90° em $+\theta$ e 180° a 90° em $-\theta$.

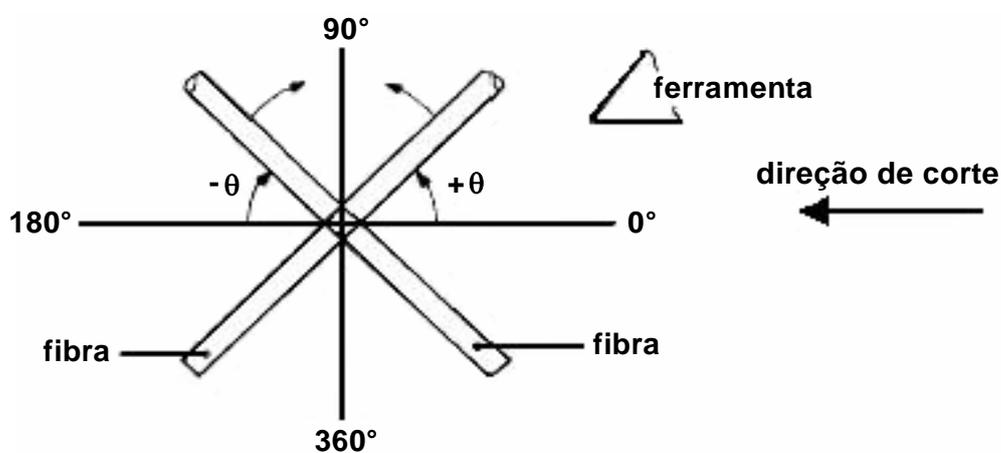


Figura 3.28 - Representação esquemática da orientação das fibras durante o corte ortogonal, mostrado por Bhatnagar et al (1995).

Esses autores mostraram que a orientação das fibras tem uma forte influência sobre a força tangencial (F_t), conforme mostra a figura 3.29. Nessa figura, pode-se observar que o valor da força (F_t) (para $\theta < 0$) é alto se comparado com seu equivalente positivo ($+\theta$). O mesmo pode ser dito da força (F_c), como mostra a figura 3.30. As figuras 3.29 e 3.30 também mostram que há um aumento do ângulo de saída (γ) de 12° para 18° .

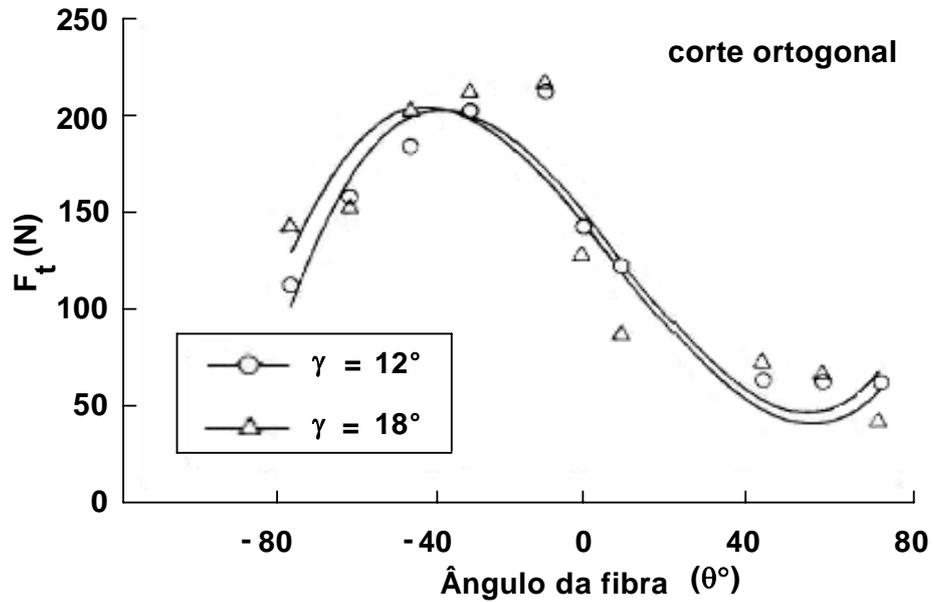


Figura 3.29 - Variação da força (F_t) em função de diferentes ângulos das fibras (θ) e ângulos de saída da ferramenta (γ), segundo Bhatnagar et al (1995).

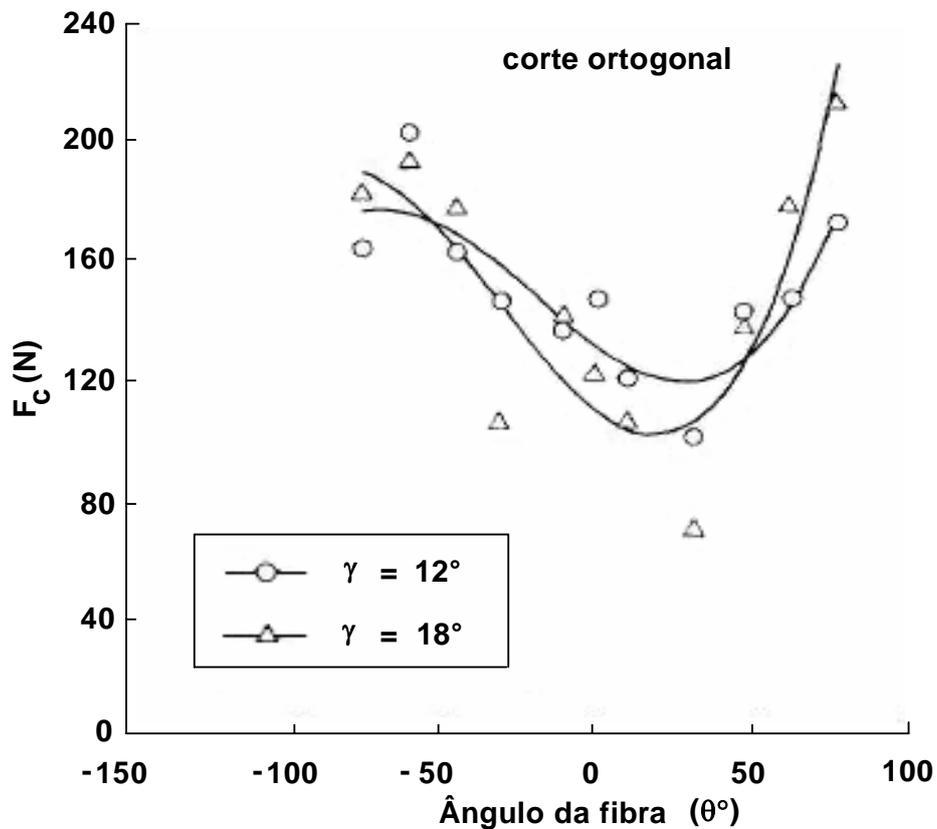


Figura 3.30 - Variação da força (F_c) em função de diferentes ângulos das fibras (θ) e ângulos de saída da ferramenta (γ), conforme Bhatnagar et al (1995).

3.6 Ferramentas de Corte

Desde os mais remotos tempos, o homem vem utilizando os mais variados materiais como ferramentas de corte. O desenvolvimento dos materiais para essa aplicação específica iniciou-se praticamente quando o homem conseguiu extrair o ferro de seu minério, seguido pelo aparecimento de técnicas de adição de elementos de liga ao aço e, mais recentemente, por inovações na área de concepção de novos materiais e em processos de fabricação para ferramentas de corte. Uma ferramenta de corte deve possuir as seguintes propriedades: resistência ao desgaste e boas propriedades mecânicas e térmicas, sob elevadas temperaturas; resistência ao choque térmico e impacto; alta dureza; e baixa afinidade química. A melhor ferramenta não é necessariamente a que apresenta maior vida, ou seja, a que apresenta melhor relação custo-benefício, e sim a que mantém certa confiabilidade durante todo o processo. Ezugwu e Wallbank apud Ávila (1999), afirmam que a ferramenta ideal de corte deve possuir a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço e a inércia química do óxido de alumínio. Não existe uma classificação geral de materiais para ferramentas. No entanto, a figura 3.31 mostra os principais grupos de materiais para ferramentas de corte.

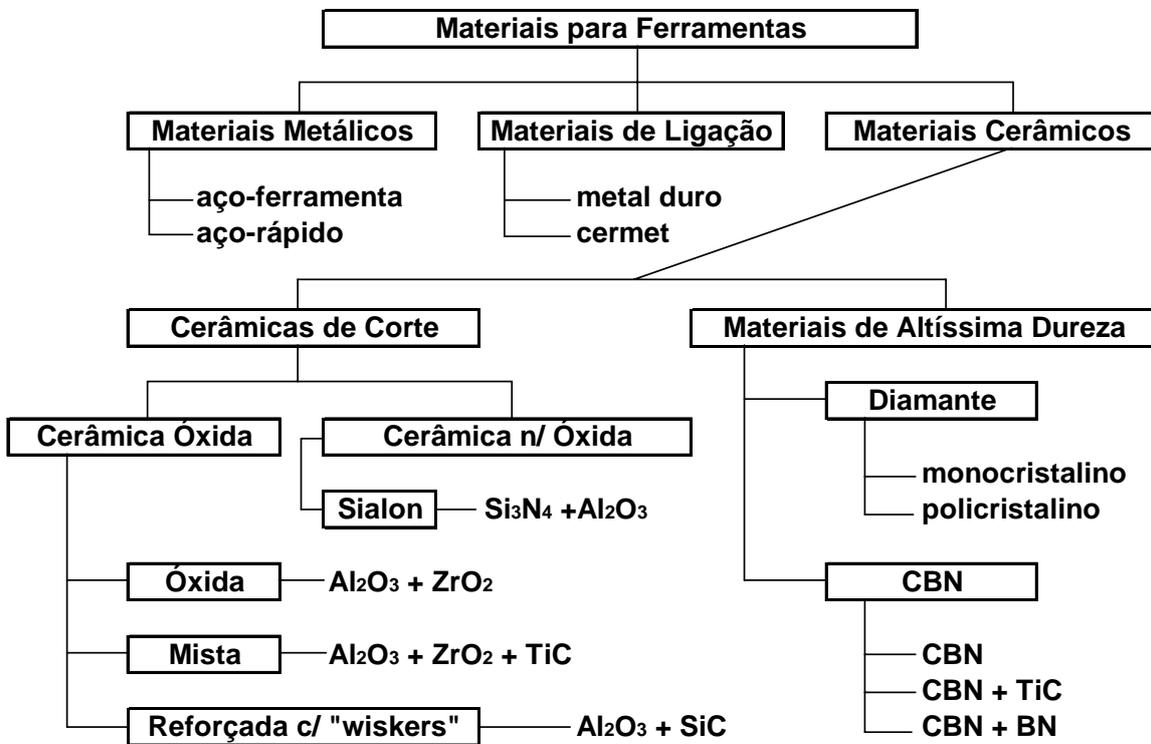


Figura 3.31 - Materiais para ferramentas de corte (Stoeterau apud Lanna, 2006).

A tabela 3.9 apresenta as propriedades mecânicas dos seguintes materiais: aço rápido, metal duro, alumina branca – $Al_2O_3 + ZrO_2$, alumina mista - $Al_2O_3 + TiC + ZrO_2$, alumina reforçada com *whisker* - $Al_2O_3 + SiC$, e alumina de nitreto de silício ou Sialon – $Si_3N_4 + Al_2O_3$, CBN e PCD para ferramentas de corte.

Tabela 3.9 - Propriedades dos materiais empregados em ferramentas de corte, conforme Abrão et al (1993).

Propriedades	Material	HSS	Metal Duro	Alumina				CBN	PCD
				Branca	Mista	SiC	Sialon		
Dureza a 25°C (HV)		850	1600	1700	1900	2000	1600	4000	8000 a 10000
Dureza a 1000°C (HV)		-	400	650	800	900	900	1800	-
Tenacidade a Fratura (MPa)		17	13	1,9	2	8	6	10	7,9
Condutividade Térmica (W/m°C)		37	85	8 a 10	12 a 18	32	23	100	560
Módulo de Young (kN/mm ²)		250	580	380	420	390	300	680	841
Coef. de Expansão Térmica (x10)		12	5,5	8,5	8	6,4	3,2	4,9	3,8

De forma geral, o aparecimento de novos materiais para ferramentas de corte seguiram o seguinte princípio: controle das propriedades mecânicas (principalmente dureza e tenacidade) e desenvolvimento de geometrias mais complexas que atendessem às necessidades dos processos de fabricação conforme Kim apud Ávila (1999). A figura 3.32 ilustra como os grupos de ferramentas se agrupam de acordo com a dureza e a tenacidade.

Segundo Gey (2006), independentemente dos desenvolvimentos dos materiais de corte, o revestimento das ferramentas oferece a possibilidade de se separarem as propriedades da camada superficial das propriedades do material de base e, assim, poder combinar-se livremente essas propriedades. Com isso, mecanismos de danos mecânicos, como fadiga de material, escoamento e deformação plástica, podem ser suprimidos com materiais de base otimizados. Já os mecanismos de danificação tribologicamente fundamentados, como aderência, abrasão e difusão, podem ser suprimidos com revestimentos superficiais adequados.

Portanto, o revestimento de ferramentas tornou-se um fator indispensável na moderna tecnologia de produção, onde o objetivo é a alta produtividade. Atualmente, podem ser observadas duas importantes tendências na tecnologia de usinagem: as altas velocidades de

corte e a usinagem a seco, as quais não podem ser adequadamente adotadas sem o emprego de revestimentos modernos ou sistemas de revestimentos: monocamadas ou multicamadas.

Em algumas áreas, essas tendências tornam-se até mesmo inviáveis sem o uso de revestimentos que, em muitos casos, proporcionam aumentos diferenciados e mesmo extremos da vida das ferramentas também na usinagem convencional. Esse fato ainda é decisivo para se difundir a utilização da tecnologia de revestimento em ferramentas de corte, conforme Abele e Dörr (2002).

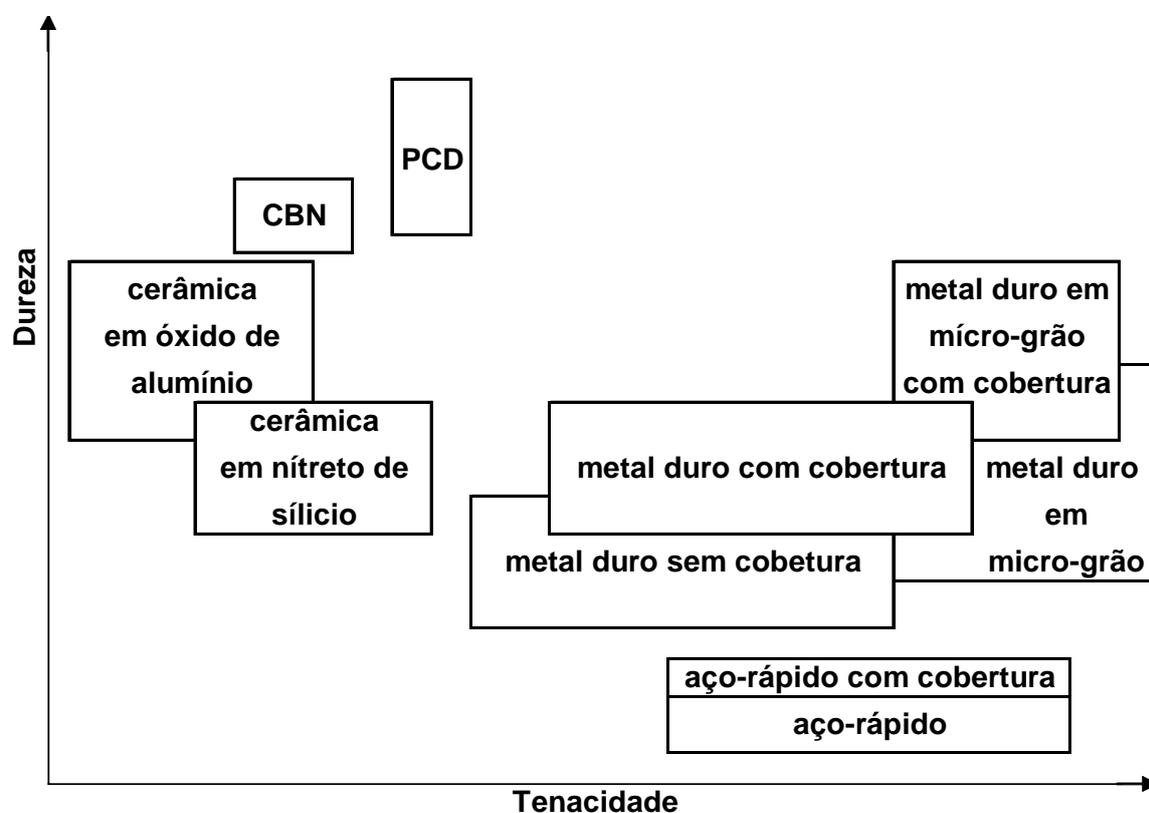


Figura 3.32 - Representação esquemática das propriedades dos materiais para ferramentas de corte, apresentado por WALTER (2002).

A figura 3.33 mostra características e propriedades do sistema conjugado (substrato-revestimento), que podem ser controladas para que a ferramenta possa ter um ótimo desempenho (Rickerby e Matthews apud Batista e Lima 1997).

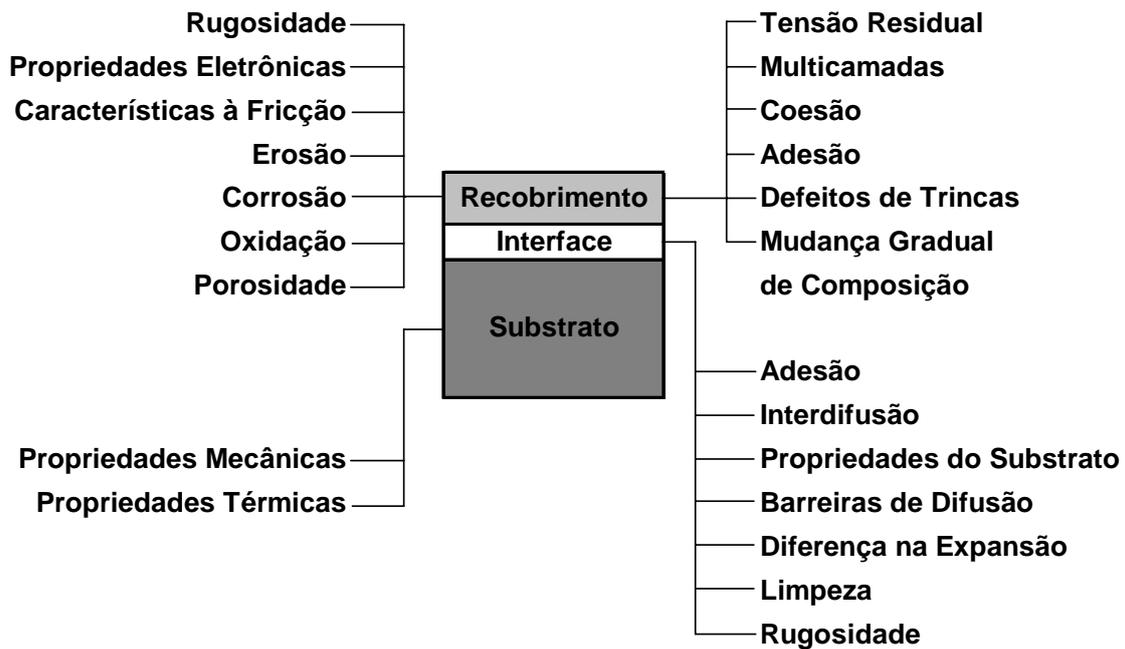


Figura 3.33 - Características e propriedades do sistema conjugado para recobrimento de ferramentas (Rickerby e Matthews apud Batista e Lima, 1997).

O recobrimento de superfícies é um processo complexo e exige técnicas especiais para a sua realização. A engenharia de superfície é a área que lida com projetos de sistemas conjugados (formados por substrato e recobrimento). A classificação dessas técnicas avançadas de engenharia de superfície é mostrada na figura 3.34.

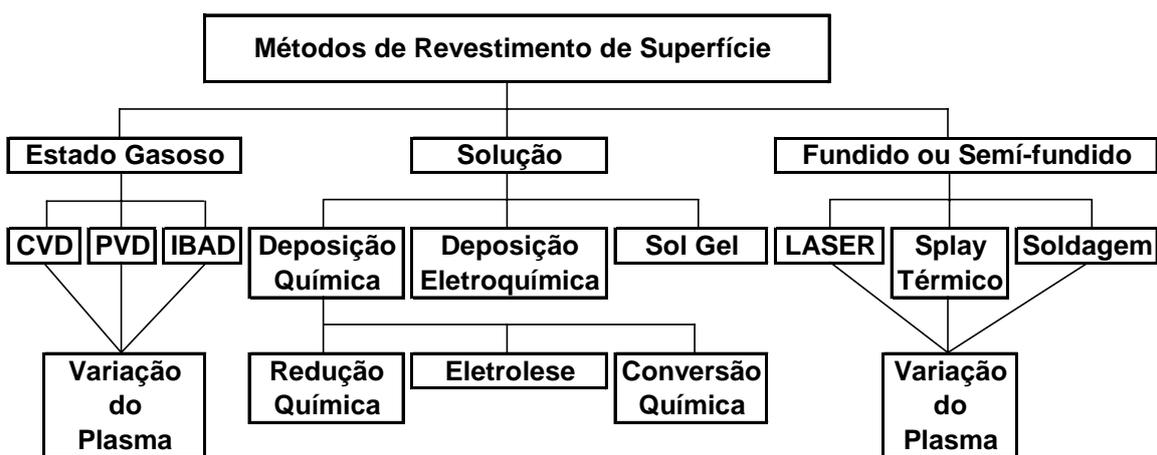


Figura 3.34 - Classificação das técnicas avançadas da engenharia de superfície, conforme Holmberg e Matthews (1994).

Tendo em vista que as ferramentas de aço rápido e de metal duro são as mais empregadas nas operações de furação de PRF, esses materiais serão tratados a seguir.

Para diversas ferramentas de usinagem, como brocas, machos, alargadores, brochas, geradoras de dentes de engrenagens e alguns tipos de fresas, a aplicação de materiais mais resistentes ao desgaste que o aço rápido, como metal duro ou materiais cerâmicos, é muito restrita devido à forma e dimensões dessas ferramentas e às condições das operações de usinagem que as empregam. Assim, o desenvolvimento dessas ferramentas tem caminhado no sentido da melhoria das condições do próprio aço rápido, por meio, principalmente, da aplicação de uma camada de cobertura de um material mais resistente ao desgaste, como o nitreto de titânio, e o carbonitreto de titânio e também do desenvolvimento de produtos que utilizam a metalurgia do pó. Essas camadas para coberturas de ferramentas possuem as seguintes características: alta dureza, elevada ductilidade, redução sensível do caldeamento a frio, baixo coeficiente de atrito, inércia química, espessura de 1 μ m a 4 μ m e ótima aparência física, conforme Diniz et al (2003).

A presença da camada de revestimento de TiN faz com que o corte aconteça com esforços menores em função do seu baixo coeficiente de atrito. Devido ao fato desta camada possuir alta dureza (tanto a frio quanto a quente) e devido também ao menor coeficiente de atrito, os desgastes são menores, principalmente o desgaste na superfície de folga da ferramenta. Existe uma menor tendência à formação da aresta postiça de corte, porque, como foi visto acima, uma das características dessa camada é a redução do caldeamento a frio. Nas mesmas condições de corte, então, a ferramenta revestida tem uma vida bem maior que a não revestida. Além disso, mesmo depois de reafiada, a ferramenta revestida ainda é ligeiramente mais eficiente do que uma não revestida, pois com a afiação a ferramenta perde a camada de revestimento somente em sua superfície de saída (ou de folga, dependendo da afiação), mantendo a camada na outra superfície, de acordo com Diniz et al (2003).

Outras coberturas também têm sido utilizadas sobre o aço rápido utilizando como processo de deposição o PVD, como o TiAlN (nitreto de titânio alumínio) e o TiAlCrN (nitreto de titânio alumínio cromo). Além dessas, em alguns casos também são utilizadas coberturas

de baixa dureza (sobre coberturas duras), que visam, principalmente, reduzir o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta. O tipo mais comum é a cobertura de MoS_2Ti , conforme Diniz et al (2003).

O objetivo do emprego de revestimentos nas ferramentas de corte de metal duro é, em primeiro lugar, aumentar a dureza em relação à dureza do substrato e, portanto, possibilitar uma redução do desgaste por abrasão. O objetivo adicional, com referência ao substrato, é a redução da tendência de aderência, o que resulta em redução do desgaste por aderência e do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, em forças e temperaturas de corte mais baixas. Os revestimentos que têm uma condutividade térmica reduzida podem atuar como isoladores térmicos e podem influenciar positivamente a distribuição da temperatura no substrato. Todas essas propriedades permitem aumentar a taxa de remoção de material ou elevar o tempo de vida da ferramenta, de acordo com Abele e Dörr (2002).

Segundo Abele e Dörr (2002), os materiais para revestimentos de ferramentas de corte podem ser subdivididos de acordo com suas propriedades: revestimentos duros e revestimentos para redução de atrito. Este último inclui tanto os conhecidos revestimentos de materiais de baixa dureza quanto os revestimentos endurecidos modificados. Os revestimentos duros típicos são a base de nitretos, especialmente os sistemas a base de titânio, a exemplo do revestimento de nitreto de titânio (TiN), do revestimento de nitreto de carbono titânio (TiCN) e do revestimento de nitreto de titânio alumínio (TiAlN). O revestimento de (TiAlN) é o mais recente, e atualmente, o mais eficiente dos materiais mencionados. A otimização dos teores dos elementos também está sendo estudada, além da adição de outros elementos, como carbono (TiAlCN) ou cromo e ítrio (TiAlCrYN). Esse revestimento de (TiAlCrYN) apresenta grande resistência à oxidação e tem fornecido resultados surpreendentes em testes, de acordo com Abele e Dörr (2002). A tabela 3.10 mostra algumas propriedades de revestimento para ferramentas de aço rápido e metal duro.

A influência do material e da geometria da ferramenta na usinagem de compósitos poliméricos reforçados com fibras (PRF) também vem sendo estudada por diversos pesquisadores, e alguns resultados serão mostrados a seguir.

Tabela 3.10 - Propriedades de revestimentos para ferramenta de corte Abele e Dörr
(2002)

Revestimento	Cor	Espessura (μm)	Dureza (HV)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Atrito com Aço (μm)	Transf. de Calor (W/mk)
TiN	dourado	1 a 5	2.200 a 2.700	450	0,4	70
TiCN	cinza-violeta	1 a 5	2.800 a 3.100	400	0,25 a 0,3	100
TiAlN	preto-violeta	1 a 5	3.000 a 3.500	800	0,3 a 0,4	50
Al ₂ O ₃	preto-violeta	4 a 6	3.000 a 3.500	850	-	25
Diamante	preto-cinza	3 a 6	8.000 a 10.000	600	0,05 a 0,1	2.000
Alpha C:H	preto-cinza	2 a 10	2.000 a 3.000	450	0,2	-
MoS ₂	verde-oliva-escuro	0,2 a 0,5	20 a 40	-	0,05 a 0,1	100
WC/C	cinza-escuro	1 a 4	1.000	300	<0,2	90

Um estudo sobre as características de corte do PRFV no torneamento foi feito por An et al (1997). Nesse trabalho, foram empregadas ferramentas com duas geometrias de pontas (*R* e *S*, figura 3.35), e três materiais: diamante policristalino (*PCD*), monocristal de diamante e nitreto cúbico de boro (*CBN*).

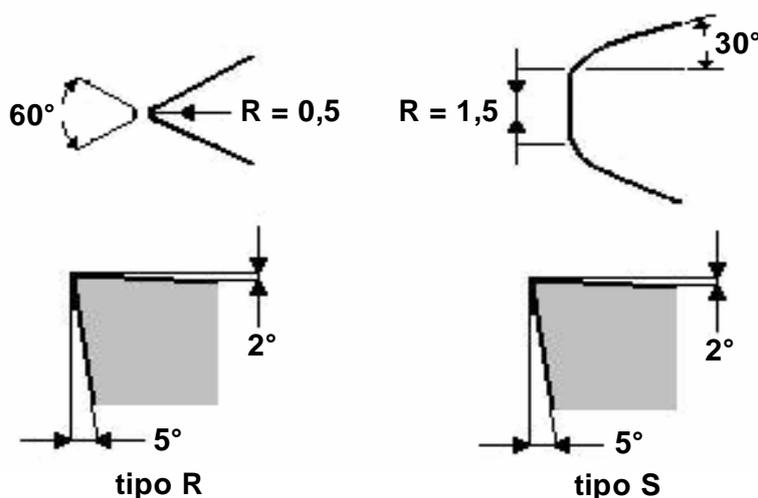


Figura 3.35 - Geometria de ponta da ferramenta, mostrada em An et al (1997).

Esses autores analisaram a influência do material e da geometria da ferramenta sobre a rugosidade da peça em função do avanço, da profundidade de corte e da velocidade de corte, como mostram as figuras 3.36, 3.37 e 3.38, respectivamente. As figuras mostram que a geometria da ferramenta afeta muito mais a rugosidade do que o material da ferramenta, sendo que melhores resultados são encontrados para a geometria (*S*). Entre os materiais, o diamante monocristalino apresentou valor mais baixo de (R_a), seguido pelo *PCD* e *CBN*. Por fim, (v_c) e (a_p) pouco afetaram (R_a), ao contrário de (f), que teve grande influência sobre (R_a).

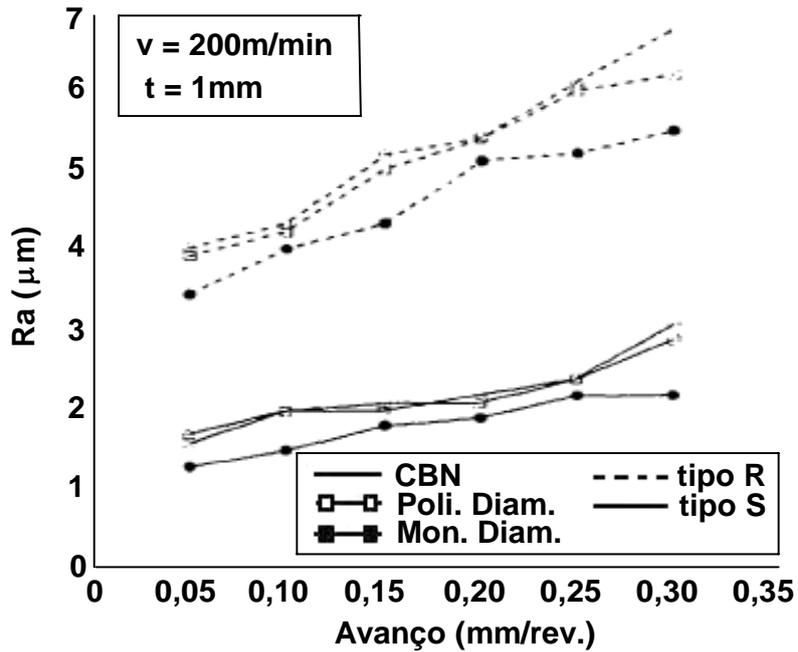


Figura 3.36 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função do avanço, conforme An et al (1997).

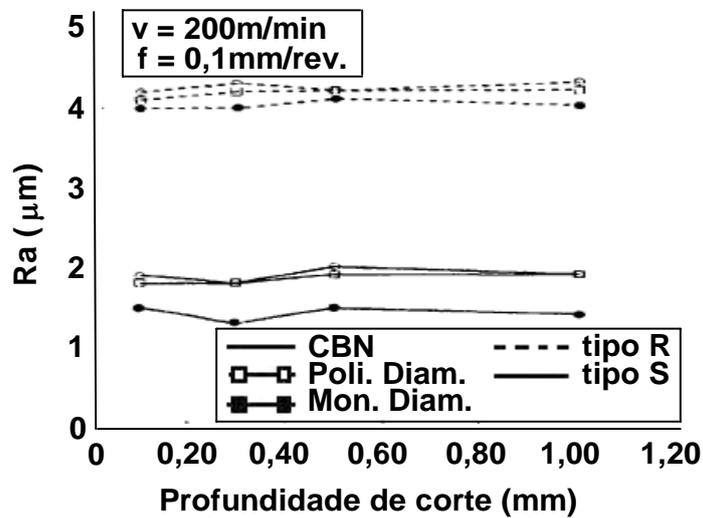


Figura 3.37 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função da profundidade de corte, conforme An et al (1997).

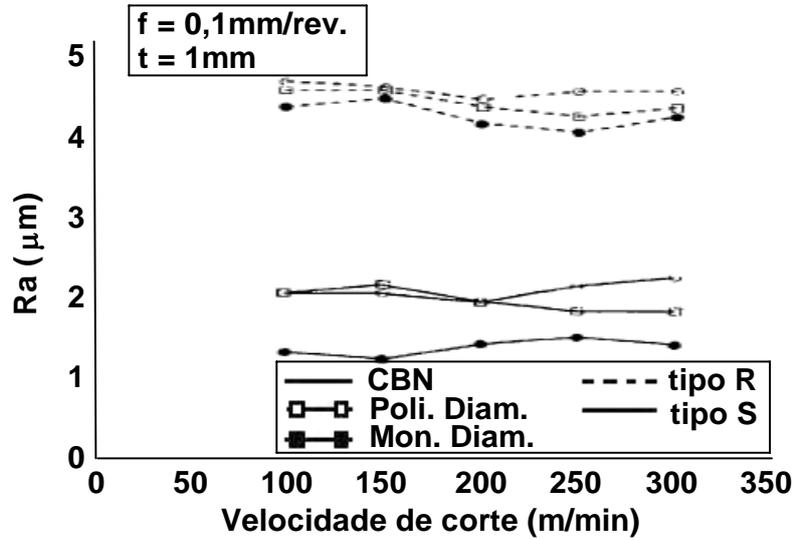


Figura 3.38 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a rugosidade em função da velocidade de corte, conforme An et al (1997).

Outra análise feita pelos autores foi a respeito da influência do material e da geometria da ferramenta sobre a força de corte em função do avanço, profundidade de corte e velocidade de corte; como mostrado nas figuras 3.39, 3.3.40 e 3.41, respectivamente.

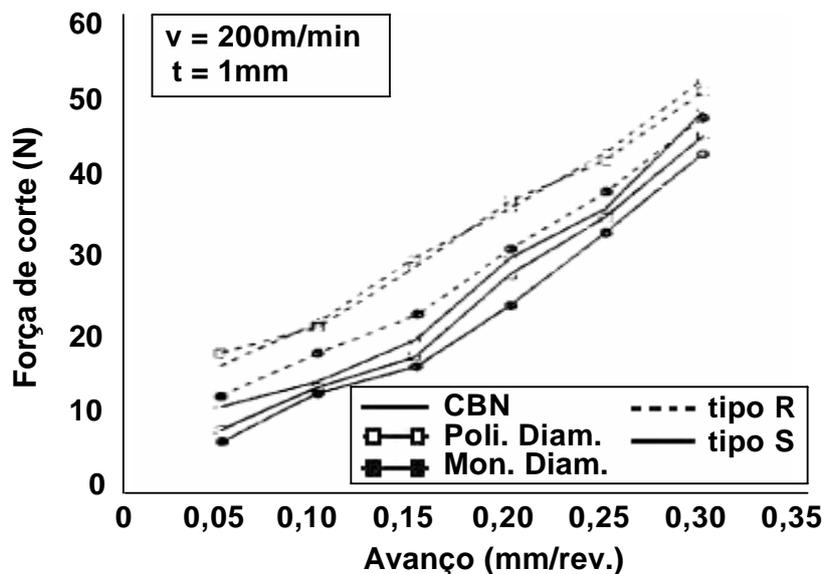


Figura 3.39 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função do avanço, de acordo com An et al (1997).

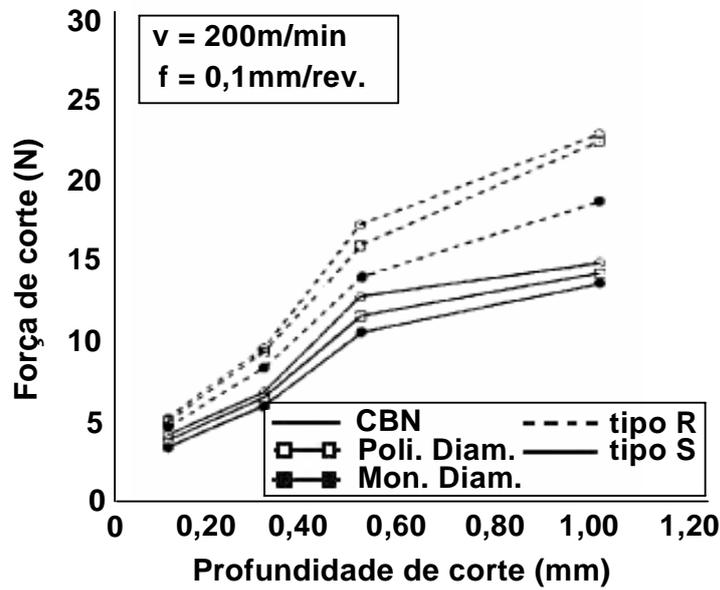


Figura 3.40 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função da profundidade de corte, de acordo com An et al (1997).

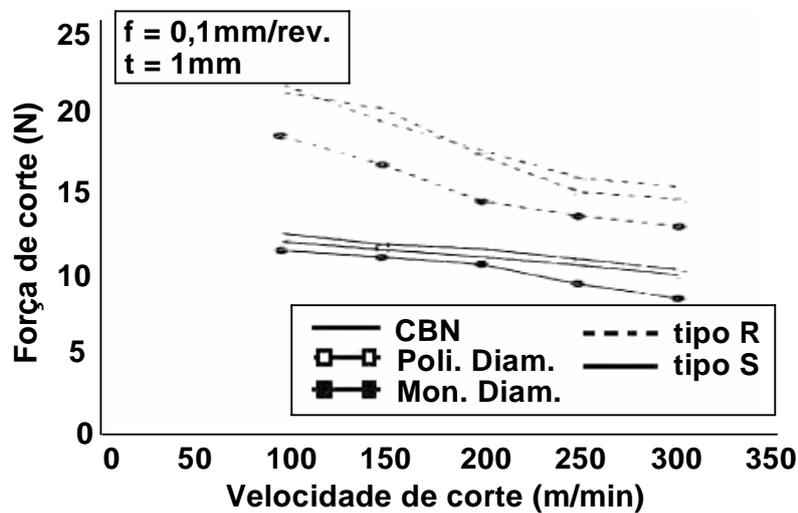


Figura 3.41 - Influência da geometria e do material da ferramenta sobre a força de corte em função da velocidade de corte, de acordo com An et al (1997).

As figuras 3.39 e 3.40 mostram que o material da ferramenta tem pouca influência sobre a força de corte. Já a figura 3.41 mostra que empregando-se a ferramenta de geometria (R),

têm-se forças de corte mais elevadas. Entre os materiais, o diamante monocristalino apresentou os melhores resultados para a força de corte, seguido de perto pelo *PCD* e *CBN*. Já os parâmetros de corte tiveram influência significativa sobre a força de corte, sendo que o aumento de (f) e (a_p) provocou um aumento no valor da força de corte, e o aumento de (v_c) provocou uma diminuição no valor da força de corte. Finalmente, os resultados mostram que a ferramenta de corte monocristal de diamante com geometria (S) foi a que apresentou os melhores resultados. Segundo os autores, isso ocorre devido à excelente afiação da aresta de corte e à boa condutividade térmica desses materiais.

O trabalho de Piquet et al (2000) investigou a influência da geometria da ferramenta sobre a qualidade do furo. Para isso os autores fizeram furos em um compósito PRFC com dois tipos de brocas, empregando as mesmas condições de corte. Uma representação esquemática da geometria das brocas convencional e específica é mostrada na figura 3.42. Pode-se ver a diferença na aresta principal de corte e na aresta lateral.

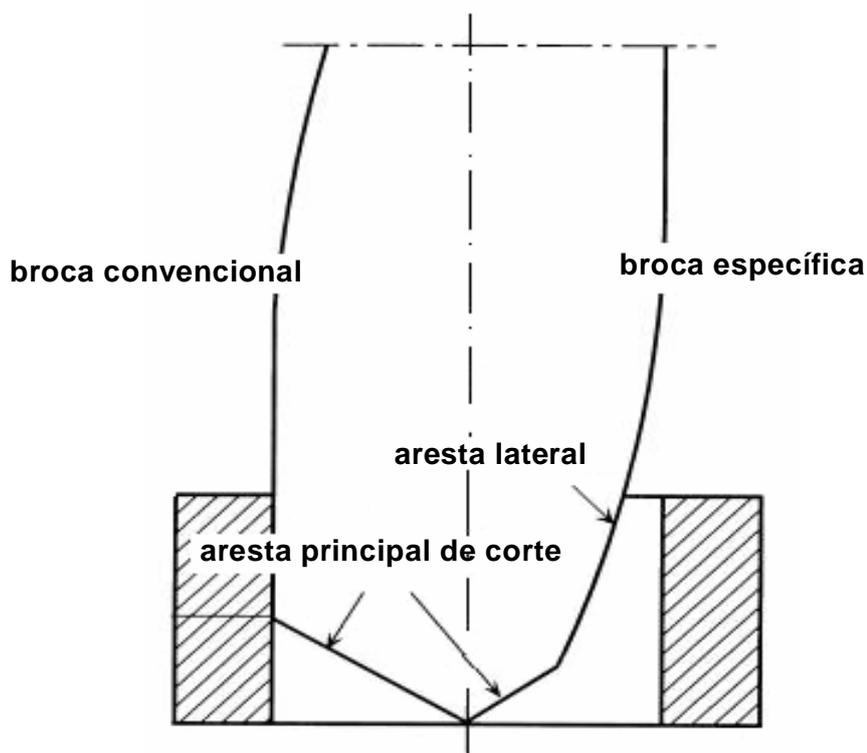


Figura 3.42 - Desenho esquemático das duas brocas, conforme Piquet et al (2000).

Os experimentos mostraram que a broca específica apresentou excelentes resultados (figura 3.43) e os autores concluíram que a aresta principal de corte tem muita influência na qualidade do furo. Segundo os mesmos autores, a aresta principal de corte da broca específica tem menor contato com a região de corte, diminuindo ou eliminando a delaminação.

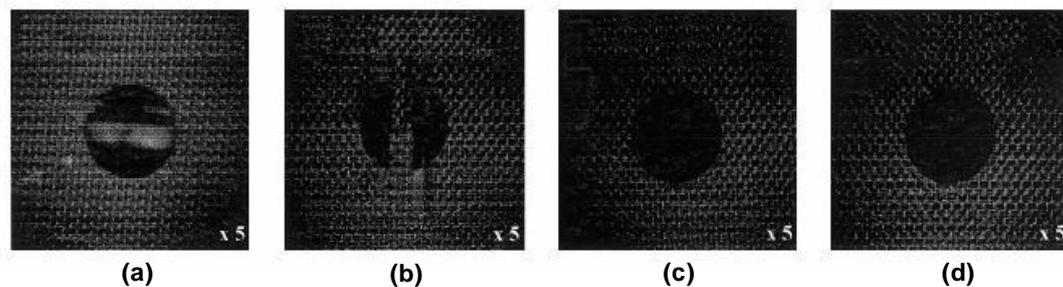


Figura 3.43 - Furos produzidos pelas duas brocas: (a) e (b) entrada e saída do furo feitos com a broca convencional, (c) e (d) entrada e saída do furo feitos com a broca específica, segundo Piquet et al (2000).

Com o objetivo de analisar a influência da ponta da broca sobre a delaminação de compósito, Tsao e Hocheng (2003a) elaboraram um modelo matemático demonstrando que a pré-furação diminui a delaminação e apresentaram um valor crítico para a força de avanço, pois o comprimento de contato da aresta de corte tem grande influência sobre a força de avanço e, conseqüentemente, sobre a delaminação. Tudo isso foi constatado em experimentos em placas de compósitos PRFC, com brocas de aço rápido com diâmetro de 10mm e ângulo de ponta de 118° . Na figura 3.44, estão demonstrados os efeitos da pré-furação sobre a força de avanço em função do avanço e os valores da força crítica para $\xi=0,20$ e $0,15$ ($\xi=2b/d$, onde $2b$ é o diâmetro da pré-furação, e d é o diâmetro da broca).

Mais tarde, Tsao e Hocheng (2004b) estabeleceram uma relação entre o avanço (f), a velocidade de corte (v_c) e o diâmetro da broca com o fator de delaminação (F_d) para um compósito PRFC. No experimento, utilizaram-se placas de resina epóxi com fibra de carbono com espessura de 5mm e três tipos de brocas, mostradas na figura 3.45. Os seguintes parâmetros de corte foram utilizados: avanços de 0,01mm/rev, 0,02mm/rev e 0,03mm/rev., rotação de 800rpm, 1000rpm e 1200rpm e diâmetros da broca de 6mm, 8mm e 10mm.

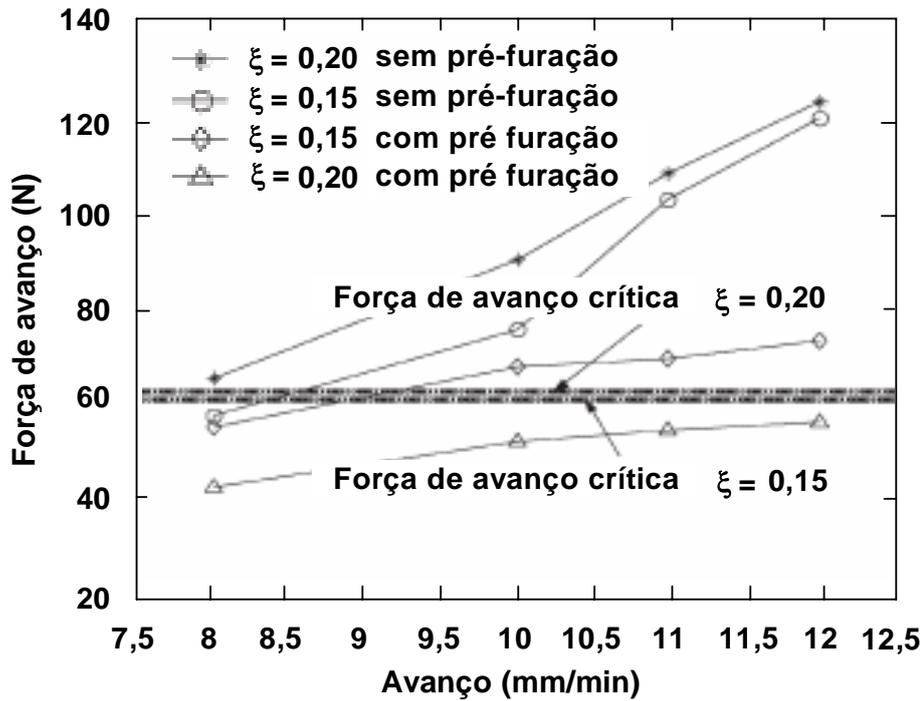


Figura 3.44 - Gráfico da força de avanço em função do avanço para placas sem e com pré-furação, de acordo com Tsao e Hocheng (2003a).

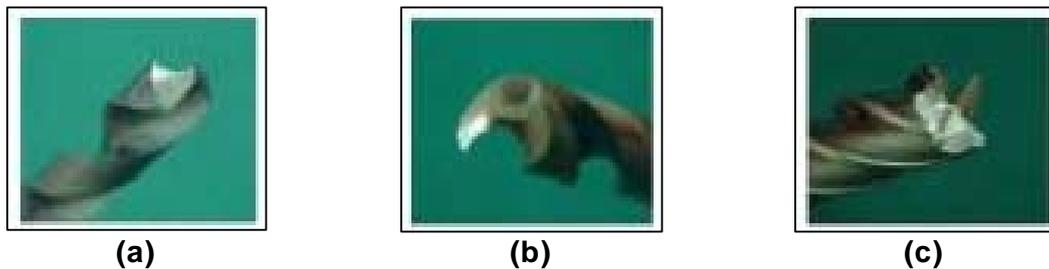


Figura 3.45 - Brocas empregadas nos testes: (a) helicoidal, (b) *Candle Stick* e (c) *Saw*, mostradas em Tsao e Hocheng (2004b).

Para medir a delaminação, os autores utilizaram uma montagem, conforme o esquema mostrado na figura 3.46, que gerou imagens iguais às mostradas na figura 3.47. Com essas imagens, eles mediram o diâmetro máximo (D_{max}) e o diâmetro nominal (D), e calcularam o fator de delaminação (F_d), através da expressão $F_d = D_{max}/D$.

Os resultados mostraram que o avanço e o diâmetro da broca tiveram a maior influência sobre o fator de delaminação (80,9% e 60,8%, respectivamente). As brocas *Candle Stick* e *Saw* causaram menores delaminação, se comparadas com a broca helicoidal. O que causou esta variação entre os resultados foi a diferença entre as arestas de corte das brocas. Os resultados, segundo os autores, corresponderam à experiência industrial. O teste de confirmação, utilizando-se o modelo de regressão linear múltipla, apresentou diferença de 8% entre os resultados, demonstrando que o método empregado para determinar o fator de delaminação é viável e eficaz.

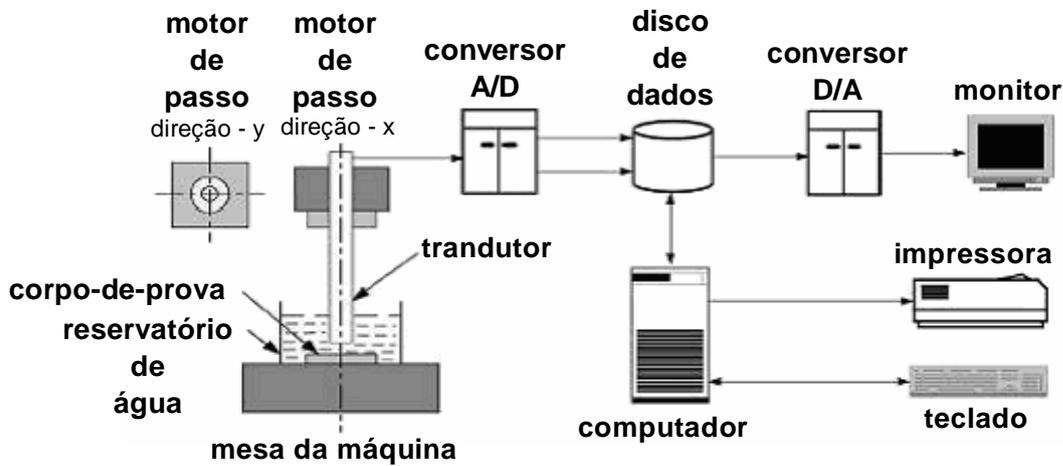


Figura 3.46 - Desenho esquemático do sistema empregado para gerar a imagem e medir a delaminação, apresentado por Tsao e Hocheng (2004b).

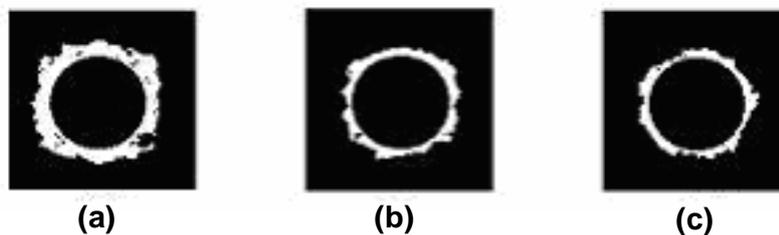


Figura 3.47 - Imagem gerada pela C-Scan Ultrasonic: para as broca (a) helicoidal, (b) *Candle Stick* e (c) *Saw*, mostradas em Tsao e Hocheng (2004b).

Ferreira et al (1999) tornearam polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), usando ferramentas de PCD. Estudaram a influência do avanço e da geometria da ferramenta (ângulo de saída) sobre a rugosidade (R_a). Os resultados indicam que ferramentas com ângulo de saída positivo apresentaram rugosidades mais baixas, pois têm menor fragilidade e apresentam menor quebra da ponta. Também foi possível observar a influência do avanço sobre a rugosidade da superfície: conforme esperado, quanto maior o avanço, maior a rugosidade. Os autores afirmaram ainda que para todas as ferramentas, a rugosidade média aritmética (R_a) variou linearmente com o comprimento de corte. Isso foi atribuído ao mecanismo de desgaste provocado pela abrasividade do compósito.

3.7 Desgaste e Vida da Ferramenta de Corte

Conhecer os possíveis mecanismos de desgaste e avaria sofrido pela ferramenta de corte que porventura possa vir a ocorrer durante o processo de usinagem é de fundamental importância para o estabelecimento de critérios que poderão, se não eliminá-los por definitivo, amenizar as conseqüências geradas por suas ocorrências, como por exemplo, aumento do tempo improdutivo e necessidade de maior número de arestas. Tais conseqüências aumentariam muito o custo final do produto.

As formas de desgastes podem ser agrupadas da seguinte maneira: desgaste frontal e desgaste de cratera; e as formas de avaria podem ser agrupadas em: quebra da ferramenta, lascamento, trinca de origem mecânica, trinca de origem térmica e deformações plásticas. A figura 3.48 mostra de forma esquemática essas formas de desgastes e avaria.

Essas formas de desgaste e avaria servem como um bom indicativo da necessidade de reafiação ou mesmo a substituição da ferramenta de corte, buscando atingir o acabamento superficial e intervalos de tolerância preestabelecidos. Altas taxas de desgaste e/ou avaria associadas a condições de vibração, choque térmico e/ou mecânicos podem culminar na fratura súbita da ferramenta de corte ou falha catastrófica, de acordo com Ávila (1999).

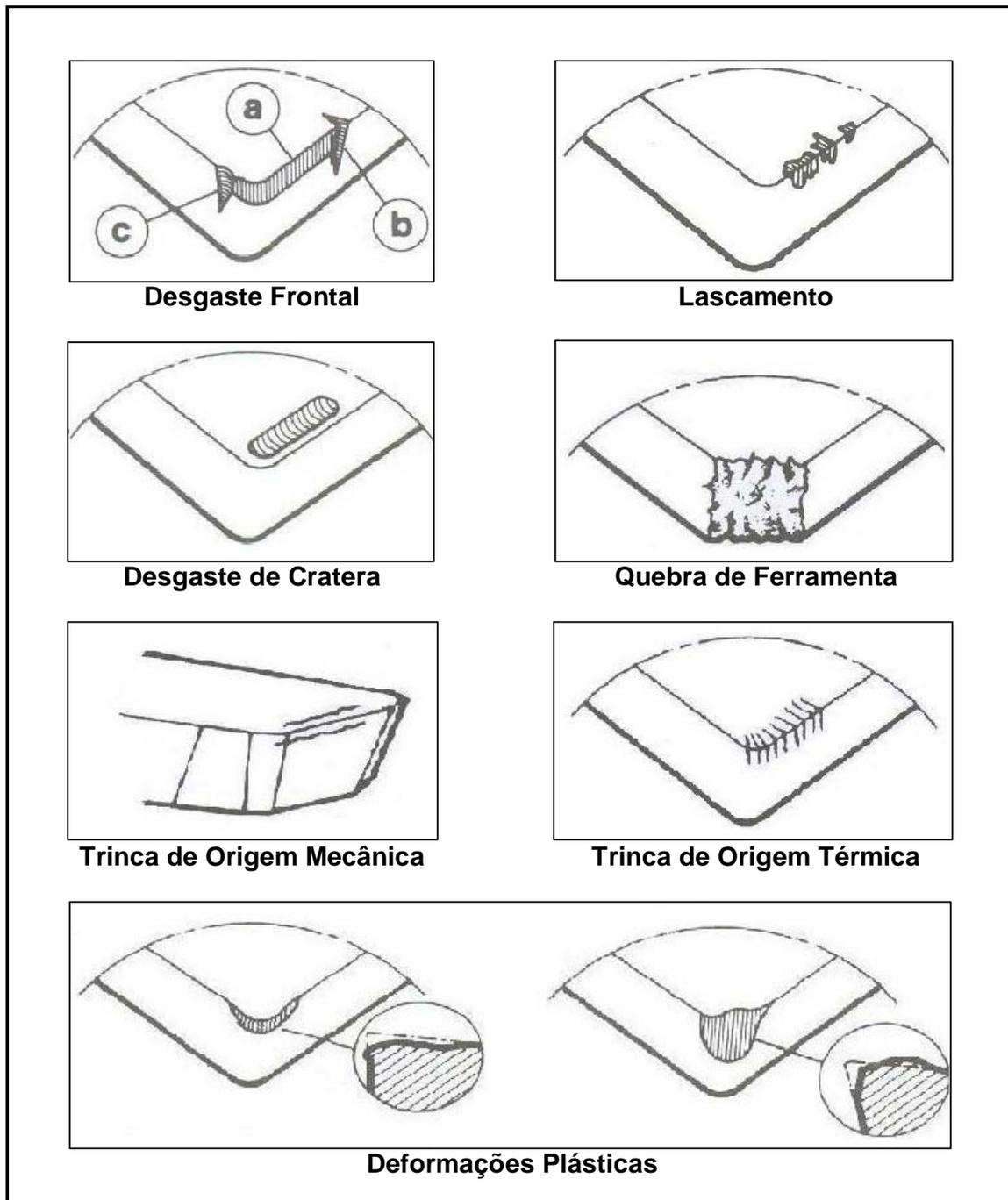


Figura 3.48 - Representação esquemática das formas de desgastes ocorridos em ferramentas de corte, mostrada em Diniz (2003).

Embora não exista uma definição padronizada na literatura classificando os mecanismos pelos quais as formas de desgaste se desenvolvem, as mais citadas podem ser agrupadas da seguinte maneira, conforme Trent (1984): cisalhamento plástico a altas temperaturas, deformação sob tensão, compressão, difusão, aderência e arrastamento, abrasão e desgaste de entalhe.

Todos esses mecanismos (processos) de desgaste são observados na prática, mas certamente, um prevalecerá sobre os demais, dependendo principalmente do material da peça e da ferramenta, da operação de usinagem, das condições de corte, da geometria da ferramenta de corte e do emprego do fluido de corte. Em geral, os três primeiros mecanismos (processos) são mais importantes a altas taxas de remoção de material, onde há o desenvolvimento de altas temperaturas. Os três últimos são mais importantes a baixas velocidades, onde as temperaturas de corte são baixas o suficiente para prevenir a ocorrência dos três primeiros. A figura 3.49 representa a influência da temperatura sobre os mecanismos de desgastes, de acordo com Kopac et al, (2001).

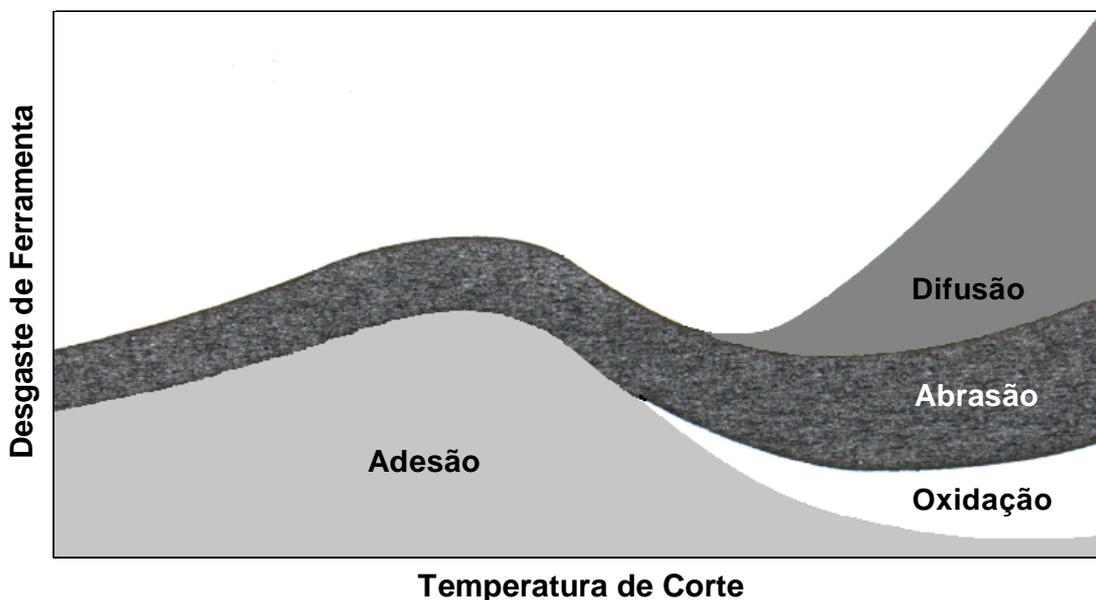


Figura 3.49 - Representação esquemática do mecanismo de desgaste da ferramenta de corte em função da temperatura de corte, conforme Kopac et al (2001).

A análise dos mecanismos de desgaste é complexa, mas o procedimento mais indicado é, em primeiro lugar, considerar o material da ferramenta, o material da peça e as condições de corte em que se realizou a operação. Esses pontos sugerem ou eliminam a possibilidade de predominância de um ou outro mecanismo de desgaste. Uma vez conhecidos os mecanismos de desgaste predominantes, várias decisões podem ser tomadas no sentido de viabilizar condições mais resistentes ao desenvolvimento do desgaste, conforme Machado e Silva (1993).

Ferreira e Cupini (1993) analisaram o comportamento de ferramentas de diversos materiais no torneamento de compósitos. Durante os ensaios, foram observadas variações nos desgastes de flanco das ferramentas em função do comprimento de corte. O compósito utilizado apresentou as seguintes características: tecido híbrido com 70% de fibras de carbono e 30% de fibras de vidro e resina fenólica com 35% a 40% em massa. As ferramentas utilizadas foram: metal duro classe ISO K10, cerâmica branca ($Al_2O_3+ZrO_2$), cerâmica mista (Al_2O_3+TiC), cerâmica reforçada com *whiskers* (Al_2O_3+SiC), SIALON ($Al_2O_3+Si_3N_4$), CBN e PCD. Os corpos-de-prova foram barras com tecidos bobinados e laminados, como mostram as figuras 3.50 (a) e (b), respectivamente.

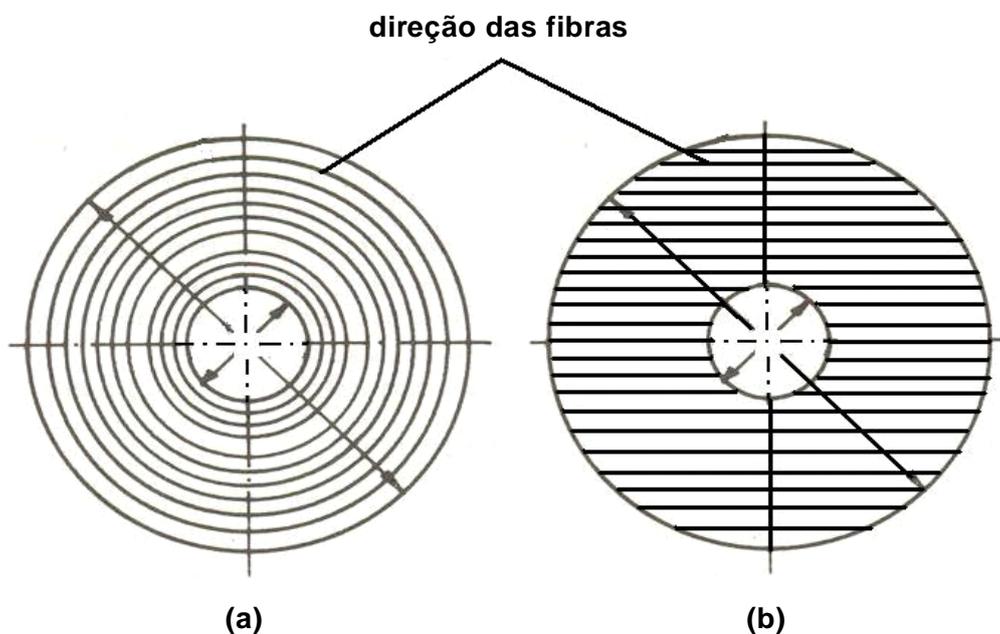


Figura 3.50 - Corpos-de-prova de materiais compósitos: (a) bobinado e (b) laminado, representados em Ferreira e Cupini (1993).

A figura 3.51 mostra a evolução do desgaste das ferramentas em função do comprimento de corte usinado no torneamento do compósito de tecido bobinado. As ferramentas cerâmicas e de metal duro apresentaram um fraco desempenho em comparação com o *PCD* e *CBN*.

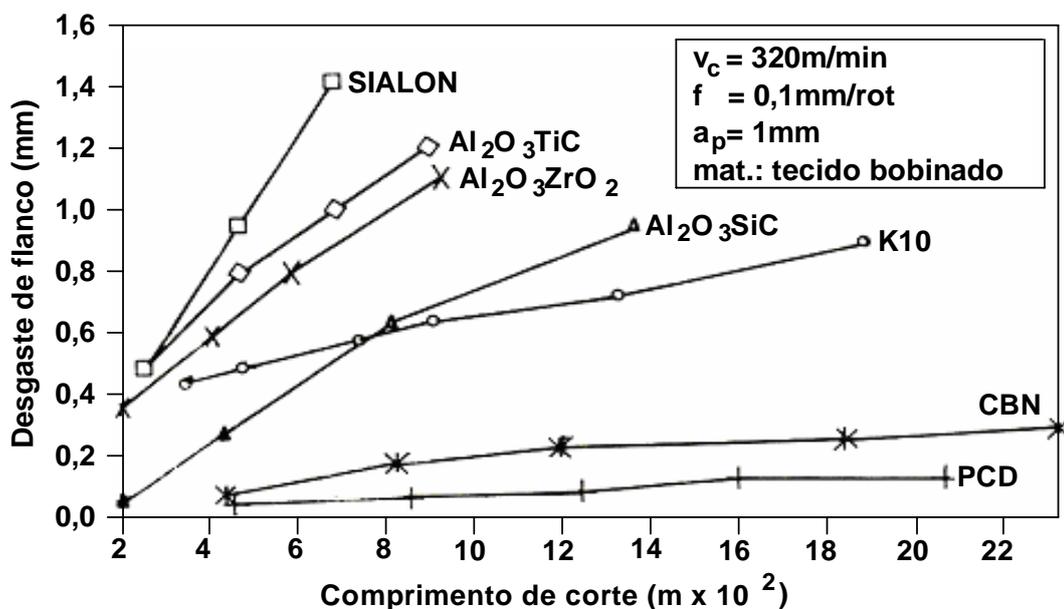


Figura 3.51 - Desgastes de flanco *versus* comprimento de corte, empregando-se diversos materiais para ferramenta de corte, conforme Ferreira e Cupini (1993).

O mecanismo de desgaste provável nesse caso foi a abrasão, pois não foi observada nenhuma quebra ou avaria da ferramenta, segundo os autores. O melhor desempenho entre as ferramentas cerâmicas foi proporcionado pela alumina reforçada com *whiskers* de *SiC*, mas de acordo com os autores, o elevado custo da ferramenta comparado ao metal duro não justifica seu emprego.

A variação da força de avanço com o comprimento de corte também foi analisada. Para alguns materiais de ferramenta, como as cerâmicas, o crescimento da força foi acentuado. Para o *PCD* e o *CBN*, a força de avanço permaneceu quase constante. Os autores justificam o fato pela intensidade de desgaste sofrido pelas ferramentas de metal duro e de cerâmica.

Para finalizar, os autores observaram a influência da disposição das fibras do material compósito sobre o desgaste da ferramenta. O comportamento do desgaste das ferramentas

é comparado entre o torneamento do compósito do tecido bobinado e do tecido laminado. A ferramenta de metal duro se desgasta mais rapidamente no corte do compósito de tecido laminado em comparação com o tecido bobinado. A maior abrasividade do tecido laminado deve-se à variação da orientação das fibras em relação à direção de corte no torneamento, onde se tem a cada instante uma nova posição da fibra em relação à ferramenta, de acordo com Ferreira e Cupini (1993).

Sreejth et al (2000) tornearam um PRFC com ferramenta de PCD, com o objetivo de encontrar a temperatura crítica. Nesse estudo, observaram que a faixa de temperatura crítica indicada para a ferramenta, sem danificá-la, é de 300° a 350°C. Baseados na temperatura e na pressão específica de corte os autores sugeriram que a velocidade de corte, crítica fosse de 300m/min, e a dureza da ferramenta de 3800HV a 4000HV para aumentar a vida da ferramenta. Por fim, os autores analisaram o desgaste da ferramenta, e concluíram que este desgaste está associado à abrasão e à fadiga, sendo que o desgaste por abrasão ocorre devido à abrasividade da fibra de carbono, e a fadiga, devido ao carregamento dinâmico. Esse carregamento dinâmico é provocado pela diferença de dureza e resistência entre a fibra e a matriz e a tensão elástica do material usinado, juntamente com a variação de temperatura.

Outros resultados de vida de ferramentas são apresentados por Rahman et al (1999). Esses resultados foram obtidos torneando-se PRFC e utilizando-se pastilhas de nitreto cúbico de boro (*CBN*), cerâmicas e carboneto de tungstênio (metal duro), com uma velocidade de corte de 150m/min. Os resultados indicam que a pastilha de *CBN* obteve o melhor desempenho quando comparada às pastilhas de cerâmica e metal duro, que apresentaram acentuado desgaste por abrasão. A cerâmica também mostrou-se muito sensível ao choque, sofrendo lascamento da aresta de corte, segundo os autores.

Caprino et al (1996) estudaram o efeito do desgaste da ferramenta sobre a força de corte, usinando PRFV e empregando ferramenta de aço rápido com ângulo de saída ($\alpha=0^\circ$) e ângulos de folga ($\gamma=7^\circ$ e $\gamma=15^\circ$). Os autores concluíram que o desgaste de face e flanco evolui na mesma proporção e independe do ângulo de folga.

Procurando analisar o desgaste de ferramentas de materiais diversos, Ferreira et al (1999) tornaram polímeros reforçados com fibras de carbono PRFC. Na figura 3.52, é mostrado como o desgaste de flanco varia em função do comprimento de corte. Para todas as ferramentas, exceto o *PCD*, foi observada uma alta taxa de desgaste. O *CBN* e a cerâmica de alumina branca apresentaram um melhor comportamento quando comparados com as demais cerâmicas e metais duros. Além disso, para algumas cerâmicas e metais duros, o aumento da força de avanço foi extraordinário. Para o *PCD*, a força de avanço permaneceu praticamente inalterada. Assim, a variação da força de avanço pode ser explicada pelo aumento do desgaste de flanco em função do comprimento de corte e da ausência de desgaste de cratera.

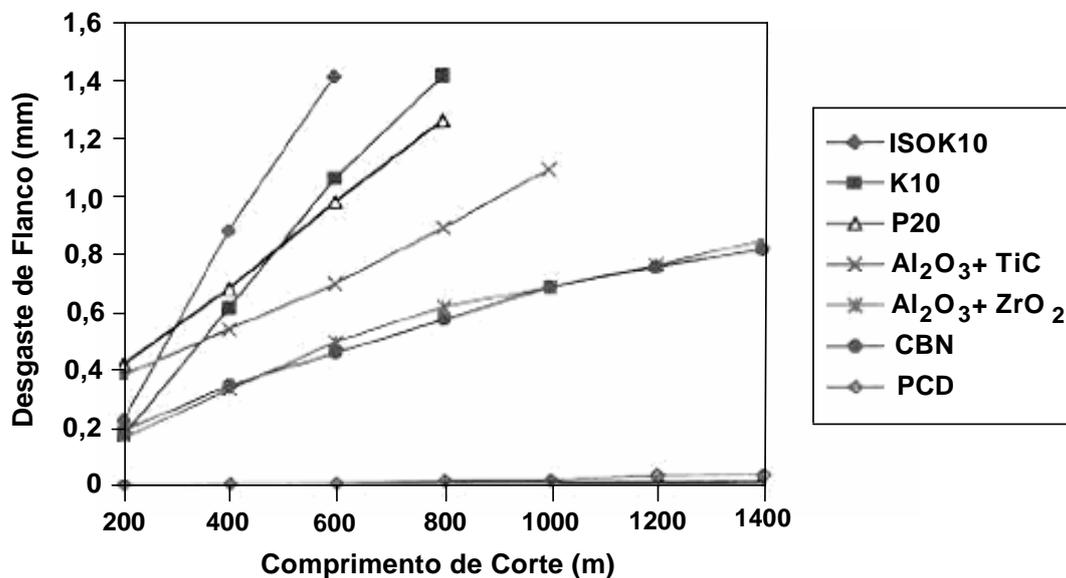


Figura 3.52 - Desgaste de flanco em função do comprimento de corte, e da ferramenta de corte, para vários materiais, conforme (Ferreira et al, 1999).

O polimento da superfície de folga e a ausência de desgaste de cratera são mostrados na figura 3.53, indicando que o mecanismo de desgaste ativo é baseado principalmente na alta abrasividade do compósito *PRFC*.

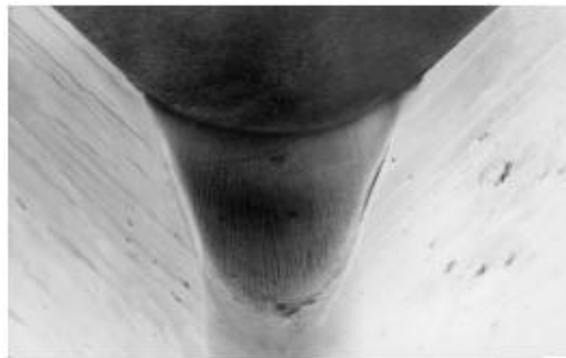


Figura 3.53 - Desgaste de franco sem desgaste de cratera: ferramenta K10, $v_c=310\text{m/min}$, $f=0,12\text{mm/rev}$, $a_p=1\text{mm}$, mostrado em Ferreira et al (1999).

3.8 Qualidade Superficial de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)

As tolerâncias geométricas tratam basicamente dos procedimentos para determinação dos desvios de formas e tolerâncias dimensionais de elementos sólidos. Para isso, deve-se considerar o comportamento metrológico do sistema de medição e a condição do objeto a medir. Deve-se ter em mente que na fabricação de uma peça não se consegue obter a forma geométrica perfeita. Quanto mais sofisticado o processo de fabricação, menor será o valor da tolerância de fabricação estipulada para a geometria em questão. Desse modo, para garantir que os desvios de fabricação não prejudiquem a montagem e o funcionamento perfeito dos componentes de um conjunto, o controle geométrico passa a ser necessário e deve ser realizado através de especificações de tolerâncias geométricas, segundo Cavaco (2002).

Os erros geométricos permissíveis para as peças são previamente indicados, aplicando-se as tolerâncias geométricas, que são os limites dentro dos quais as dimensões e os desvios podem variar sem que haja comprometimento do funcionamento e intercambiabilidade das peças. A figura 3.54 mostra em forma de organograma, a tolerância geométrica seguida dos desvios de forma e da tolerância dimensional.

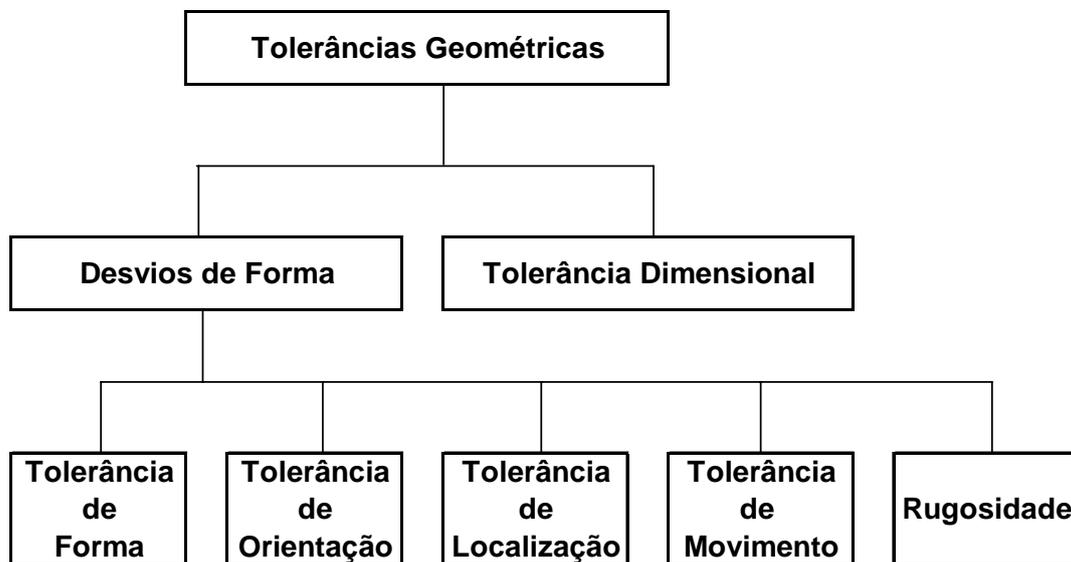


Figura 3.54 - Diagrama das tolerâncias geométricas, mostrado em Cavaco (2002).

Os desvios de forma podem ser classificados em erros macrogeométricos e microgeométricos. Os desvios macrogeométricos são conhecidos como tolerâncias de forma, de orientação, de localização e de movimento, e os desvios microgeométricos são conhecidos como rugosidade. O Anexo I apresenta a tabela I.1 com os símbolos dos desvios de forma para os erros macrogeométricos e a tabela I.2 com a rugosidade média (R_a) para os diversos processos de usinagem.

Os erros microgeométricos, designados por rugosidade, são caracterizados por um conjunto de irregularidades, formadas por pequenas saliências e reentrâncias, que desempenham um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, pois influem na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na possibilidade de ajuste do acoplamento forçado, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e na aparência. Portanto, a especificação e a medição de rugosidade e ondulação (textura superficial) em componentes usinados têm desempenhado um papel cada vez mais relevante dentro do contexto da fabricação mecânica. A contínua diminuição no limite da tolerância dimensional, as

maiores exigências funcionais e a expectativa de aumentar o tempo de utilização do componente mecânico têm levado os projetistas a aplicarem com maior intensidade os conceitos e normas associados à tecnologia de superfícies. A consequência imediata disso é uma demanda crescente do entendimento e do uso dos procedimentos de medição da textura e da integridade superficiais, conforme Boehs et al (1998).

O sistema de avaliação do estado da superfície e o comprimento da amostra são controlados pela norma NBR 6405/1988, que também define os seguintes termos: superfície geométrica, superfície real, superfície efetiva, perfil geométrico, perfil real, perfil efetivo e perfil de rugosidade. Para medir o acabamento dessas superfícies, é necessário que se adotem critérios que possibilitem avaliar as rugosidades. Para isso, foram criados e normalizados parâmetros que pudessem determinar qualitativamente e quantitativamente uma superfície. A tabela 3.11 apresenta esses parâmetros e faz uma descrição de como são definidos e o que cada um representa na determinação da qualidade da superfície.

Tabela 3.11 - Parâmetros de Rugosidade, Mummery (1990).

Parâmetros	Descrição
Ra (rugosidade média aritmética)	média aritmética dos desvios do perfil a partir da linha média
Rz (rugosidade média)	média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Z)*
R3z (rugosidade média do terceiro pico e vale)	média aritmética dos valores de rugosidade parcial do 3º pico e vale
Ry (rugosidade máxima)	maior valor da rugosidade parcial (Z)*
Rt (altura máxima de rugosidade)	altura máxima de um pico a um vale
Rq (rugosidade quadrática média)	raiz quadrada da média dos quadrados da rugosidade parcial (Z)*
Rpm (rugosidade média aritmética de picos)	média aritmética dos valores dos picos
Rvm (rugosidade média aritmética de vales)	média aritmética dos valores dos vales

*(Z) soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média.

A tolerância dimensional tem uma influência direta sobre o desenvolvimento da tecnologia de fabricação e vem obtendo avanços consideráveis no decorrer das últimas décadas. Um estudo cronológico sobre esses avanços, realizado por Taniguchi (1983), é reproduzido no diagrama da figura 3.55, sob a classificação geral dos processos de usinagem convencional, de precisão, de ultra-precisão e de alta-ultra-precisão. Esse diagrama permite observar que a denominação para usinagem de ultra-precisão no início do século XX (1920) correspondia a uma tolerância da ordem de $10\mu\text{m}$, e que por volta de 1980 já havia alcançado a ordem de $0,005\mu\text{m}$ ou 5nm de precisão. Por meio de extrapolação da curva, a tolerância de fabricação nos próximos anos tende a alcançar níveis atômicos de precisão, segundo Porto et al (2005).

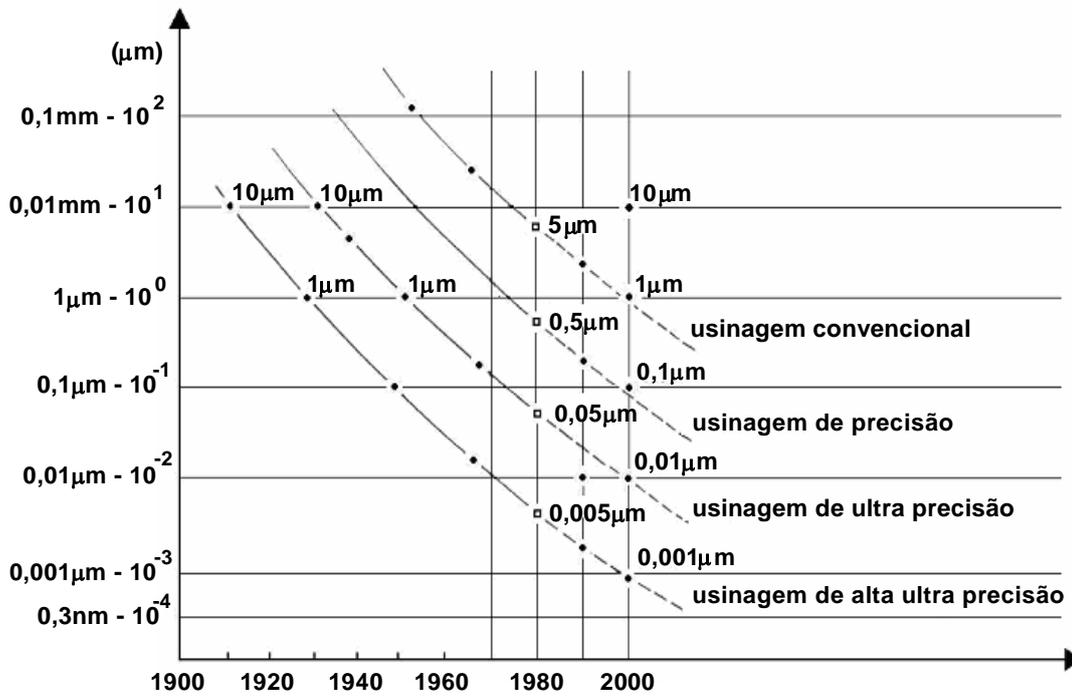


Figura 3.55 - Evolução da precisão dimensional atingida pelo processo de usinagem no decorrer do tempo, conforme Taniguchi (1983).

3.8.1 Rugosidade de PRF

Ogawa et al (1997) fizeram furos em placas de circuito impressos de PRFV com brocas de metal duro com diâmetro de 1,0mm. Nesse experimento, os autores procuraram relacionar a influência das forças F_S e F_D sobre a rugosidade na parede do furo e concluíram que as forças têm grande influência sobre a rugosidade devido ao grande contato da aresta de corte da broca. Tentando minimizar esse efeito, os autores realizaram pré-furação com diâmetros de 0,2mm, 0,4mm e 0,8mm, respectivamente. Com esses pré-furos, as rugosidades máximas (R_{max}) apresentaram uma grande redução, mostrada nas figuras 3.56 (a) e (b). Essa redução foi acentuada para pré-furos de até 0,4mm e permaneceu constante para os valores de 0,6mm e 0,8mm. Outro parâmetro que teve forte influência sobre a rugosidade foi o avanço, segundo os autores. Com a elevação do avanço de $5\mu\text{m}/\text{rev}$ para $50\mu\text{m}/\text{rev}$., o valor de R_{max} aumentou de $10\mu\text{m}$ para $30\mu\text{m}$.

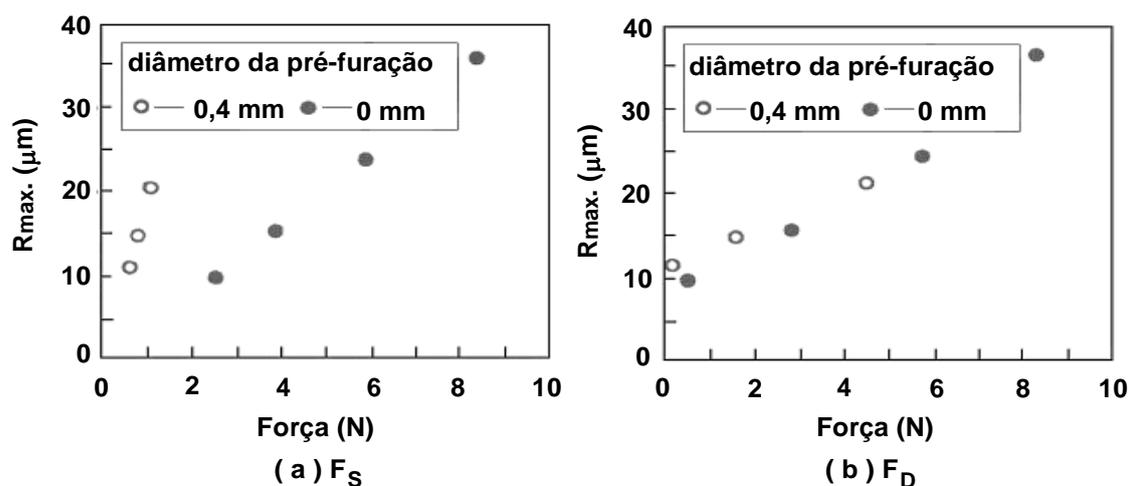


Figura 3.56 - Variação de R_{max} em função das forças: (a) F_S e (b) F_D , respectivamente, conforme Ogawa et al (1997).

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre os parâmetros de corte (v_c e f) e a rugosidade (R_a), Davim et al (2004a) efetuaram furos em um PRFV utilizando dois tipos de brocas: *Stub Length* e *Brad & Spur*. Os resultados são apresentados na figura 3.57, onde se nota que a rugosidade tem uma variação crescente em função do avanço (f) e decaiu em função do aumento da velocidade de corte (v_c).

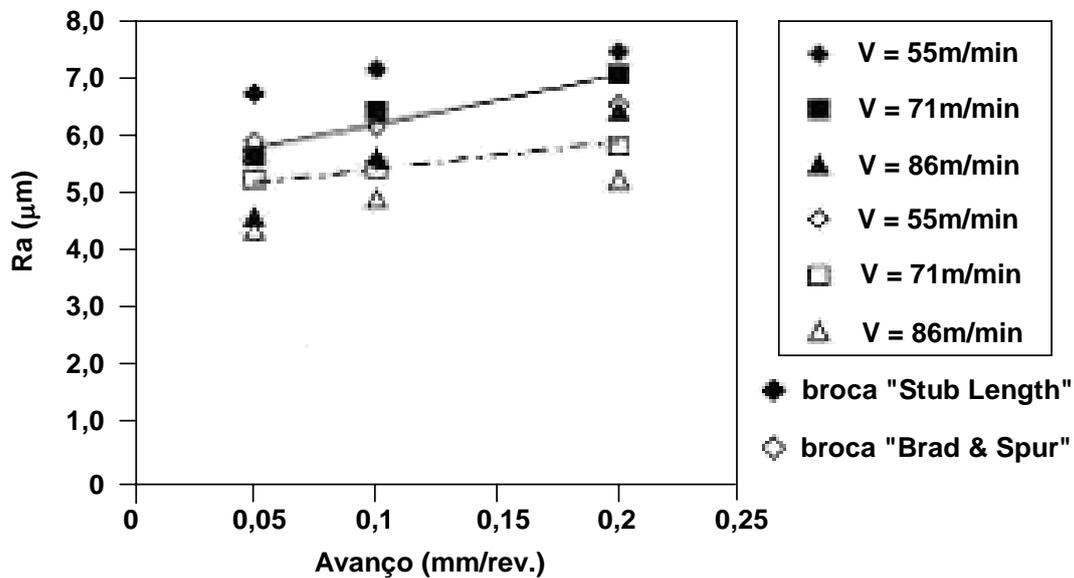


Figura 3.57 - Influência da velocidade de corte (v_c) e avanço (f) sobre a rugosidade (R_a), segundo Davim et al (2004a).

Davim e Reis (2004d) investigaram a influência dos parâmetros de corte v_c e f sobre a rugosidade de PRFC, durante o fresamento. O compósito utilizado no experimento foi o de resina epóxi com 55% de fibra de carbono, orientação $0^\circ/90^\circ$ e 4mm de espessura. As fresas empregadas foram de metal duro classe K10 com 2 e 6 canais, como mostram as figuras 3.58 (a) e (b), respectivamente. Os resultados indicaram que R_a cresce em função do aumento de f e decresce em função do aumento de v_c , o que possibilita a obtenção de superfícies de boa qualidade empregando-se altos valores de velocidades de corte e baixos valores de avanço.



Figura 3.58 - Fresas de metal duro classe K10 empregadas nos experimentos: (a) fresa de dois canais e (b) fresa de seis canais, mostradas em Davim e Reis (2004d).

Ferreira e Cupini (1993) analisaram a rugosidade em função do comprimento de corte após o torneamento de um compósito de tecido híbrido com 70% de fibras de carbono e 30% de fibras de vidro e com 35% a 40% em massa de resina fenólica, para diversos materiais para ferramentas (PCD, CBN, cerâmicas e metal duro). A figura 3.59 mostra a rugosidade (R_a) da peça em função do comprimento de corte usinado para todas as ferramentas testadas.

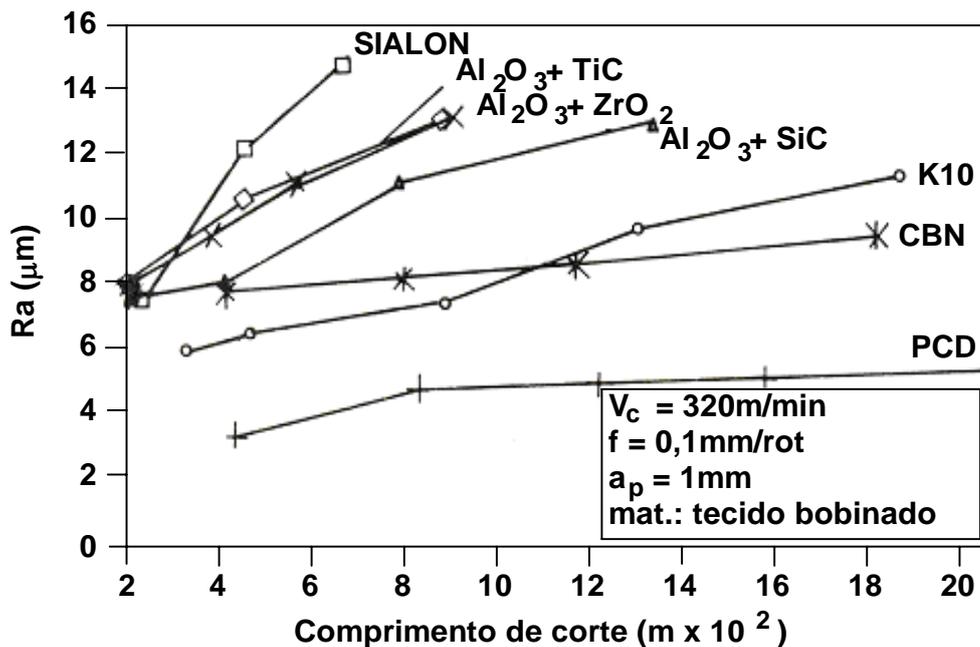


Figura 3.59 - Rugosidade em função do comprimento de corte, para ferramentas de materiais diferentes, conforme Ferreira e Cupini (1993).

A rugosidade aumentou nas peças usinadas com ferramentas cerâmicas devido às elevadas taxas de desgastes ocorridas nesses materiais, enquanto que nas peças usinadas com ferramentas de metal duro, CBN e PCD, a rugosidade apresentou menor taxa de crescimento. A ferramenta que assegurou o melhor acabamento foi o PCD (menor desgaste). Segundo os autores, isso acontece devido às delaminações das fibras e aos sulcos formados pela presença de resina no material compósito, sendo que esses sulcos e delaminações aumentam de intensidade com o crescimento do desgaste da ferramenta. Portanto, quanto mais resistente ao desgaste for a ferramenta melhor será seu comportamento em relação ao acabamento da peça.

Eriksen (1999) estudou a influência do avanço, da velocidade de corte, do raio de ponta da ferramenta e da orientação das fibras sobre a rugosidade após o torneamento de um compósito polimérico com fibras de vidro curtas. O autor observou que a rugosidade cresce em função do aumento do avanço acima de 0,1mm/rev., diminui para raios de pontas maiores e não sofre alteração com o aumento da velocidade de corte e com a orientação das fibras. Essa orientação pode ser perpendicular ou paralela à direção de corte. O autor afirma ainda que a teoria e experiência de usinabilidade de outros materiais não podem ser aplicadas diretamente aos PRF.

3.8.2 Delaminação

De acordo com Lachaud et al (2001), podem-se dividir os defeitos causados pela operação de furação em: danos na entrada do furo, defeitos de circularidade, danos causados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo. Os defeitos na entrada do furo não aparecem em todas as ocasiões. São relatados em materiais com certas características de fibras, devido à orientação unidirecional das malhas e também à geometria da broca. Esse defeito tende a rasgar a primeira malha na primeira linha em contato com a broca. Os defeitos de circularidade estão ligados ao ângulo formado pela direção das fibras da malha e pela direção da borda de corte. Dependendo da angulação da borda de corte, e antes do corte propriamente dito, as fibras estão sujeitas às forças alternadas de torção/compressão, deixando uma forma elíptica no furo. O menor eixo da elipse é menor que o diâmetro da broca e coincide com a direção das fibras da malha. Os danos causados pela temperatura são, em geral, provenientes do atrito entre as fibras e as duas menores bordas de corte da broca. Esse atrito pode causar danos na parede do furo, aumentando assim a probabilidade de fibras se rasgarem devido à ação mecânica das menores bordas de corte. A delaminação na saída do furo é provocada pelo fato de que nem todo corpo da broca corta o material. A pressão da broca pode causar tensão normal que provavelmente abre a interface da malha. A delaminação entre malhas propaga-se além do diâmetro do furo e o avanço da broca pode variar a dimensão do furo.

Aoyoma et al (2001) demonstram em seu trabalho que a espessura dos feixes de fibras, a posição do centro da broca e o ângulo que a aresta de corte faz com os feixes de fibras que reforçam o material compósito têm influência sobre a rugosidade da parede do furo e nos danos causados na borda do furo, como apresentado na figura 3.60. Para estudar o acabamento dos furos em função do ângulo da aresta de corte e da posição do centro da broca em relação ao feixe de fibras que reforçam o compósito, os autores dividiram o material em quatro áreas: (A), (B), (C) e (D), em destaque na figura 3.60. A região (A) corresponde à quebra das fibras longitudinal e transversa. A região (B) corresponde ao centro da fibra longitudinal e à quebra da fibra transversal. A região (C) corresponde ao centro da fibra transversal e à quebra da fibra longitudinal, e a região (D) corresponde ao centro da fibra longitudinal e transversal. Segundo os autores, essa análise só pode ser feita se a broca tiver um diâmetro menor que o diâmetro do feixe de fibras e se as áreas (A), (B), (C) e (D) se sobrepuseram, para mais de uma camada de feixes de fibras, o que é muito difícil de ocorrer.

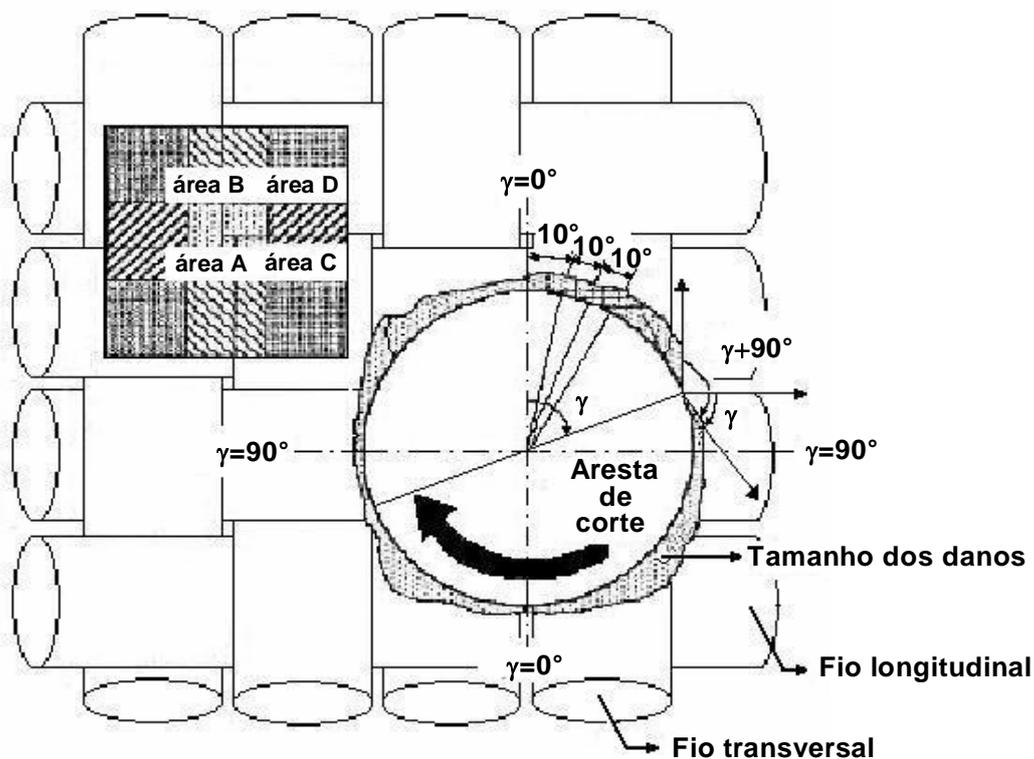


Figura 3.60 - Representação esquemática da definição do ângulo da aresta de corte (γ), direção das fibras e das áreas (A), (B), (C) e (D), conforme Aoyoma et al (2001).

Os materiais e parâmetros empregados por Aoyoma et al (2001) para os experimentos foram: placas de PRFV com 1,6mm de espessura, broca com 1,0mm de diâmetro, $v_c=15,7\text{m/min}$ e $f=5\mu\text{m/rev}$ e $f=63\mu\text{m/rev}$. Os autores concluíram que a rugosidade na parede do furo é crescente em função do aumento da espessura do feixe de fibras para um mesmo ângulo de incidência da aresta de corte. Também descobriram que a localização dos danos, na borda dos furos, varia com a posição do centro da broca. As micrografias apresentadas nas figuras 3.61 (a) e (b), respectivamente, mostram que os danos das áreas (A) e (D), representados pela parte mais escura, localizam se em posições diferentes.

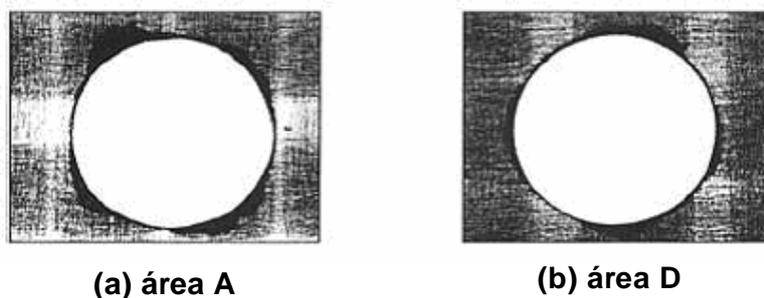


Figura 3.61 - Micrografia (a) com os danos causados na área A e micrografia (b) com os danos causados na área D, de acordo com Aoyoma et al (2001).

Através do estudo realizado por Capello (2004), analisou-se o mecanismo de delaminação em placas de PRFV. Para a operação de furação com e sem suporte de apoio, conforme figura 3.62.

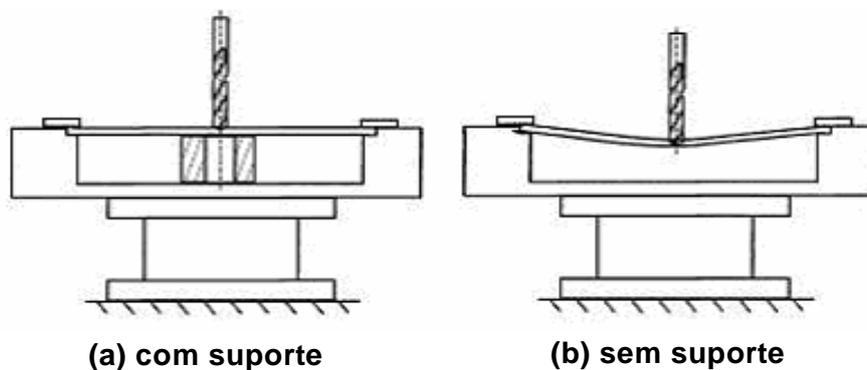


Figura 3.62 - Representação esquemática da furação com suporte em (a) e sem suporte em (b), mostrado em Capello (2004).

A diferença entre os dois tipos de furos pode ser visto nas fotos (a) e (b) da figura 3.63. Na figura 3.63 (a), está mostrada a fotografia do compósito que estava com suporte, sem delaminação (ou quase sem delaminação), e a figura 3.63 (b) mostra a fotografia do compósito que está sem suporte, com excessiva delaminação.

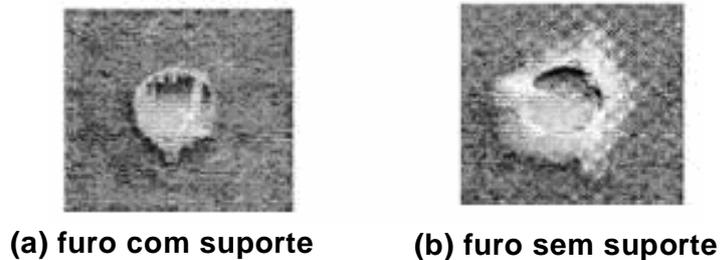


Figura 3.63 - Fotografia dos furos: em (a) apresenta-se o furo com um pouco de delaminação utilizando-se suporte, e em (b) apresenta-se o furo com delaminação sem utilizar o suporte, conforme Capello (2004).

Capello (2004) também analisou a influência do avanço (f) sobre a delaminação de um compósito PRFV (figura 3.64). Para um avanço de baixa intensidade não há delaminação, vide figura 3.64 (a), mas para um avanço com intensidade elevada há delaminação, como mostra a figura 3.64 (b). Quando o avanço aumenta, o ângulo α (que a aresta de corte faz com a superfície do material) passa de positivo para negativo, fazendo com que a broca passe a empurrar o material em vez de cortá-lo.

A figura 3.65 mostra os resultados em um gráfico de avanço e diâmetro do furo do suporte em função da área delaminada. Nesse gráfico, tem-se que para o mesmo suporte e avanços de 0,11mm/rev e 0,50mm/rev, a maior área delaminada foi encontrada para os maiores avanços e os maiores furos do suporte.

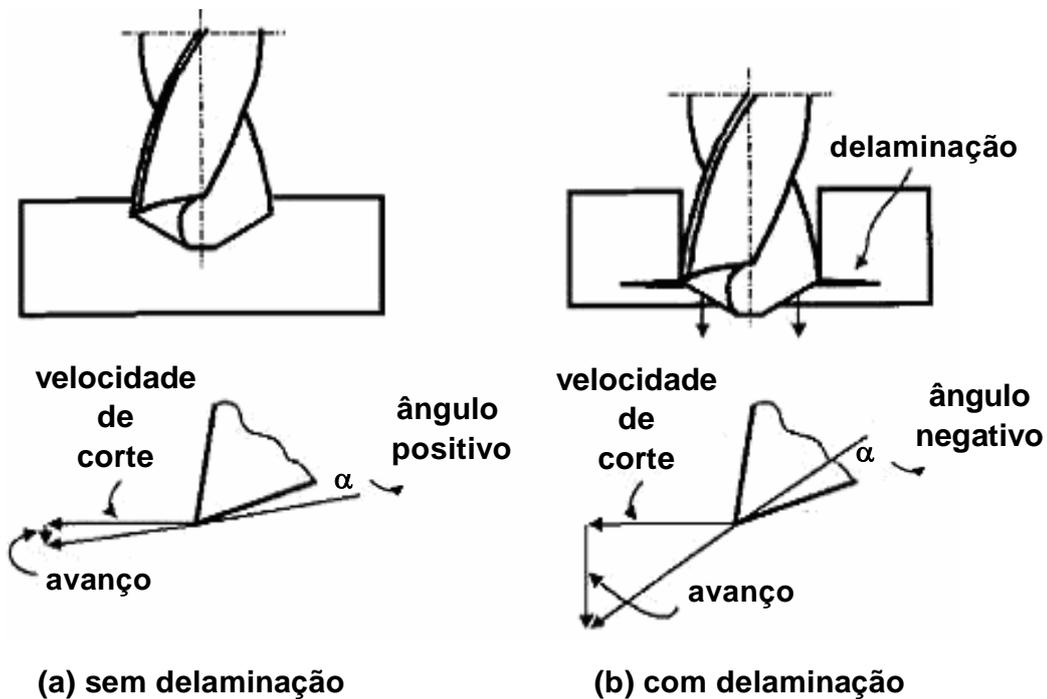


Figura 3.64 - Mecanismo de delaminação, segundo Capello (2004).

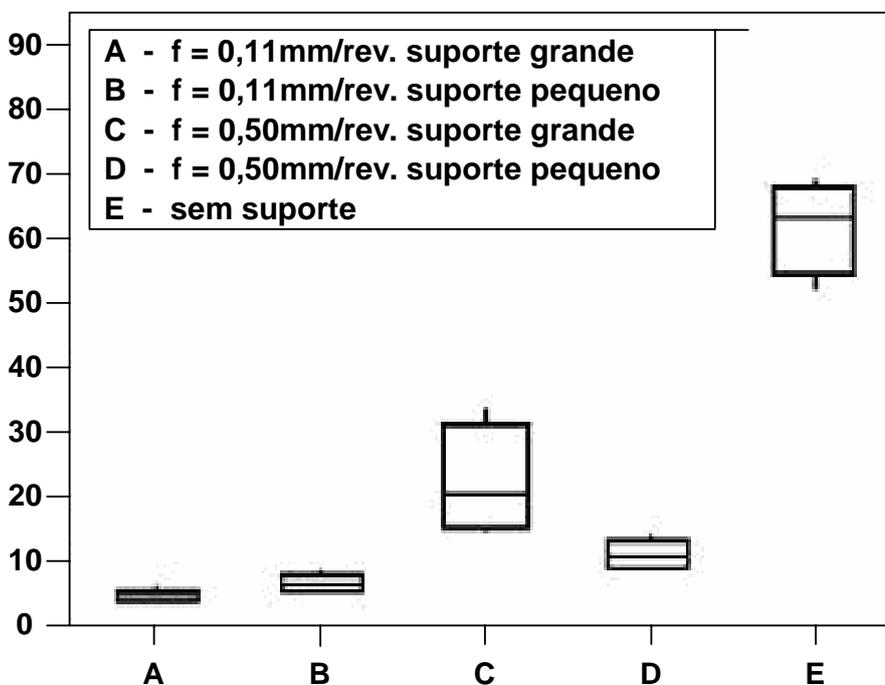


Figura 3.65 - Influência do avanço e do diâmetro do furo do suporte sobre a área delaminada, conforme Capello (2004).

Como o diâmetro do furo do suporte influencia a área delaminada, Capello (2004) criou um dispositivo para amortecer o avanço da broca, mostrado na figura 3.66. Esse dispositivo consiste de um sistema mola-amortecedor que controla o avanço da broca, evitando ou minimizando a delaminação. O autor demonstra que esse dispositivo pode substituir o suporte de apoio e serve para furos de quaisquer diâmetros. A figura 3.67 mostra as áreas delaminadas de furos realizados sem suporte (a), com amortecedor (b) e com suporte (c).

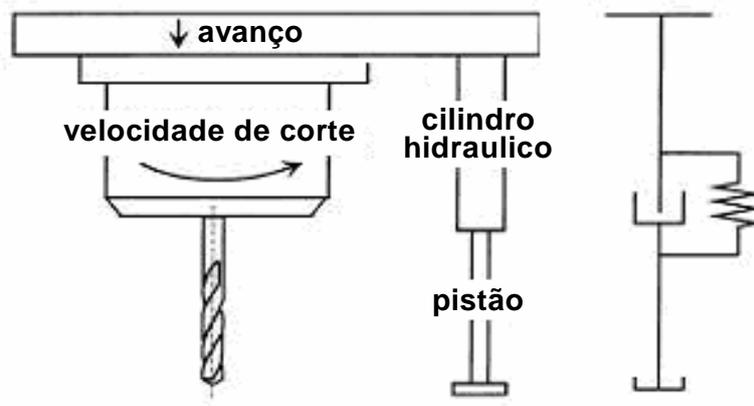


Figura 3.66 - Dispositivo para amortecer o avanço da broca, conforme Capello (2004).

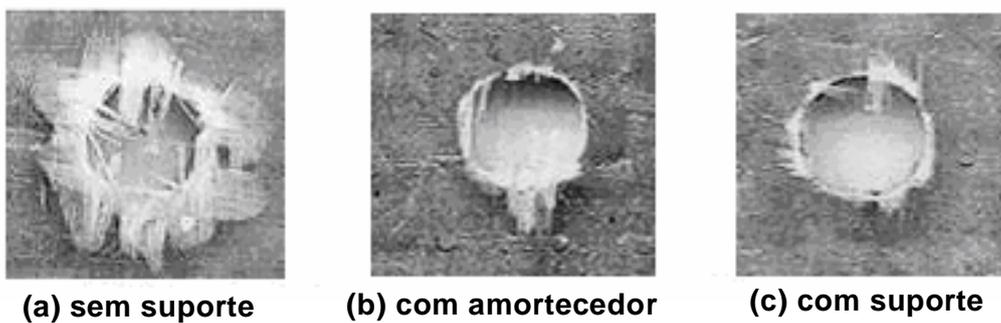


Figura 3.67 - Fotografia dos furos: (a) furo com delaminação gerado sem utilizar suporte, (b) furo com pouca delaminação, utilizando-se amortecedor e (c) furo com pouca delaminação, utilizando-se suporte, conforme (Capello, 2004).

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre velocidade de corte (v_c) e avanço (f) com o fator de delaminação (F_d), Davim e Reis (2003b) fizeram um estudo experimental furando um PRFC. Para o experimento, os autores utilizaram placas com 3mm de espessura e dois tipos de brocas com 5mm de diâmetro. A delaminação na furação do compósito PRFC ocorreu na entrada e na saída do furo, conforme mostrado de forma esquemática na figura 3.68. Por isso, os autores dividiram o experimento em duas etapas, nas quais foram investigadas a influência dos parâmetros de corte sobre o fator de delaminação para entrada e saída da broca.

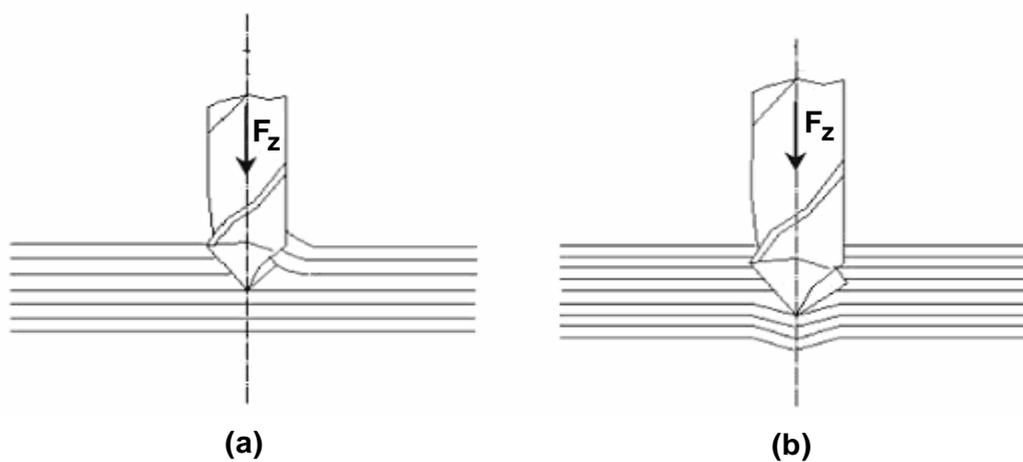


Figura 3.68 - Desenho esquemático da furação de compósito com delaminação: (a) entrada e (b) saída da broca, mostrado em Davim e Reis (2003b).

A figura 3.69 mostra que o fator de delaminação, na entrada do furo, teve um aumento em função da velocidade de corte e do avanço para a broca *Straight Shank* e ficou quase constante para a broca “*Brad & Spur*”. A análise estatística mostrou que o parâmetro de corte que teve maior influência sobre a delaminação na entrada da broca foi o avanço, e na saída foi a velocidade de corte.

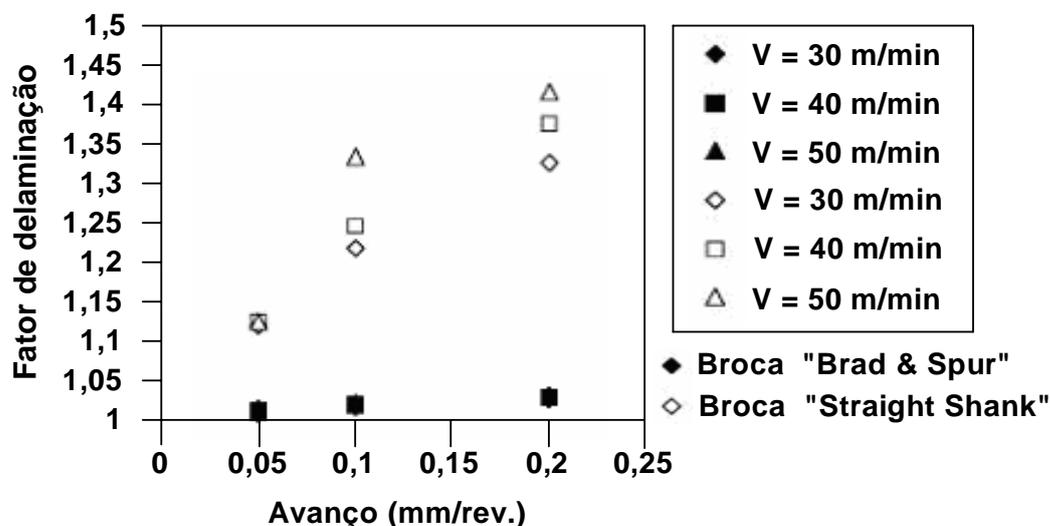


Figura 3.69 - Fator de delaminação em função do avanço e da velocidade de corte, para as duas brocas, de acordo com Davim e Reis (2003b).

Segundo Khashaba (2004), a furação é geralmente um processo final, e qualquer defeito durante esse processo conduz à rejeição da peça. A delaminação prejudica a vida do componente usinado e suas propriedades mecânicas, ou seja, seu desempenho fica comprometido, sendo considerado o defeito mais significativo. Mas outros defeitos também são muito prejudiciais, tais como *pull-out* (mudança de alinhamento da fibra), danos térmicos, cratera na matriz, entre outros.

Caprino e Tagliaferri (1995) afirmam que os tipos de danos em materiais compósitos durante o processo de furação são fortemente dependentes do avanço (f). Quando os valores do avanço são elevados, os modos de falha mostram características típicas de danos causados por impacto, delaminações, trincas intralaminares e elevadas zonas de microfalhas. Se os valores de avanço são baixos, as falhas consistem essencialmente nas delaminações que originam principalmente perto da interseção entre a superfície cônica gerada pelas bordas de corte principais e a superfície cilíndrica do furo.

Davim e Reis (2003e) também fizeram um trabalho com o objetivo de estabelecer uma relação entre a velocidade de corte e o avanço sobre a delaminação. No experimento, utilizaram-se placas de compósito PRFC com 4mm de espessura. Três diferentes tipos de

brocas, mostradas na figura 3.70, com 5mm de diâmetro e ângulo de ponta de 118° , foram utilizadas. Os parâmetros de corte empregados foram: avanços de 0,04mm/rev, 0,08mm/rev e 0,15mm/rev. e velocidades de corte de 16m/min, 24m/min e 32m/min. Para medir a delaminação dos furos foi utilizado um microscópio óptico.

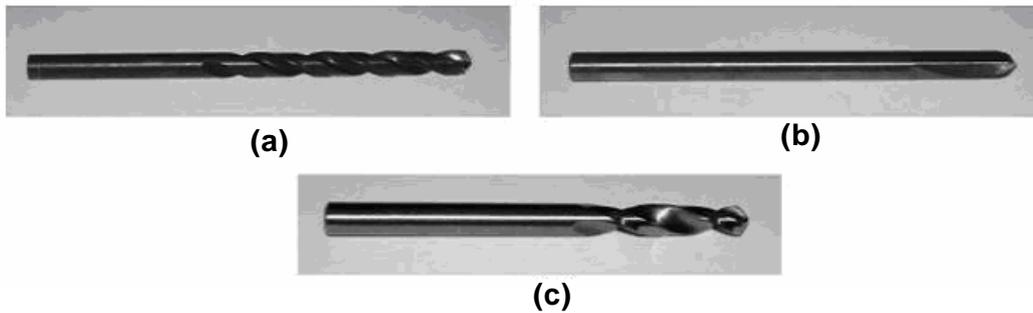


Figura 3.70 - Brocas empregadas nos testes: (a) helicoidal HSS, (b) 4 canais K10 e (c) helicoidal K10, mostradas em Davim e Reis (2003e).

Na figura 3.71 está demonstrado que o fator de delaminação (F_d) aumenta com o avanço e com a velocidade de corte. Pode-se observar também que a broca de metal duro apresentou melhores resultados que a broca de aço rápido para os mesmos parâmetros.

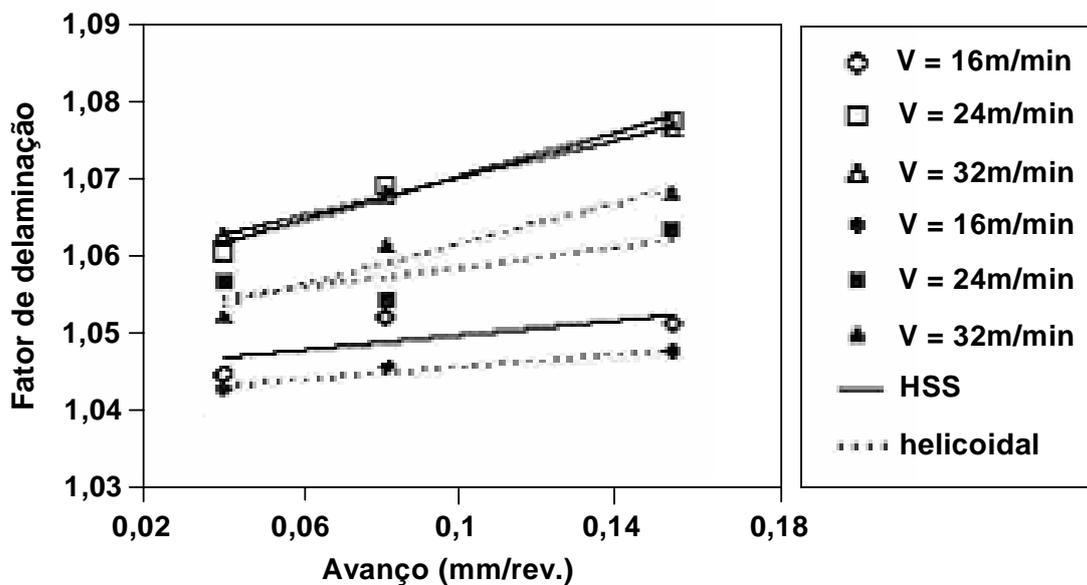


Figura 3.71 - Fator de delaminação em função de f e v_c , para os dois tipos de ferramenta (HSS e K10) com as mesmas geometrias, conforme Davim e Reis (2003e).

A figura 3.72 sugere que a broca helicoidal *K10* apresentou melhores resultados, comparada com a broca de 4 canais *K10* para os mesmos parâmetros de corte. A diferença entre a geometria dos dois tipos de brocas pode ser a razão dessa diferença, segundo os autores.

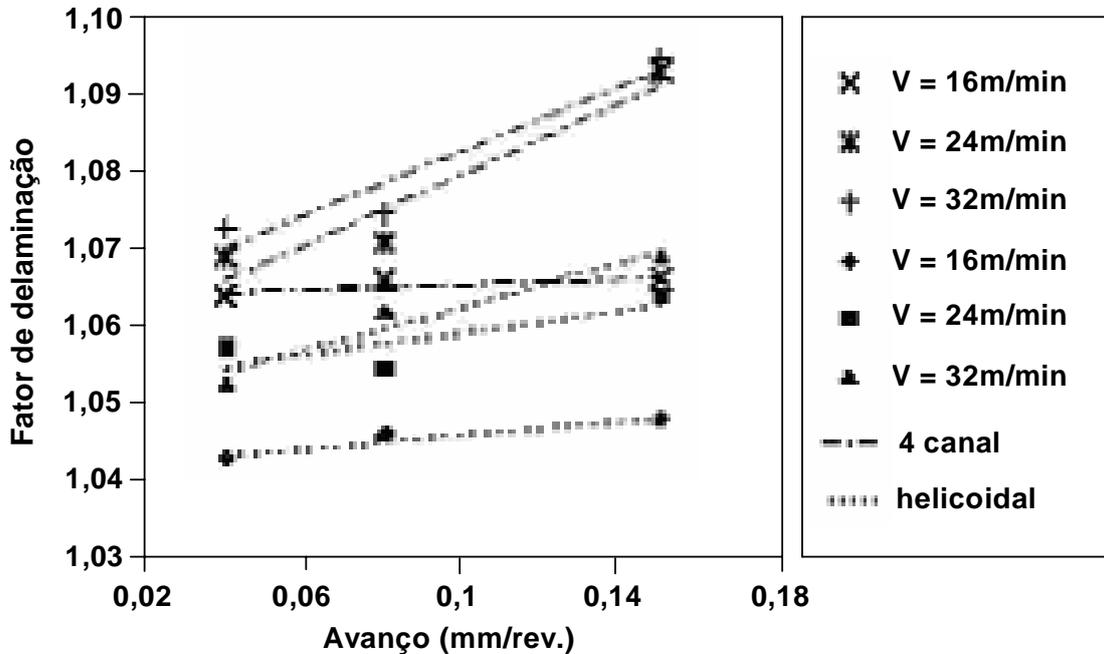


Figura 3.72 - Fator de delaminação em função de f e v_c , com ferramentas *K10* com geometrias diferentes, de acordo com Davim e Reis (2003e).

O fator de delaminação aumentou em função de v_c e f , sendo que a velocidade de corte teve maior influência para as três brocas. As duas brocas de metal duro não apresentaram nenhum desgaste na superfície de flanco, enquanto que a broca de aço rápido apresentou desgaste de 0,012mm.

Davim et al (2004c) investigaram a influência dos parâmetros de corte v_c e f sobre o fator de delaminação após o fresamento de dois tipos de compósitos PRFV. Os tipos de compósitos utilizados para os experimentos são produzidos comercialmente (*VUP9731*® e *ATLAC382-05*®) com 65% de fibra de vidro e matriz de poliéster. A fresa empregada possuía 3mm de diâmetro e era de metal duro classe *K10*. O fator de delaminação foi calculado usando a expressão $F_d = w_{max}/w$, onde w_{max} é o comprimento da região danificada, e w é a largura nominal, vide figura 3.73.

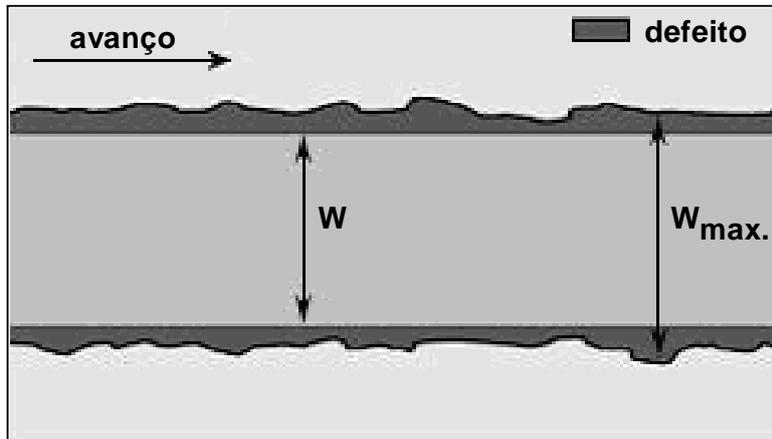


Figura 3.73 - Diagrama esquemático da medida do dano máximo (w_{max}) no fresamento do compósito, apresentado em Davim et al (2004c).

A figura 3.74 mostra a evolução de F_d em função do aumento de f para diferentes valores de v_c . Pode-se observar que F_d cresce em função do aumento de f e v_c para os dois materiais.

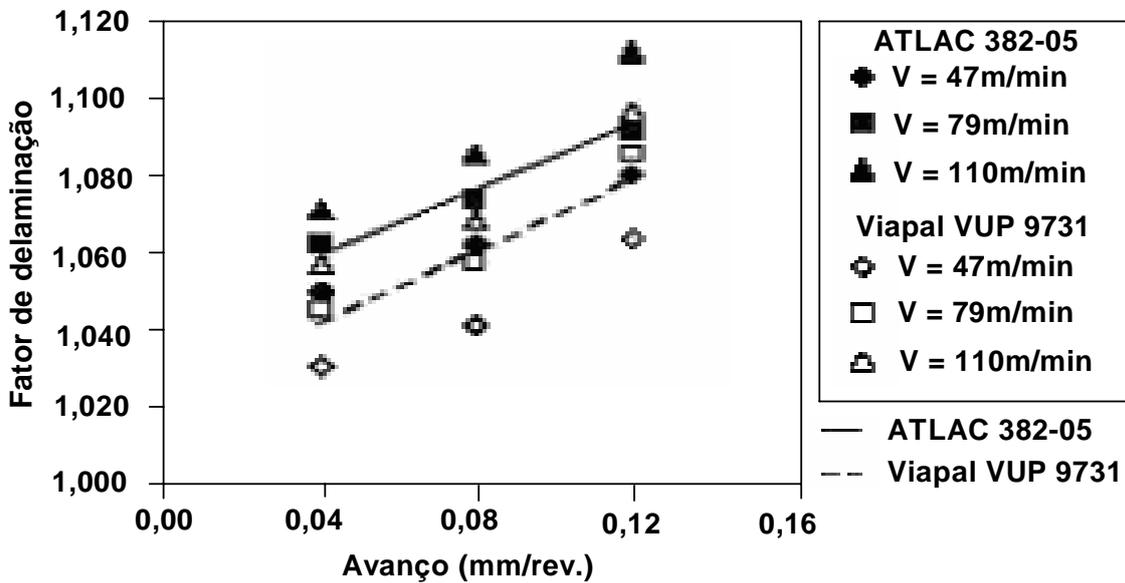


Figura 3.74 - Fator de delaminação em função do avanço e da velocidade de corte, para os dois tipos de compósitos, conforme Davim et al (2004c).

No caso do fresamento de PRFC com fresas de 2 e 6 canais, F_d aumenta em função do avanço, segundo Davim e Reis (2004c). Pode-se observar ainda uma considerável variação de F_d , para a fresa de 6 canais, em função do aumento de v_c . A fresa de dois canais não apresentou nenhuma variação. Pela análise de variância, o avanço foi o parâmetro de corte que apresentou a maior influência sobre F_d para ambas as fresas.

Stone (1996) afirma que na indústria aeronáutica a delaminação durante a furação é responsável por 60% de rejeição de peças e que o impacto econômico é significativo devido ao custo de processos anteriores.

3.9 Processos Especiais de Usinagem

Além das operações tradicionais de usinagem, merecem destaque os processos não convencionais de usinagem e a usinagem sob altas velocidades, tratados a seguir.

3.9.1 Usinagem Não Convencional

Uma alternativa à disposição da indústria para a fabricação de peças além dos limites tecnológicos da usinagem convencional é a utilização de processos de usinagem não convencionais. Esses processos diferem dos processos convencionais pela forma como a energia é empregada e pelo mecanismo de retirada de material da peça. Para utilizar com competência os processos de usinagem não convencionais, é necessário ter o conhecimento detalhado da natureza e dos parâmetros tecnológicos de controle. Além disso, deve-se levar em conta o tipo de material, a forma da peça, a taxa de remoção, a tolerância dimensional e o acabamento superficial, segundo Raslan et al (2005).

Em contraste com os processos convencionais de usinagem (nos quais a remoção de materiais ocorre por cisalhamento), os processos de usinagem não convencionais utilizam, além da ação mecânica, outras fontes de energia, sendo que a remoção de material pode ser alcançada, por exemplo, através de reações eletroquímicas, altas temperaturas do plasma ou ainda jato de água a altas velocidades com ou sem abrasivos, segundo Benedict (1987).

Conforme Metals Handbook (1989), os processos de usinagem não convencionais podem ser classificados de acordo com o tipo de energia aplicada. Tais processos têm suas próprias características básicas, suas vantagens e limitações. A tabela 3.12 apresenta os processos de usinagem não convencionais divididos em quatro categorias.

Tabela 3.12 - Principais processos de usinagem não convencionais, de acordo com Metals Handbook, (1989).

Mecânico		Elétrico	Térmico	Químico		
AJM	(jato abrasivo)	ECM (eletroquímica)	EDM	(eletroerosão)	CM	(química)
AFM	(fluxo abrasivo)		EBM	(feixe de elétrons)	PCM	(fotoquímica)
WJM	(jato d'água)		IBM	(feixe de íons)		
AWJM	(jato d'água abrasivo)		LBM	(feixe de laser)		
USM	(ultrassom)		AP	(arco plasma)		

De acordo com Lana (1989), o futuro dos processos de usinagem não convencionais será caracterizado por um constante crescimento. Embora sejam de uso restrito, os novos métodos assegurarão um grande crescimento devido ao aumento de capacidade e ao controle automatizado. Segundo Rodriguez (2001), as máquinas de usinagem não convencionais estão disponíveis com comando numérico computadorizado, o que assegura confiabilidade e repetibilidade nas operações, ajudando a acelerar a aceitação e implementação desses processos.

Aoyama et al (1995) estudaram a furação de PRFV, fazendo furos de pequeno diâmetro em placas de circuito impresso, usando *laser* de fontes CO₂ e YAG. Os autores concluíram que os danos em torno dos furos são similares para os dois processos. Entretanto, uma parte da luz do *laser* YAG é transmitida pela fibra de vidro, afetando a matriz (resina epóxi) ao longo da interface matriz-fibra. Comparando o desempenho dos dois tipos de *laser* (CO₂ e YAG), a aplicação do *laser* de CO₂ mostrou-se mais eficiente na execução de furos com pequeno diâmetro.

Um estudo feito por Hirogaki et al (2001), aplicando-se *laser* na furação de PRFV e PRFA, resultou na queima da parede do furo. Assim, a possibilidade de relacionar o tempo de irradiação e a queima da parede do furo foi investigada. O resultado é mostrado na figura 3.75. A razão dos danos causados pela queima na superfície da parede do furo é devido à

diferença na dissipação de calor pela fibra e a resina. Entretanto, depois que o tempo de irradiação foi fixado em 5ms ou menos, essa área queimada desapareceu. Outro problema observado foi a rugosidade na parede do furo devido à diferença na condutividade térmica entre a fibra e a resina.

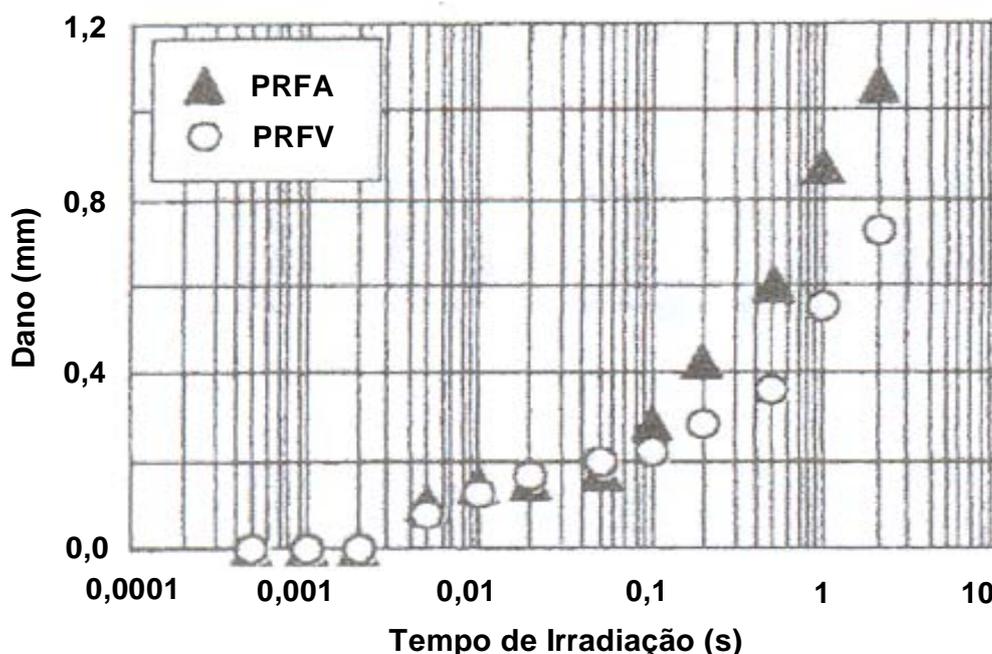


Figura 3.75 - Extensão do dano em função do tempo de irradiação na furação de PRFA e PRFV utilizando-se *laser*.

Um estudo comparando o corte a jato de água, jato abrasivo de água e *laser* foi feito por Shanmugam et al (2002). Nesse estudo, os autores furaram plástico reforçado com fibras e resina epóxi reforçada com carbono. No experimento, analisaram-se a característica do corte e a rugosidade superficial para os dois materiais. Os resultados revelaram que os três processos têm possibilidade de serem usados. Entre os três processos, o corte com jato abrasivo pareceu ser o melhor. A microestrutura de todo material tem que ser examinada para avaliar a extensão e a natureza das avarias associadas aos parâmetros específicos de usinagem. A delaminação foi observada para todos os processos, porém o corte com jato de água abrasivo apresentou pouca delaminação no corte do compósito reforçado com carbono. Análise da rugosidade superficial mostrou que o corte com jato abrasivo de água tem qualidade inferior quando comparado ao corte com jato de água.

3.9.2 *Usinagem com Altíssimas Velocidades*

Com ou sem uma definição conceitual clara, a usinagem de altíssima velocidade (HSM) é hoje reconhecida como a mais importante tecnologia de usinagem em desenvolvimento e implantação. De acordo com Schützer e Schulz (2003), as pesquisas procuram manter próximas as ligações entre o processo tecnológico, o desenvolvimento das máquinas-ferramentas e de seus componentes, incluindo também o desenvolvimento dos materiais para ferramentas de corte, assim como a elaboração de novas estratégias de corte e a relação com sistemas CAD/CAM.

De acordo com Oliveira (2003), o processo de usinagem com altíssimas velocidades tem como principais vantagens a possibilidade de se trabalhar com velocidades de corte de cinco a dez vezes maiores do que as normalmente utilizadas, e com avanços e profundidades de corte muito menores do que aquelas adotadas em usinagens convencionais. Segundo o mesmo autor, dentro das áreas de aplicação, três principais características tornam o HSM um processo muito vantajoso, quando comparado com os processos convencionais, a saber: tempo reduzido de usinagem, elevada qualidade superficial e baixas forças de usinagem. Entretanto, a usinagem HSM exige muito das ferramentas, segundo Gamarra (2003), pois são expostas a altas cargas térmicas durante a remoção de material. Daí, devem ter alto nível de resistência ao calor e serem ao mesmo tempo extremamente tenazes. Segundo o mesmo autor, a tecnologia mais importante que tornou o HSM possível na área de ferramentas foi o desenvolvimento de cobertura para ferramentas de metal duro.

Gaitonde et al (2006) estudaram a furação a alta velocidade de PRFC e concluíram que a alta velocidade de corte minimiza os danos sobre o material compósito (por exemplo, delaminação).

A figura 3.76 mostra, para diferentes materiais, as faixas de velocidades de avanço e de corte possíveis na usinagem a alta velocidade. Segundo Weck et al (1999), o corte a alta velocidade deve ser definido em relação ao material da peça, ao avanço e à velocidade de corte.

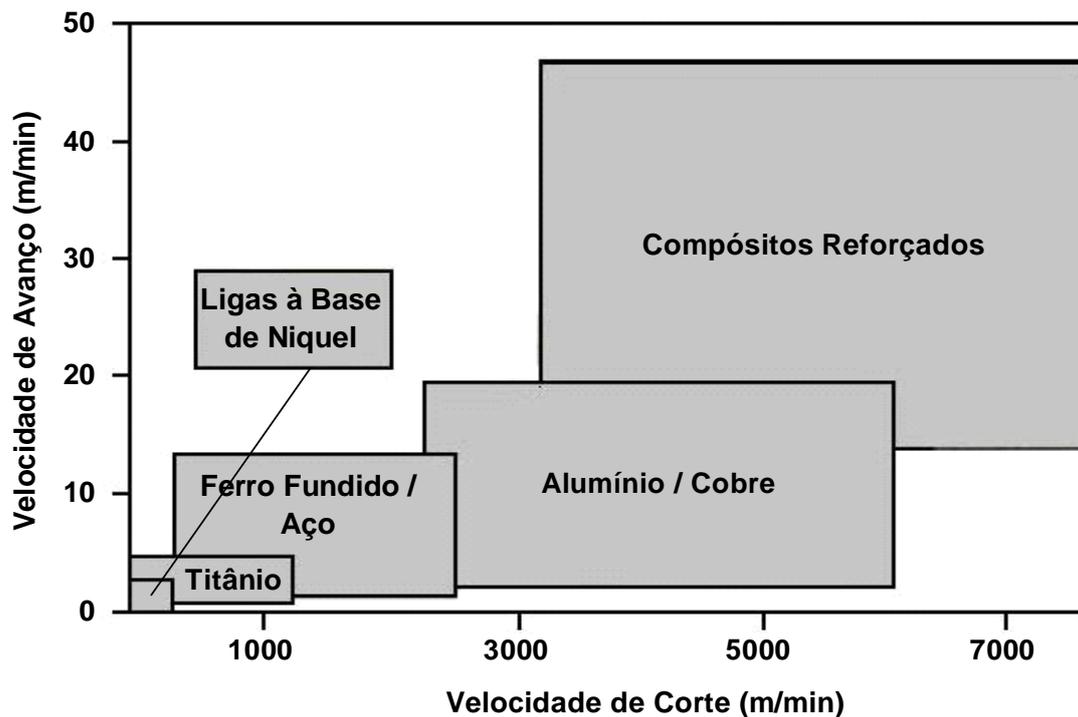


Figura 3.76 - Faixas possíveis de velocidade de avanço e velocidade de corte para diferentes materiais usinados com alta velocidade, conforme Weck et al (1999).

Há muitas pesquisas que investigam a furação de compósito com corte a alta velocidade, empregando-se ferramentas com geometria especial. A aplicação de revestimento em microbrocas para melhorar a resistência ao desgaste e a qualidade do furo, empregando-se a furação a alta velocidade foi estudada por Kao (2005).

Lin e Chen (1996) apresentam um estudo sobre a furação de PRFC empregando-se a furação de alta velocidade. Os autores analisaram o efeito do aumento da rotação de 9550rpm para 38650rpm sobre a força, o torque, o desgaste da broca e a qualidade do furo. Os resultados indicam claramente que o desgaste da broca é o fator limitante durante a furação de PRFC sob altas velocidades.

CAPÍTULO IV

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados nesta pesquisa, seguidos pela metodologia empregada para realização dos experimentos. A fabricação dos corpos-de-provas, a realização dos ensaios de caracterização dos corpos-de-prova e os testes de furação das placas de compósito polimérico de resina epóxi reforçado com fibras de vidro, juntamente com a aquisição dos dados e medição da força de usinagem, foram feitos no Laboratório de Usinagem e Automação, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da UFMG. Também foram feitas, no mesmo laboratório, as fotografias de desgaste da ferramenta de corte (broca), da delaminação na entrada e saída do furo e da forma dos cavacos, seguidas pela medição do diâmetro e da circularidade do furo, e terminando com a medição da rugosidade da parede do furo. Os testes de desgaste (esfera sobre disco) foram feitos no Laboratório de Revestimentos Tribológicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFMG. Finalmente, as fotomicrografias do desgaste das ferramentas de corte e da qualidade da parede do furo foram feitas no microscópio de varredura eletrônica (MEV) do Centro de Desenvolvimento da Energia Nuclear - CDNT.

4.1 Materiais e Equipamentos

Neste item, serão descritos os corpos-de-prova e as ferramentas de corte (brocas), seguidos pela apresentação dos equipamentos para caracterização do compósito, do centro de usinagem, do sistema de medição de força, do sistema de aquisição de imagem, do microscópio eletrônico de varredura (MEV), do rugosímetro, da máquina de medição de coordenadas e dos demais equipamentos e instrumentos empregados para a realização dos ensaios.

4.1.1 *Corpos-de-Prova*

Os corpos-de-prova são placas de material compósito polimérico de resina epóxi de Araldite M e endurecedor HY956 reforçado com fibras de vidro, na proporção (em peso) de 1:1. As propriedades da resina são apresentadas no Anexo II (tabela II.1), e as fibras de vidro utilizadas como reforço são tecido do tipo *Plain Weave* (vide figura 4.1) e são alinhadas nas direções 0° e 90°. O item 4.2.1 da metodologia apresenta em detalhes o procedimento de fabricação dos corpos-de-prova.

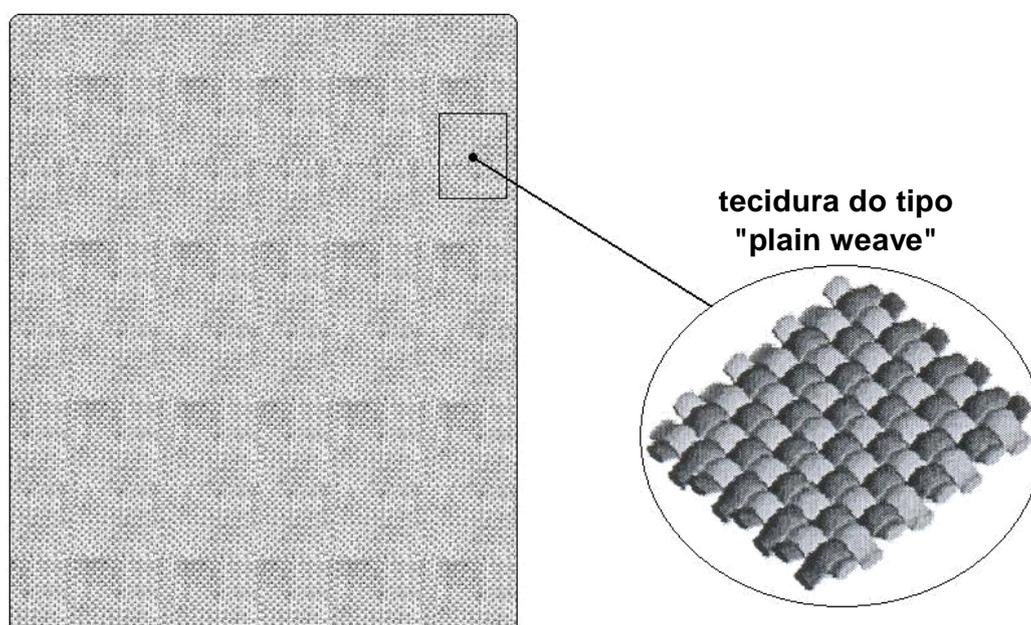


Figura 4.1 - Tipo de tecido empregado na fabricação dos compósitos.

Para avaliar a influência do reforço, foram utilizados tecidos com fibras de gramaturas diferentes. Os valores das gramaturas das fibras empregadas nos tecidos e da espessura média das placas de compósitos estão descritos na tabela 4.1. As três gramaturas foram utilizadas somente para avaliar força de avanço e delaminação. Para os demais ensaios, foi usada a malha de gramatura média.

Tabela 4.1 - Valores das gramaturas das fibras dos tecidos e das espessuras média das placas de compósito empregadas nos testes.

Malha	Gramatura (g/m²)	Espessura média (mm)
Fina	145	1,9
Média	200	3,0
Grossa	330	4,1

4.1.2 Ferramentas de Corte

Como ferramentas de corte foram utilizadas cinco tipos de brocas, sendo uma de aço rápido e quatro de metal duro. As descrições técnicas dessas brocas são apresentadas na tabela 4.2. Suas características geométricas são mostradas na figura 4.2, com destaque para as respectivas pontas. Trata-se de brocas para uso geral, com exceção da broca EDP27199, todas apresentam geometria convencional (helicoidal).

Tabela 4.2 - Descrição técnica das brocas utilizadas nos ensaios de furação.

Brocas	Descrição
EDP27199	broca de metal duro, marca GUHRING, geometria "Brad & Spur", classe K10, diâmetro de 5mm, comprimento de 62mm, haste cilíndrica, oxidada a vapor e duas arestas de corte.
A1141	broca de aço rápido, marca TITEX PLUS, classe NS, diâmetro de 5mm, comprimento de 62mm, haste cilíndrica, oxidada a vapor, com ângulo de ponta de 118° e duas arestas de corte.
A1163	broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5mm, comprimento de 62mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta de 118° e duas arestas de corte.
A1167A	broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5mm, comprimento de 62mm, haste cilíndrica, sem revestimento, ângulo de ponta de 150° e três arestas de corte.
A1163TIN	broca de metal duro, marca TITEX PLUS, classe K30F, diâmetro de 5mm, comprimento de 62mm, haste cilíndrica, com revestimento de nitreto de titânio, ângulo de ponta de 118° e duas arestas de corte.

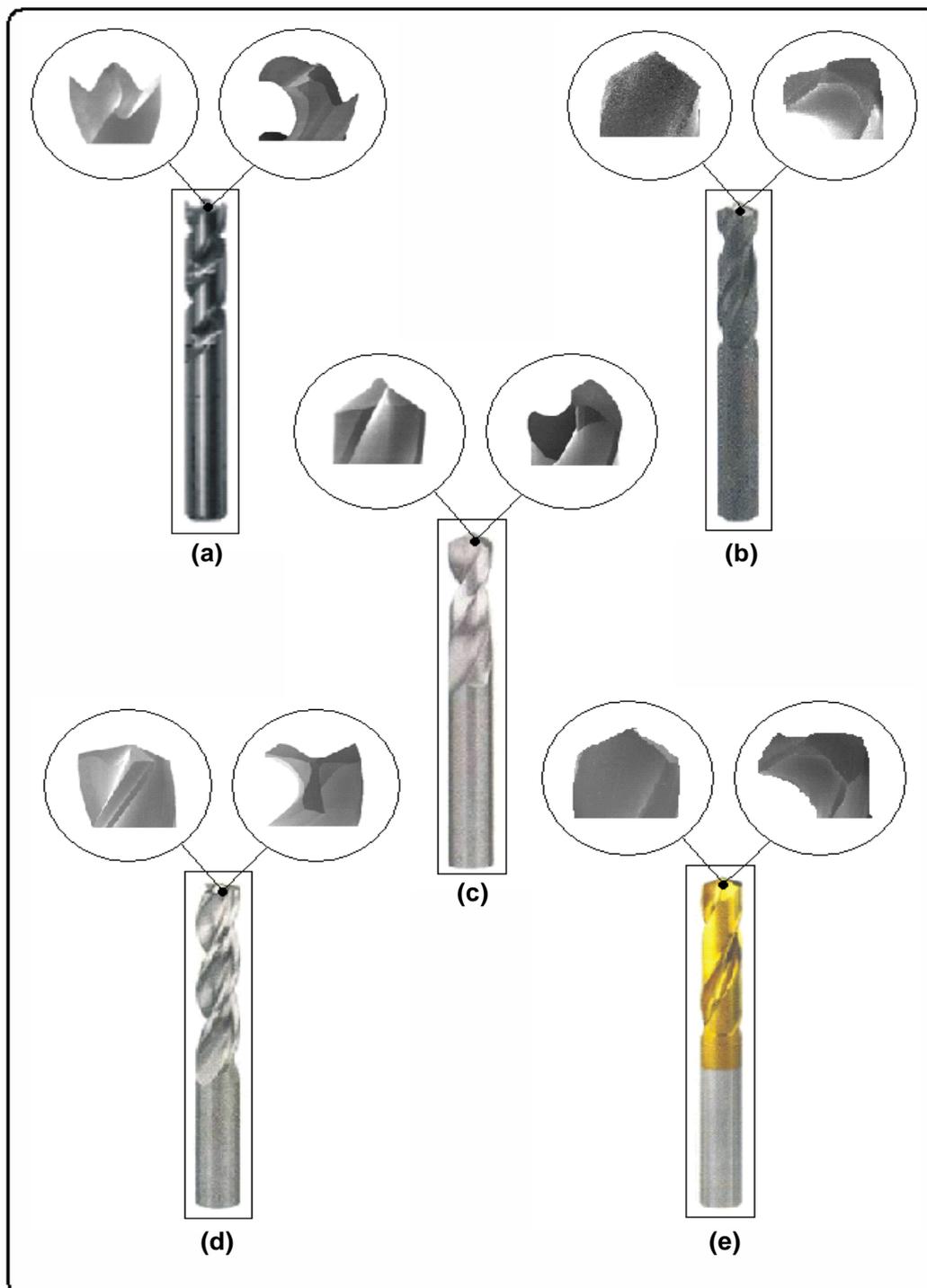


Figura 4.2 - Brocas com diâmetro de 5mm empregadas nos ensaios de furação:
(a) EDP27199, (b) A1141, (c) A1163 , (d) A1167A e (e) A1163TiN.

4.1.3 Caracterização do Compósito

Para determinar a resistência mecânica dos corpos-de-prova, empregou-se uma máquina de ensaios universal SHIMADZU, modelo AG-IS MS, com carga máxima de 100kN (figura 4.3). Essa máquina foi conectada a um computador com processador INTEL PENTIUM 4 de 3,20GHz, 1GB de memória RAM e com *software* TRAPEZIUM da SHIMADZU.



Figura 4.3 - Máquina de ensaios universal SHIMADZU, modelo AG-IS MS.

Para a realização dos testes de esfera sobre disco, foi empregado um tribômetro MICROPHOTONICS, modelo STANDARD.

Para obtenção das amostras da raiz do cavaco, foi utilizada uma plaina limadora horizontal ZOCCA, modelo PLZ 800, com curso de 650mm e velocidades de avanço de 15, 25, 40 e 67 golpes por minutos, da Oficina Christiano Ottoni do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG.

4.1.4 Centro de Usinagem

Para a realização dos testes de furação, utilizou-se um centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560, apresentado na figura 4.4, equipado com comando numérico computadorizado SIEMENS 810D, com potência máxima de 9kW e rotação máxima de 7500rpm.



Figura 4.4 - Centro de usinagem ROMI, modelo Discovery 560.

4.1.5 Sistema de Medição de Forças de Usinagem

O sistema empregado para medir a força de avanço nos testes de furação é composto por um dinamômetro, uma unidade de controle e uma placa de aquisição analógico/digital instalada em um microcomputador. O dinamômetro, a unidade de controle e o microcomputador estão mostrados na figura 4.5, seguidos pela descrição técnica de cada item.

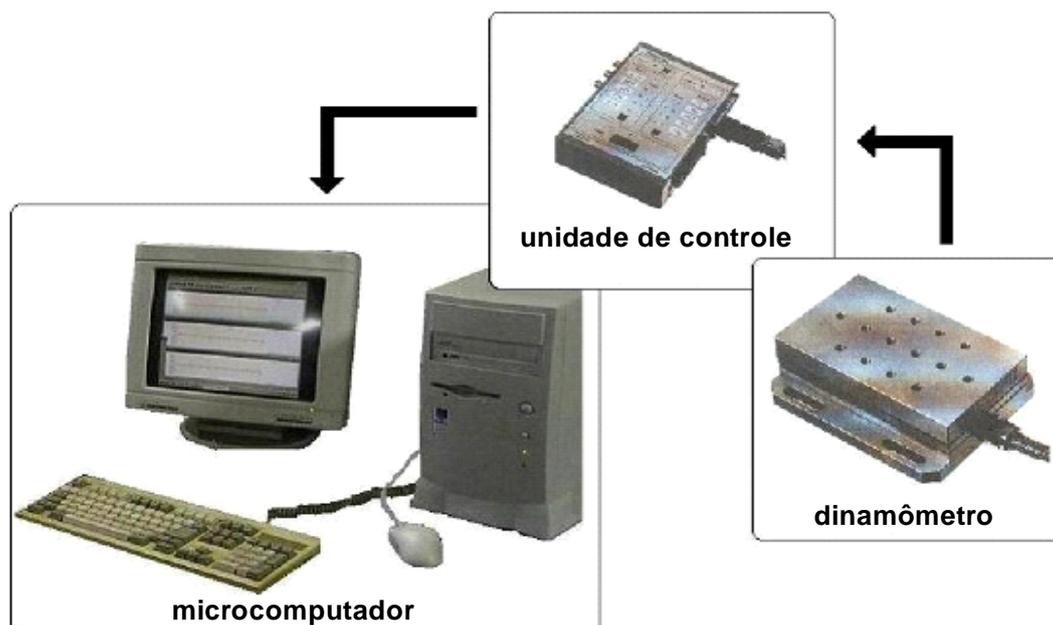


Figura 4.5 - Sistema de medição de força de usinagem.

O dinamômetro piezelétrico KISTLER, modelo 9257BA, tem a função de medir simultaneamente as três componentes ortogonais da força de usinagem. A faixa de trabalho e sensibilidade desse dinamômetro para três componentes ortogonais da força, juntamente com a histerese e a linearidade estão mostradas na tabela 4.3. A unidade de controle tem a função de amplificar os sinais enviados pelo dinamômetro para a placa de aquisição de dados instalada no microcomputador. O microcomputador Pentium 486, com processador INTEL, equipado com placa de aquisição analógico/digital DAQVIEW e *software* DYNOWARE, tem a função de converter os sinais enviados pelo dinamômetro e armazená-los. A taxa de aquisição empregada foi de 500Hz.

Tabela 4.3 - Dados técnicos do dinamômetro KISTLER, modelo 9257BA.

	Faixa de Trabalho (kN)	Sensibilidade (mV/N)
F_x	±0,5	10
F_y	±0,5	10
F_z	±1	5
Histerese	(%FCO)	≤±0,5
Linearidade	(%FCO)	≤±1

4.1.6 Sistema de Aquisição de Imagens

O sistema de aquisição de imagem é formado por um microscópio óptico OLYMPUS, modelo SZ61, com ampliação de 6,7 a 45 vezes, equipado com câmera digital EVOLUTION LC, modelo PL-A662 CMOS com resolução de 1,3 mega pixel, versão 5.0 (vide figura 4.6), acoplada a um microcomputador com processador AMD Sempron 3100+ de 1,81GHz, 512MB de memória RAM e *software* IMAGE-PRO Express. Esse sistema foi utilizado para fotografar o desgaste das brocas, a delaminação na entrada e saída dos furos e a forma dos cavacos.



Figura 4.6 - Sistema de aquisição de imagens.

Um segundo sistema de aquisição de imagem composto por um *scanner* VISIONEER, modelo FU661G, com resolução fixada em 600dpi e acoplado a um microcomputador também foi utilizado para avaliar a delaminação na entrada e saída dos furos.

4.1.7 Microscópio Eletrônico de Varredura

Para obtenção de fotomicrografias do desgaste das arestas transversal, principal e secundária da broca e da qualidade das paredes dos furos, utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL, modelo JSM-5310.

4.1.8 Rugosímetro

Um rugosímetro portátil MITUTOYO, modelo SURFTEST 301, foi empregado para medição da rugosidade média aritmética (R_a) das paredes dos furos. A figura 4.7 mostra o rugosímetro, o apalpador e os cabos de conexão.

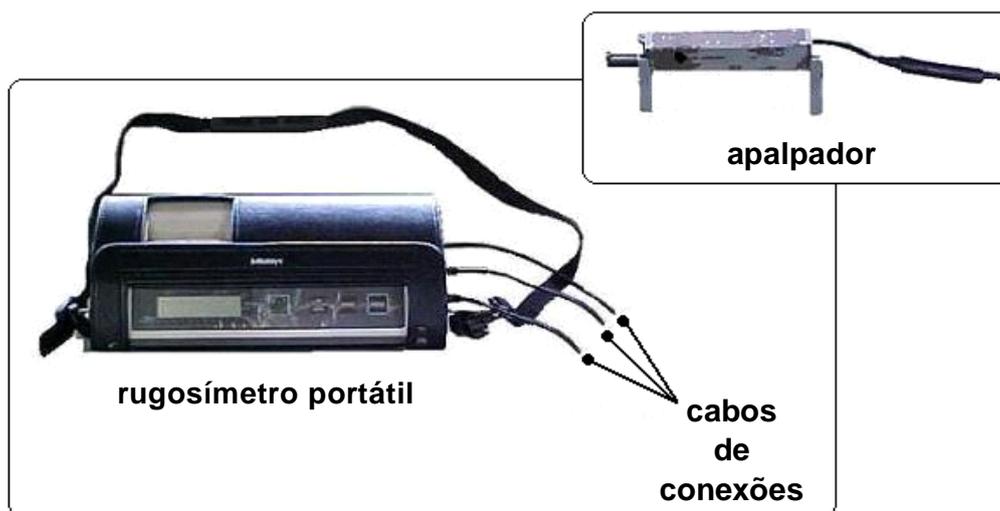


Figura 4.7 - Rugosímetro portátil MITUTOYO, modelo SURFTEST 301.

4.1.9 Máquina de Medição de Coordenadas

A máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D, mostrada na figura 4.8 e equipada com *software* REFLEX SCAN (versão 1.2) foi utilizada para medição do diâmetro e da circularidade dos furos.



Figura 4.8 - Máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D

4.1.10 Outros Instrumentos Utilizados nos Experimentos

Além dos equipamentos descritos anteriormente, foi utilizada uma balança digital FILIZOLA, modelo PLURIS 6/15, com cargas máximas de 6kg e 15kg e resoluções de 2g e 5g, respectivamente, para medição da proporção correta da resina epóxi e dos tecidos de fibra de vidro.

Um paquímetro DIGIMESS com resolução de 0,05mm foi utilizado para medir as dimensões dos corpos-de-prova.

4.2 Metodologia

A metodologia está dividida da seguinte forma: inicialmente, será feita a descrição das etapas de fabricação dos corpos-de-prova, seguida pela descrição dos ensaios de caracterização dos corpos-de-prova (resistência à tração, esfera sobre disco e parada rápida). Depois, serão descritos os procedimentos para medição da força de avanço e avaliação do desgaste das ferramentas de corte e da delaminação na entrada e saída dos furos. Posteriormente, serão descritas as técnicas empregadas na avaliação de danos na parede dos furos e na medição da rugosidade. Finalmente, serão apresentados os procedimentos empregados para medição do diâmetro e da circularidade dos furos e para avaliação da forma dos cavacos.

4.2.1 Fabricação dos Compósitos

Para a fabricação das placas de compósitos, foi utilizada resina epóxi (propriedades indicadas na tabela II.1) com 10 e 15 camadas de tecido, ou seja, 20 e 30 camadas de fibras, respectivamente, utilizando-se o processo conhecido como deposição manual (*hand lay-up*). Uma proporção de 1:1, ou seja, 50% de resina (matriz) e 50% de fibras (reforçador) em relação à massa total da placa que foi utilizada. A resina, por sua vez, é constituída de 100 partes de Araldite M e 20 partes de endurecedor HY956, conforme recomendação do fabricante. Tanto a resina como as fibras foram pesadas, para que as proporções fossem mantidas.

O tecido de fibras de vidro foi cortado na forma retangular, e o Araldite M foi misturado ao endurecedor HY956 por cerca de dois minutos em um recipiente plástico. Depois, montaram-se os compósitos, sendo laminados camada por camada, sobre uma superfície de vidro, ou seja, uma camada de resina e uma camada de tecido, sucessivamente, até a formação completa do compósito. Em seguida, os compósitos foram submetidos à cura por 7 dias, conforme recomendação do fabricante da resina, a temperatura ambiente e pressão atmosférica local.

Após a cura, as placas foram cortadas nas dimensões de 65mm x 90mm e 110mm x 110mm. As placas de 65mm x 90mm serão utilizadas nos testes de força de usinagem e as placas de 110mm x 110mm serão utilizadas nos testes de desgastes das brocas. Foram produzidas aproximadamente 200 placas de 65mm x 90mm e 500 placas de 110mm x 110mm com espessura média de 3mm.

4.2.2 Ensaios de Caracterização do Compósito

A resistência mecânica à tração do compósito polimérico reforçado com fibra de vidro foi medida de forma convencional, ou seja, os corpos-de-prova foram presos às garras da máquina e submetido à tração, como mostrado na figura 4.9. Cinco corpos-de-prova foram fabricados segundo a norma ASTM D3039/D3039M-95a, específica para esse tipo de material, e possuíam as seguintes dimensões: 250mm de comprimento, 25mm de largura e 3mm de espessura em média. Esses corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de tração a uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 3mm/min.



Figura 4.9 - Ensaio de resistência mecânica à tração realizado no compósito.

Para os ensaios realizados no tribômetro, foram utilizadas esferas de aço rápido e metal duro com 4mm de diâmetro, empregando-se uma rotação constante de 500rpm e carga de 10N, sendo que a duração de cada ensaio foi de 60 minutos.

Com o objetivo de melhor caracterização do compósito, também foram realizados testes de parada rápida (*quick stop*). Esses testes foram feitos em uma plaina limadora a uma velocidade de 67 golpes por minuto (vide figura 4.10), com ferramenta intercambiável de metal duro. As amostras da raiz dos cavacos foram retiradas das placas e submetidas a uma finíssima camada de ouro, numa câmara a vácuo, e levadas ao MEV para que pudessem ser fotomicrografadas.

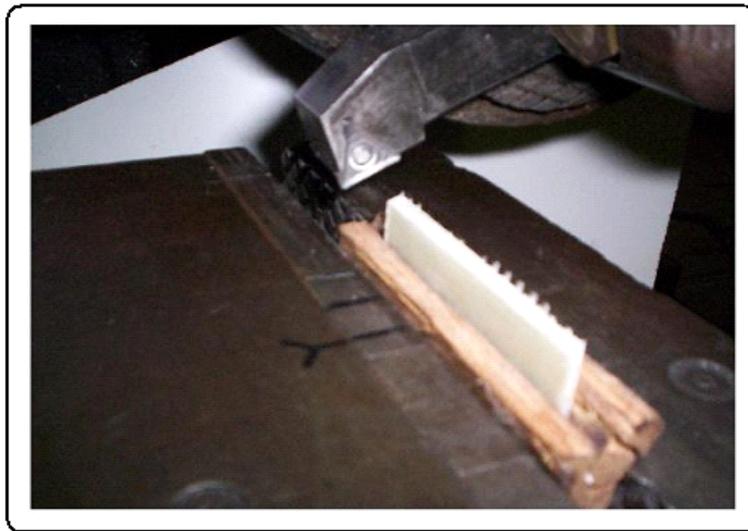


Figura 4.10 - Corpo-de-prova preso à máquina, no ensaio de parada rápida.

4.2.3 *Medição da Força de Avanço*

Para a medição da força de avanço durante a furação dos corpos-de-prova, foi necessário construir 2 sistemas de fixação. Esses sistemas são compostos de duas placas de alumínio de 3mm de espessura e quatro parafusos. A função desses sistemas é fixar e evitar a deflexão da placa de compósito no momento da furação, além de manter uma distância segura entre a ponta da broca e a parte superior do dinamômetro. A figura 4.11 mostra a placa de alumínio do sistema de fixação com vinte furos de 7mm de diâmetro para o compósito e quatro furos de 8,5mm diâmetro para os parafusos de fixação. Esse sistema foi montado sobre o dinamômetro.



Figura 4.11 - Placa de alumínio usada como suporte de fixação sobre o dinamômetro.

Um segundo sistema de fixação foi construído para fixar a placa de compósito sobre a mesa da máquina, como mostra a figura 4.12. Esse sistema de fixação também foi feito de chapas de alumínio com 3mm de espessura e possuía 100 furos com 7mm de diâmetro para o compósito e quatro furos com 8,5mm de diâmetro para os parafusos que fixaram o sistema à mesa da máquina.

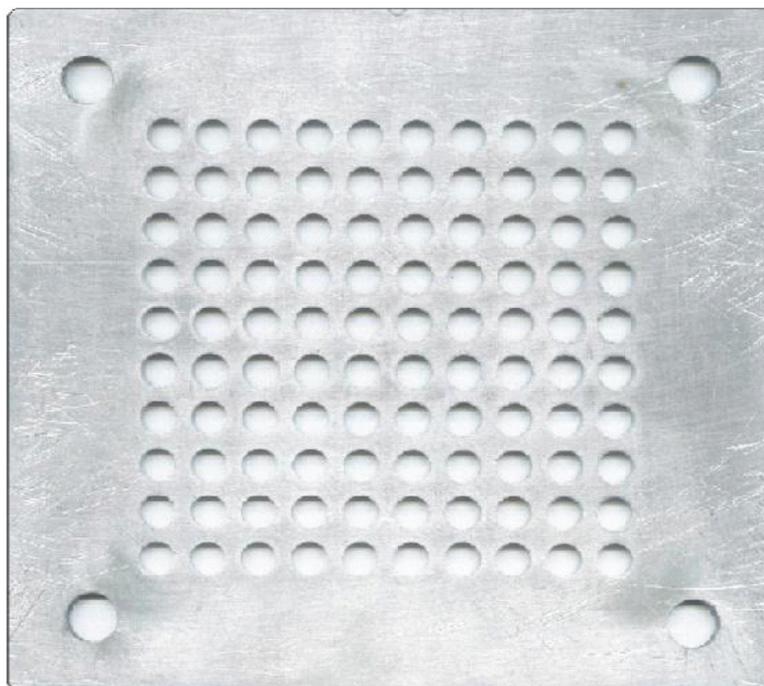


Figura 4.12 - Placa de alumínio usada como suporte de fixação sobre a mesa da máquina.

Assim, durante os testes de medição de força de usinagem, ambos os sistemas foram usados alternadamente, ou seja, após a furação da placa de compósito sobre o dinamômetro, a broca era transladada para o sistema de fixação sobre a mesa da máquina e furava a placa de compósito com o objetivo de desgastar a ferramenta. A figura 4.13 mostra os dois sistemas de fixação dos corpos-de-prova montados no centro de usinagem.

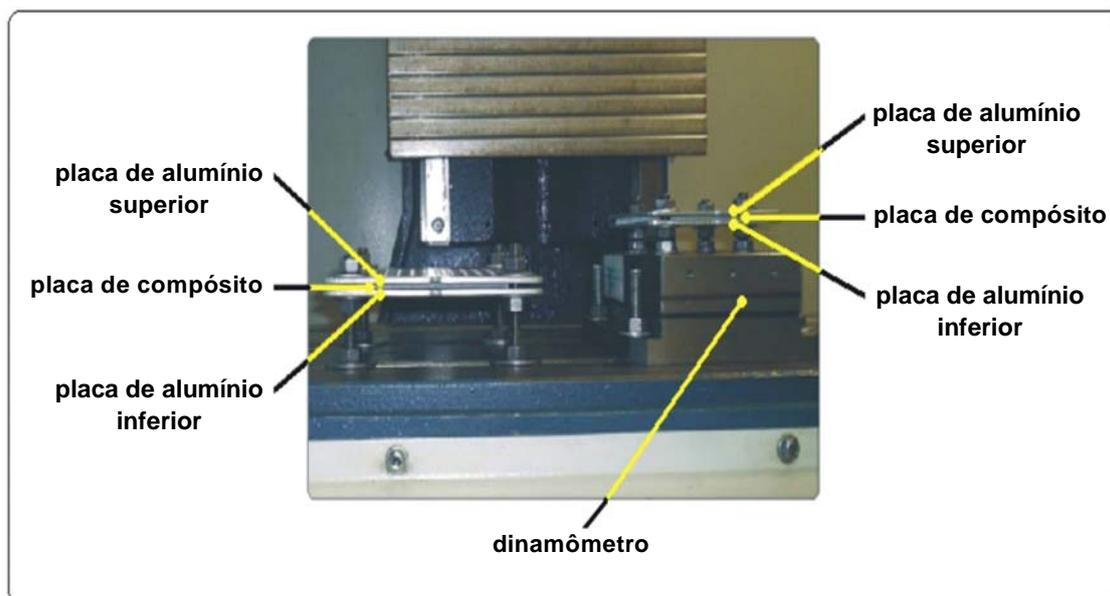


Figura 4.13 - Detalhe da montagem utilizada para a furação dos corpos-de-prova.

Nos dois sistemas de fixação é possível ver as placas de alumínio superior e inferior com os respectivos parafusos e, entre elas, a placa de compósito. No sistema da esquerda está a placa utilizada para acelerar o desgaste da broca, e no sistema da direita, está a placa de medição da força, montada sobre o dinamômetro. No Anexo II (Procedimento para Furação dos Compósitos) é mostrado com mais detalhe a metodologia empregada para a furação de desgaste da broca e medição da força de avanço.

O dinamômetro utilizado mede as forças nas direções x , y e z , mas somente a força na direção z , ou seja, na direção de avanço da broca, foi registrada. Esse dinamômetro não é capaz de medir torque. A figura 4.14 apresenta uma imagem gráfica da tela do computador utilizado para sistema de medição de força, onde se vê os gráficos de força nas direções x , y e z .

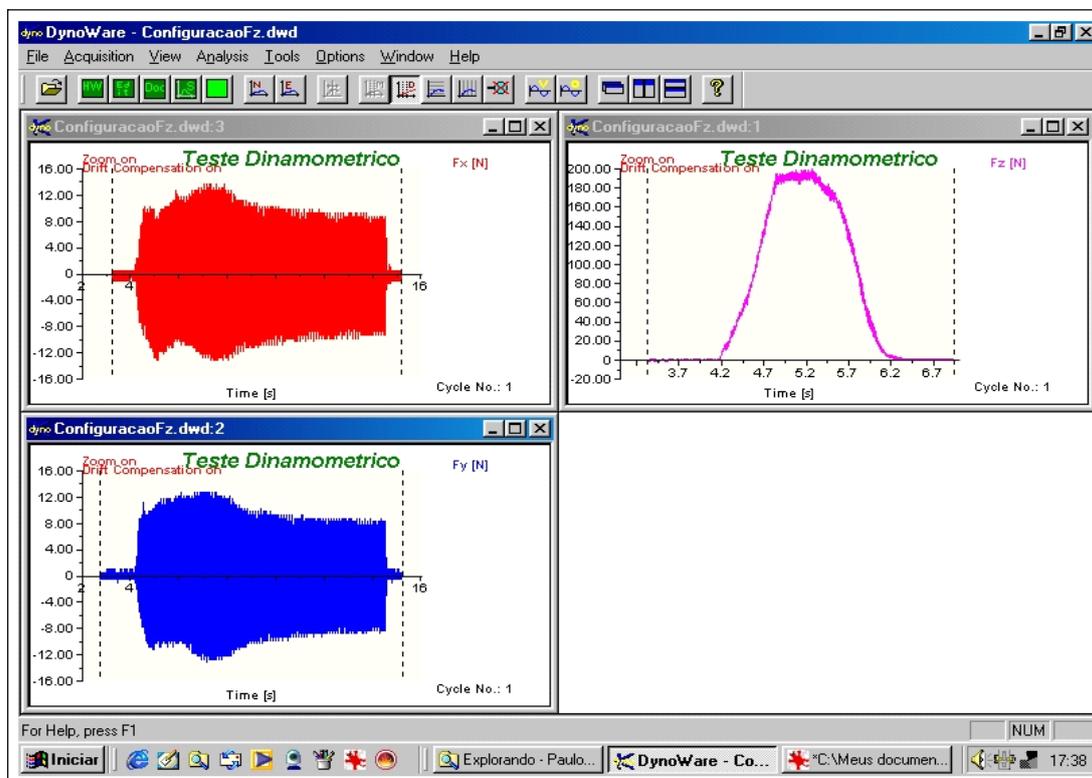


Figura 4.14 - Tela gráfica mostrada no monitor do computador do sistema de medição de força, com os gráficos de força das direções x , y e z , respectivamente.

Os parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) utilizados nos testes de força de avanço são apresentados na tabela 4.4. Para cada uma das 12 condições mostradas, foi investigada a influência da gramatura do reforço e do tipo de ferramenta (tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente).

Para avaliar a influência do desgaste da broca sobre a força de avanço, foram usados os mesmos parâmetros de corte da tabela 4.4. Para cada condição, foram feitos 1000 furos por broca, sendo que a força de avanço foi registrada a cada 100 furos. Finalmente, as brocas que apresentaram maior resistência ao desgaste foram submetidas à realização de 10000 e 24000 furos sob condição de corte mais severa.

Tabela 4.4 - Parâmetros de corte empregados nos testes de força de avanço.

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rev.)
1		0,04
2	55	0,10
3		0,15
4		0,20
5		0,04
6	71	0,10
7		0,15
8		0,20
9		0,04
10	86	0,10
11		0,15
12		0,20

As placas de compósitos mostrada na figura 4.15 são amostras dos corpos-de-prova após a furação. A figura 4.15 (a) apresenta uma placa utilizada para medição da força (20 furos), e a figura 4.15 (b) apresenta a placa empregada para desgastar a broca (100 furos). Calcule-se que para essa etapa do procedimento experimental tenham sido realizados 66000 furos.

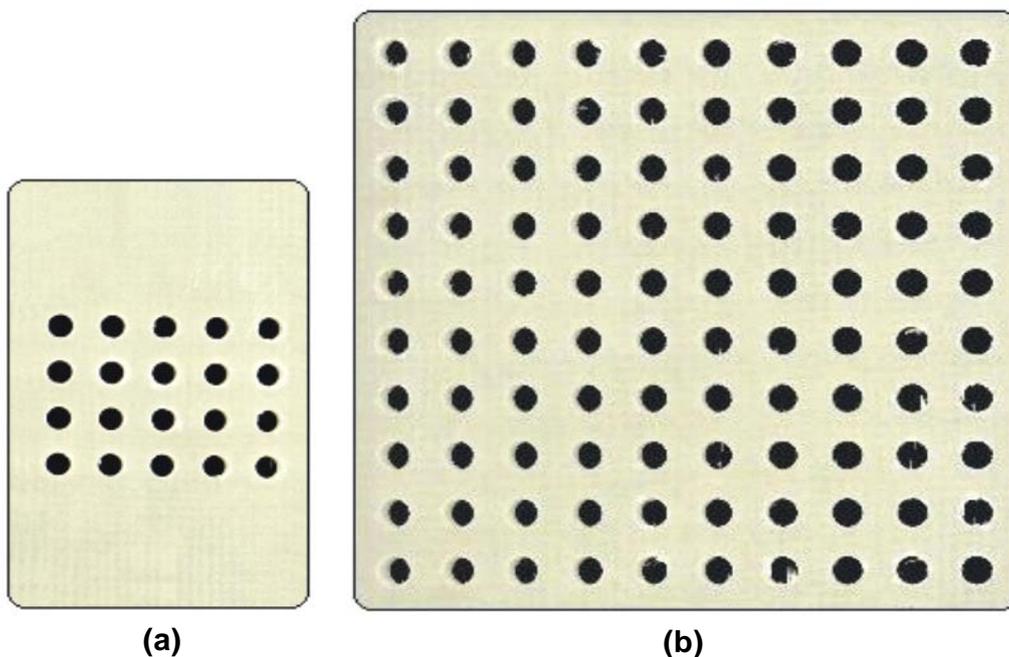


Figura 4.15 - Corpos-de-prova após a furação: (a) placa utilizada para medição da força e (b) placa empregada para desgastar a broca.

4.2.4 Avaliação do Desgaste das Ferramentas de Corte

A avaliação do desgaste das brocas foi feita de forma qualitativa, através da análise das fotografias e fotomicrografias. As fotografias foram tiradas com o sistema de aquisição de imagem, e as fotomicrografias, com o MEV. As fotografias foram tiradas a cada 100 furos, para que se pudesse acompanhar o desgaste das brocas, dentro de cada condição apresentada na tabela 4.4, sendo que a primeira fotografia foi feita antes de a broca ser utilizada. As fotomicrografias de cada broca foram feitas somente para o furo final de cada condição, ou seja, no encerramento do ensaio, pois o objetivo era observar com mais detalhe o estado das arestas transversal, principal e secundária, ao fim de cada teste. Como o desgaste apresentado pelas brocas foi mínimo, não foi possível avaliar a vida das ferramentas. Para esses testes, foram utilizadas as brocas A1141 (aço rápido), A1163 (metal duro) e A1163TiN (metal duro revestido).

4.2.5 Avaliação da Delaminação

A avaliação da delaminação foi feita empregando-se o *scanner* e o sistema de aquisição de imagens. As imagens de delaminação geradas pelo *scanner* são dos furos feitos com diferentes tipos de brocas e dos compósitos de fibras com gramaturas variadas. O objetivo dessa avaliação é verificar qual a influência da broca e da gramatura da fibra sobre a delaminação na entrada e saída do furo para as diversas condições de corte indicadas na tabela 4.4.

As fotografias de delaminação feitas com o sistema de aquisição de imagem são dos furos feitos com as brocas A1141 (aço rápido), A1163 (metal duro) e A1163TiN (metal duro revestido), e têm o objetivo de avaliar a influência do desgaste da broca sobre a qualidade do furo. Para os testes de 1000 furos, foram empregadas as mesmas condições de corte indicadas na tabela 4.4. Para os testes de 10000 e 24000 furos foi empregada a condição de corte mais severa.

A medição da área delaminada foi feita com o auxílio do *software* IMAGEM-PRO EXPRESS do sistema de aquisição de imagens. A área delaminada foi medida em *pixels* e

convertida em milímetros quadrados com o auxílio de um furo padrão. A área delaminada e o furo padrão são mostrados na figura 4.16. No Anexo II (Medição da Área Delaminada) está descrito com mais detalhe a metodologia empregada para medir a delaminação. O objetivo dessa medição é verificar quantitativamente a influência dos parâmetros de corte e do número de furos sobre o valor da área delaminada. Foram medidas as áreas delaminadas dos furos feitos com a broca A1141 (aço rápido), empregando-se as velocidades de corte de 55m/min e 86m/min e avanços de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot para avaliar a influência do parâmetro de corte, e velocidade de corte de 86m/min e avanço de 0,04mm/rot para avaliar a influência do número de furos.

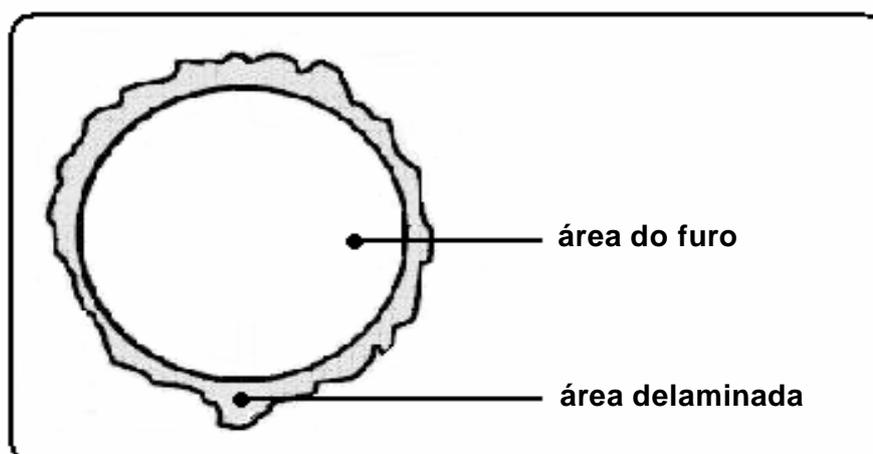


Figura 4.16 - Área do furo e área delaminada.

4.2.6 Qualidade da Parede dos Furos

Para avaliar a qualidade da parede dos furos, foram feitas algumas fotomicrografias no microscópio eletrônico de varredura. Porém, antes de fotomicrografar as paredes dos furos, foi preciso preparar os corpos-de-prova. Para isso, foi necessário fazer cortes longitudinais na placa de compósito, evitando que a região a ser fotomicrografada (parede do furo) sofresse qualquer dano. A figura 4.17 mostra de onde foram retiradas as amostras e como foram feitos os cortes. Em seguida, essas amostras foram submetidas a uma finíssima cobertura de ouro, numa câmara a vácuo, para que pudessem conduzir eletricidade e gerar as imagens. Somente as paredes do primeiro e do milésimo furos feitos com as brocas

A1141 (aço rápido) e A1163 (metal duro) foram fotomicrografadas. O objetivo desse ensaio é avaliar a qualidade da parede do furo em função do desgaste e do tipo da broca.

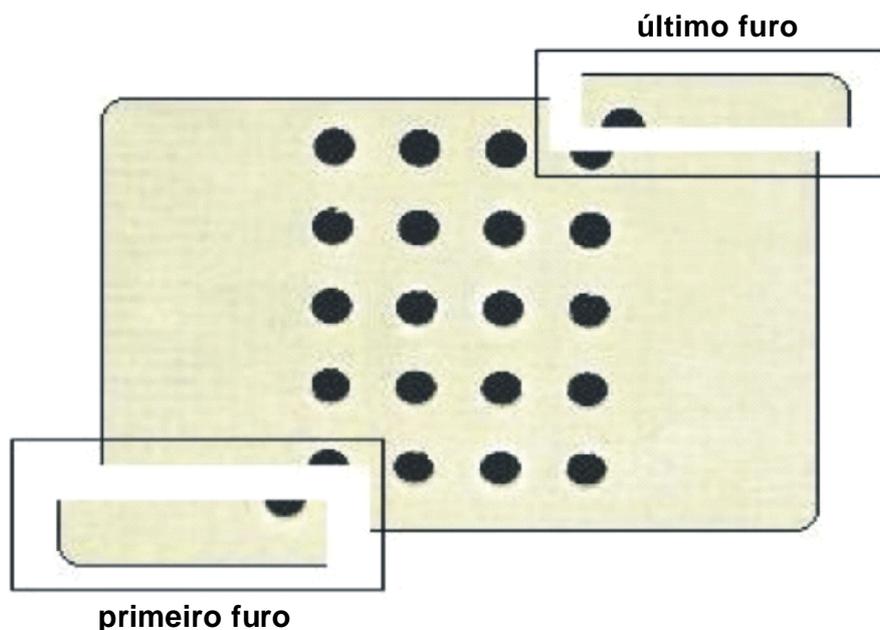


Figura 4.17 - Corpos-de-prova utilizados para avaliar a qualidade da parede do furo.

4.2.7 Medição da Rugosidade da Parede dos Furos

A medição de rugosidade das paredes dos furos foi feita com o rugosímetro ajustado para um *cut off* de 0,25mm (comprimento total de 1,25mm). Esse valor foi definido em função da espessura da placa. Mediu-se somente a rugosidade média aritmética (R_a).

Para medir a rugosidade da parede do furo, foi preciso cortar os corpos-de-prova longitudinalmente, como mostra a figura 4.18, evitando-se que a região a ser medida (parede do furo) sofresse qualquer dano. O corte foi feito com um arco de serra com lâmina de aço rápido. A medição de rugosidade na parede do furo foi feita somente uma vez, e a escolha do furo para cada condição foi aleatória.

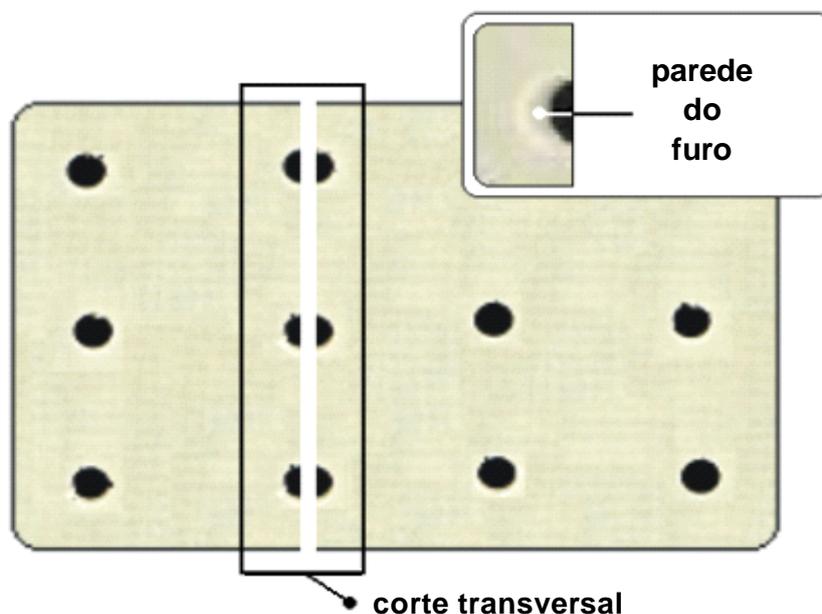


Figura 4.18 - Corpo-de-prova com corte transversal e parede do furo em destaque.

Para a furação foram utilizadas três velocidades de corte e três avanços, conforme indicado na tabela 4.5. Esses furos foram feitos em um compósito de resina epóxi reforçado com tecido de fibras de vidro com gramatura de 200g/m^2 , empregando-se uma broca de aço rápido helicoidal *TWIST* com diâmetro de 6mm. As condições de corte usadas nesses testes diferem daquelas utilizadas nos demais ensaios pelo motivo de estes terem sido executados em uma etapa preliminar, quando os parâmetros de corte mais adequados ainda estavam sendo levantados.

Tabela 4.5 - Parâmetros de corte utilizado para medição da rugosidade na parede do furo

Condição	Vc (m/min)	f (mm/rev.)
1	30	0,1
2		0,5
3		1,0
4	60	0,1
5		0,5
6		1,0
7	90	0,1
8		0,5
9		1,0

4.2.8 Medição do Diâmetro e da Circularidade dos Furos

Para medir o diâmetro e a circularidade dos furos na máquina de medição de coordenadas, foi preciso construir um suporte de fixação para prender as placas de compósito sobre a mesa da máquina. Esse suporte era composto de duas barras de aço e três parafusos, que fixavam os corpos-de-prova pelas suas extremidades, evitando que estes se movessem no momento em que a ponta de medir tocasse a parede dos furos. Para registrar o valor do diâmetro e da circularidade, a parede de cada furo foi tocada em oito pontos diferentes. O valor da circularidade foi registrado pelo *software* da máquina simultaneamente com o valor do diâmetro (mostrado no painel da máquina). A base da máquina, o suporte de fixação e a ponta de medir são mostrados na figura 4.19. No Anexo II (Medição do Diâmetro e da Circularidade) está descrito com mais detalhe o procedimento empregado para medir o diâmetro e circularidade dos furos. A ponta de medir consistia de uma esfera de rubi com diâmetro de 2mm presa a uma haste metálica com rosca na outra extremidade para que pudesse ser fixada ao sensor da máquina. As condições de corte utilizadas foram velocidade de corte de 55m/min e 86m/min e avanço de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot, para avaliar a influência dos parâmetros de corte, e velocidade de 86m/min e avanço de 0,15mm/rot, para avaliar a influência do desgaste da broca, sobre o diâmetro e circularidade do furo. As brocas empregadas foram A1141 (aço rápido), A1163 (metal duro) e A1163TiN (metal duro revestido).



Figura 4.19 - Medição do diâmetro e da circularidade do furo.

4.2.9 Avaliação da Forma dos Cavacos

A avaliação da forma dos cavacos foi feita através das fotografias tiradas com o sistema de aquisição de imagens. Foram feitas fotografias dos cavacos após o primeiro e o milésimo furos, com exceção para alguns casos em que foram separados cavacos intermediários. Esses cavacos intermediários foram separados e acondicionados em sacos e depois levados ao microscópio e fotografados. As condições de corte foram velocidade de corte de 55m/min e 86m/min e avanço de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot, para avaliar a influência dos parâmetros de corte, e velocidade de 86m/min e avanço de 0,15mm/rot, para avaliar a influência do desgaste da broca, sobre a forma do cavaco. Foram utilizadas as brocas A1141 (aço rápido) e A1163 (metal duro).

CAPÍTULO V

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados e as discussões dos experimentos de furação, feitos no compósito polimérico de resina epóxi reforçada com fibras de vidro. Esta etapa inicia-se com os resultados dos ensaios de caracterização dos corpos-de-prova (resistência à tração, esfera sobre disco e parada rápida). Depois serão apresentados os resultados de medição da força de avanço e de análise do desgaste das ferramentas de corte, de delaminação e de acabamento da parede do furo. Por fim, serão apresentados os resultados de rugosidade, diâmetro e circularidade dos furos e a análise da forma dos cavacos.

5.1 Caracterização dos Corpos-de-Prova

A figura 5.1 mostra o resultado do ensaio de tração do corpo-de-prova nº 4. Nesse gráfico, a inclinação da reta que representa a linha de tendência é, por definição, o módulo de elasticidade (E) do material. Dos cinco corpos-de-prova, dois romperam-se na garra e dois romperam-se próximo à garra. O resultado do ensaio de tração para o quarto corpo-de-prova apresentou os seguintes valores: tensão máxima verdadeira $\sigma_{\max}=376,6\text{MPa}$, módulo de elasticidade $E=28,1\text{GPa}$ e carga máxima à tração $C_{\max.}=29,3\text{kN}$. Esses resultados são compatíveis com aqueles obtidos por Bueno (2002): $\sigma_{\max}=438,9\text{MPa}$, $E=18,5\text{GPa}$ e $C_{\max.}=31,2\text{kN}$, que testou material similar; porém, inferiores aos valores apresentados por Callister (2002), vide tabela 3.3. Essa diferença pode ser explicada por variações nas técnicas de fabricação dos compósitos e pela utilização de garras mecânicas na máquina de ensaios universal, quando o mais apropriado seria o uso de garras hidráulicas.

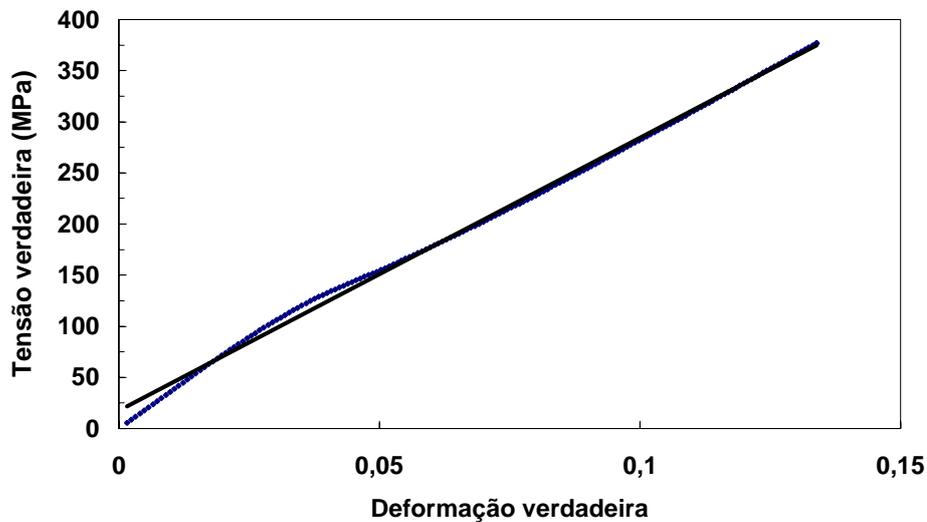


Figura 5.1 - Tensão verdadeira contra deformação verdadeira.

O resultado do ensaio de esfera sobre disco para desgaste utilizando-se esferas de metal duro e aço rápido contra o compósito de resina epóxi reforçado fibra de vidro é mostrado na figuras 5.2, apresentando curvas com tendências diferentes para as esferas de metal duro e aço rápido, respectivamente.

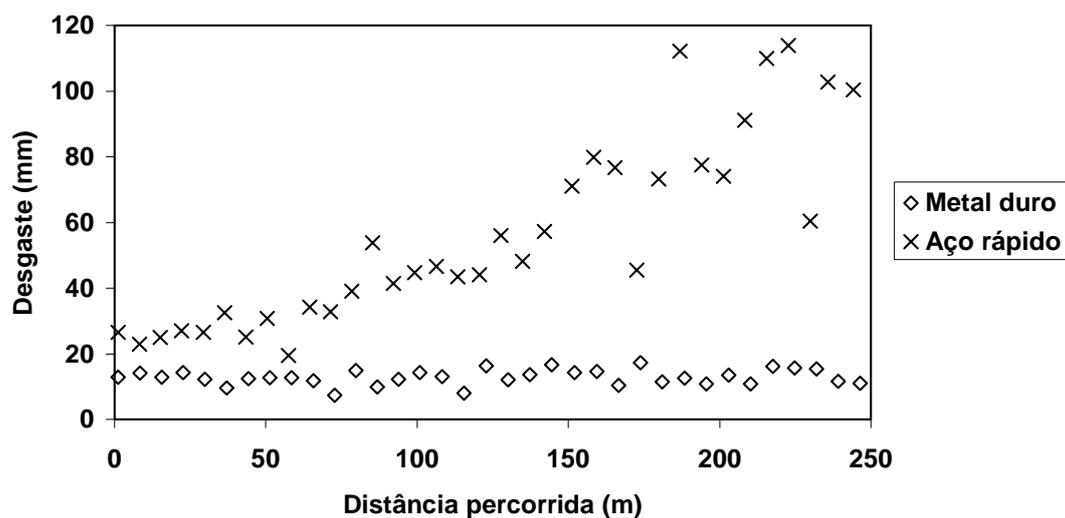


Figura 5.2 - Desgaste em função da distância percorrida no ensaio de esfera sobre disco.

O teste tribométrico (esfera sobre disco) é realizado para avaliar a resistência ao desgaste do material (corpo-de-prova). Nesse teste uma esfera é colocada em contato com a superfície do corpo-de-prova e arrastada sobre a mesma fazendo um risco (sulco). A profundidade desse sulco indica a resistência ao desgaste do material em função da distância percorrida. Ao observar as curvas da figura 5.2 que representam as esferas de aço rápido e metal duro, respectivamente, pode-se dizer que a esfera de aço rápido provocou um maior desgaste (sulco) sobre a superfície do corpo-de-prova (compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro) em comparação à esfera de metal duro. No entanto, esta afirmação não é verdadeira pois o metal duro tem maior dureza que o aço rápido, como se sabe. Portanto, pode-se concluir que o desgaste não foi do corpo-de-prova e sim da esfera de aço rápido. Esta conclusão é um indicativo de que o aço rápido não é um bom material para ser empregado como ferramenta de corte na usinagem de compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro, fato esse que ficará comprovado com os resultados dos testes de furação, que serão apresentados posteriormente.

O resultado do ensaio de esfera sobre disco para coeficiente de atrito utilizando-se esferas de metal duro e aço rápido contra o compósito de resina epóxi reforçado com fibra de vidro é mostrado na figuras 5.3, apresentando curvas com tendências diferentes para as esferas metal duro e aço rápido, respectivamente.

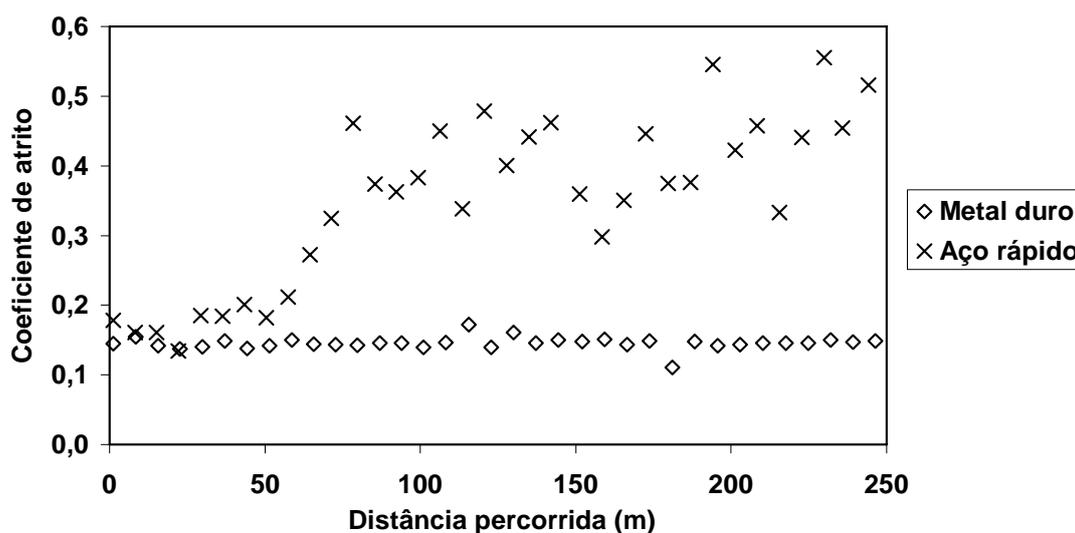


Figura 5.3 - Coeficiente de atrito em função da distância percorrida no ensaio de esfera sobre disco.

A figura 5.3 mostra um aumento crescente do coeficiente de atrito em função da distância percorrida para a esfera de aço rápido. Esse resultado indica que houve um aumento da área de contato entre a esfera e a superfície do corpo-de-prova. Como o teste de desgaste mostrou que a esfera de aço rápido sofreu desgaste, pode-se concluir que ocorreu um achatamento (aplainamento) sobre sua superfície aumentando assim a área de contato entre as superfícies, conseqüentemente o valor do coeficiente de atrito.

Nas figuras 5.4 (a) e (b), são mostradas as fotomicrografias do ensaio de parada rápida *quick stop*. Na fotomicrografia com ampliação de 500 vezes (figura 5.4 b), é possível observar que à frente da cunha de corte não há nenhum início de trinca, apesar de tratar se de um material sem regime plástico, as fibras podem evitar a propagação de trincas, o que mostra que a forma de cisalhamento deste material é diferente das apresentadas pelos materiais metálicos.

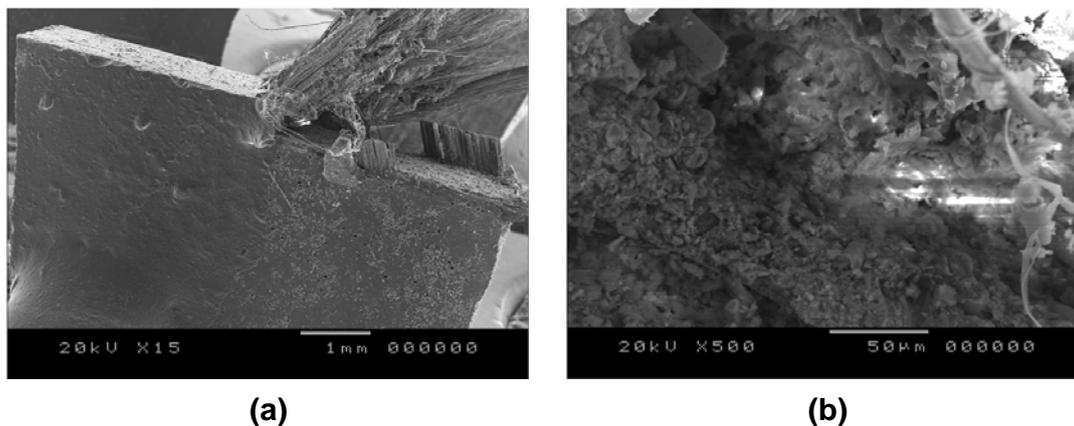


Figura 5.4 - Fotomicrografia do ensaio de parada rápida para o compósito reforçado com fibras:(a) ampliação de 15 vezes, (b) ampliação de 500 vezes.

5.2 Força de Avanço

Os resultados dos testes de furação mostram a influência dos parâmetros de corte (avanço e velocidade de corte), da geometria da ferramenta de corte, da gramatura da fibra de vidro e do material da ferramenta de corte (aço rápido e metal duro) sobre a força de avanço.

5.2.1 Influência da Geometria da Ferramenta de Corte

A figura 5.5 mostra a evolução da força de avanço em função do avanço (média de 3 medições) para diferentes velocidades de corte e tipos de broca. Nota-se um aumento da força de avanço devido ao aumento da área da seção de corte. Já a elevação da velocidade de corte não provocou alteração significativa da força de avanço, provavelmente porque o aumento de temperatura não é suficiente para reduzir a resistência ao cisalhamento do reforço (como seria de se esperar no caso do corte de metais). A geometria pode influenciar porque a forma como a aresta de corte cisalha o material depende muito da interface peça-ferramenta, que é determinada pela geometria da cunha de corte. Nesses testes, ficou evidente que a geometria da ferramenta tem forte influência. Fazendo uma análise do desempenho das brocas, pode-se dizer que a broca de metal duro EDP27199 apresentou os melhores resultados, seguida pelas brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, ficando o pior resultado (força de avanço mais alta) para a broca de metal duro A1167A.

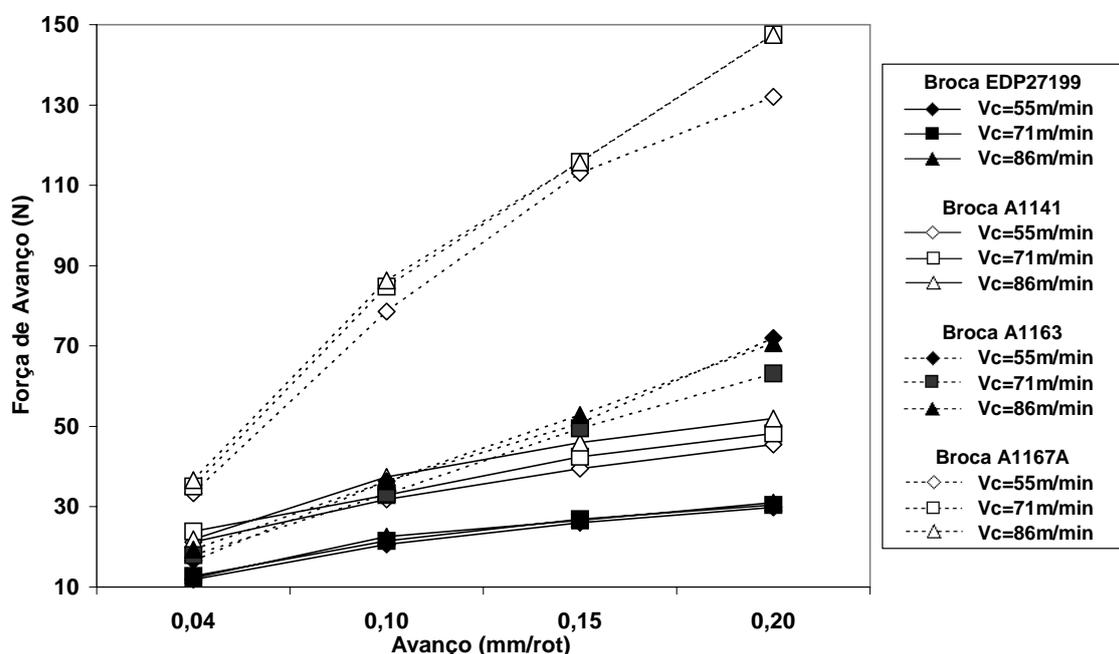


Figura 5.5 - Força de avanço em função do avanço para três velocidades de corte e quatro tipos de brocas.

A justificativa para que a broca EDP27199 apresente melhor resultado reside na forma como a aresta de corte cisalha o material, pois o corte é realizado da borda para o centro do furo por causa do formato da ponta da broca, e isso talvez exija menor força para o corte do material. Além disso, o corte iniciado da extremidade para o centro da broca evita o problema do esmagamento do material da peça no centro da ferramenta (com geometria convencional), visto que nessa região, a velocidade de corte é nula.

As brocas A1141 e A1163, ambas com mesma geometria (ângulo de ponta igual a 118°), mostraram resultados bem semelhantes sob baixos avanços, porém inferiores aos da broca EDP27199, que tem uma geometria de ponta diferente. Isso comprova que a geometria da ferramenta tem influência sobre a força de avanço. Uma observação particular deve ser feita para a curva gerada pela broca A1167A. Nela, o aumento da força foi maior se comparada às demais curvas, e isso também pode ser atribuído à geometria da aresta de corte, já que esta broca tem três arestas de corte e ângulo de ponta igual a 150° , o que faz com que ela tenha uma geometria bem diferente das três brocas que apresentaram melhores resultados. O aumento do ângulo de ponta de 118° para 150° representa um aumento no ângulo de posição (χ_r) da ferramenta de 59° para 75° , responsável pela elevação de F_f .

5.2.2 Influência da Gramatura da Fibra de Reforço

A figura 5.6 apresenta os valores de força de avanço em função do avanço (média de 3 medições) para as três gramaturas de fibras, usando-se a broca de aço rápido A1141 e os parâmetros de corte da tabela 4.4.

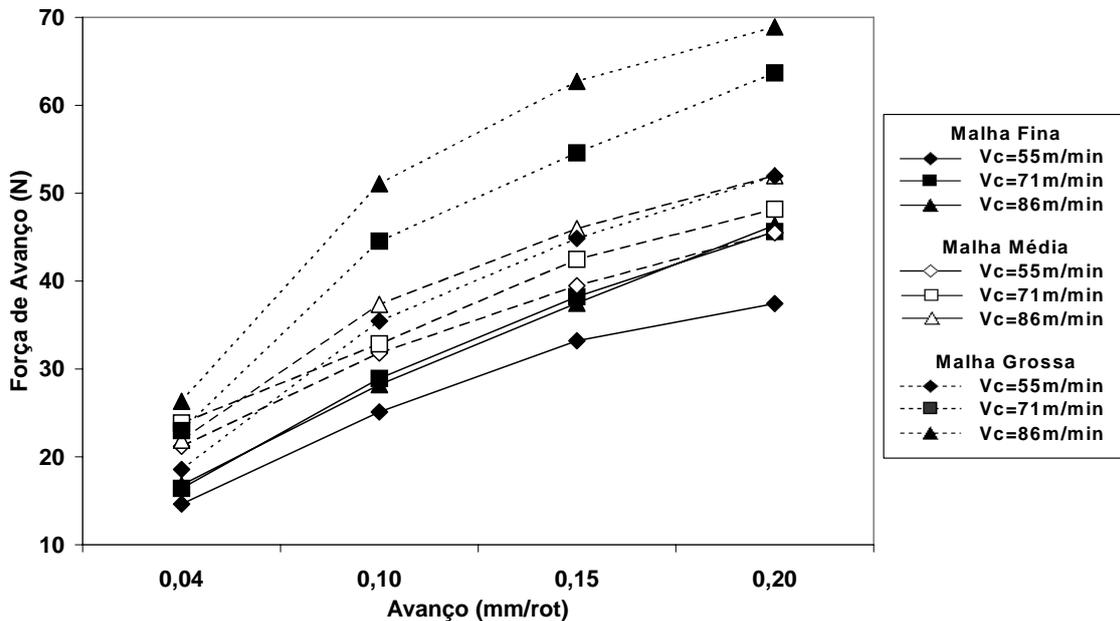


Figura 5.6 - Força de avanço em função do avanço para três gramaturas de malha.

As curvas da figura 5.6 mostram um aumento da força de avanço em função do avanço, o que já foi discutido anteriormente. O resultado que se buscou com esse teste foi verificar a influência que a gramatura da fibra de reforço do compósito possa ter sobre a resistência ao corte desse compósito. Observa-se que, embora o aumento da gramatura do reforço represente força de avanço mais elevada devido ao aumento da resistência do compósito ao cisalhamento, houve sobreposição de alguns resultados, isto é, a força de avanço exigida durante a furação da malha grossa empregando-se $v_c=55\text{m/min}$ foi inferior à força de avanço necessária para furar a malha média com $v_c=86\text{m/min}$. Comportamento análogo é observado entre as malhas média e fina, particularmente sob avanços elevados. Além disso, para as malhas média e grossa fica evidente a elevação da força de avanço com o aumento da velocidade de corte. Esse comportamento inusitado pode estar associado ao maior atrito entre a broca e a parede do compósito, quando são empregadas velocidades de corte mais altas.

5.2.3 *Influência do Desgaste da Ferramenta*

Com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, realizou-se testes de furação com brocas de aço rápido A1141, de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN, empregando-se os parâmetros de corte indicados na tabela 4.4.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam os gráficos de força de avanço em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Ressalta-se que a única diferença entre as ferramentas está no material. Pode-se observar que, enquanto a broca de aço rápido A1141 proporciona um aumento progressivo de força de avanço em função do número de furos, a broca metal duro A1163 não apresentou variação significativa de F_f sob as mesmas condições de corte, o que confirma a superior resistência ao desgaste detectada nos testes de esfera sobre disco. Entre os parâmetros de corte, o avanço foi o que mais afetou o valor da força de avanço, fato que pode ser observado nas curvas dos gráficos das figuras 5.7 e 5.8, porém com mais clareza nas curvas do gráfico das brocas de metal duro A1163 (figura 5.8).

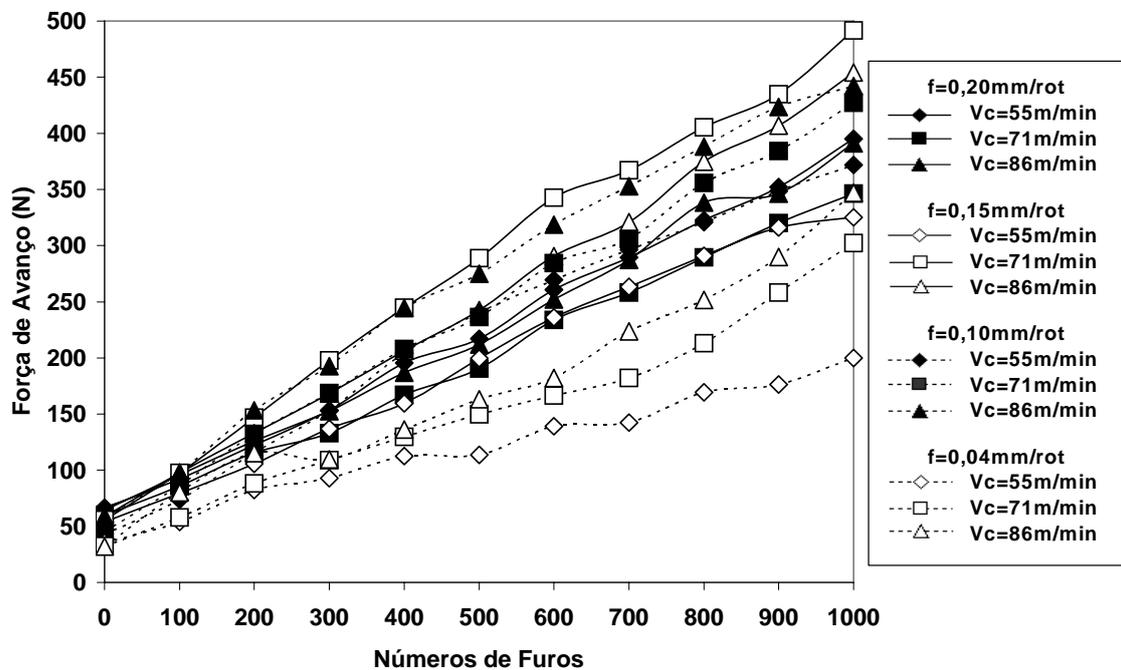


Figura 5.7 - Força de avanço em função do número de furos para a broca de aço rápido A1141.

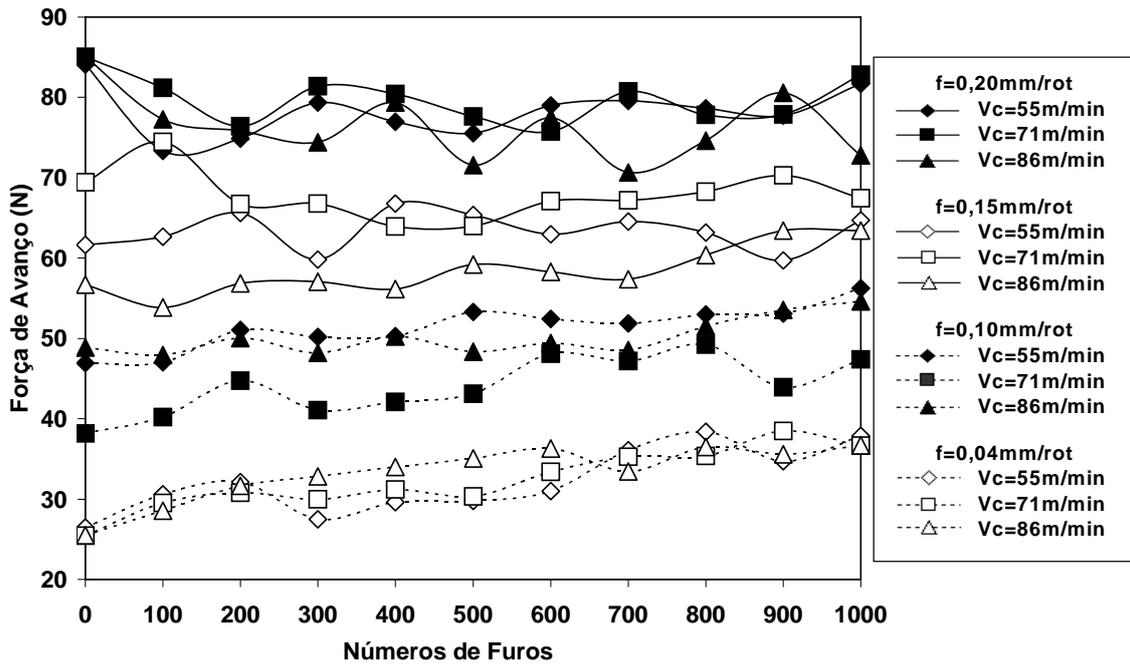


Figura 5.8 - Força de avanço em função do número de furos para a broca de metal duro A1163.

O gráfico da figura 5.9 apresenta curvas formadas por pontos cujo valor da força de avanço foi medido na furação do milésimo furo, para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. O objetivo desse gráfico é mostrar com mais detalhe a influência que os parâmetros de corte exercem sobre a força de avanço, sob condições de desgaste mais acentuado. No gráfico, pode observar que as curvas que representam a broca de aço rápido A1141 tiveram uma alta variabilidade, tanto para o avanço como para a velocidade de corte, sendo maior para o avanço, em comparação com as curvas que representam as brocas de metal duro A1163. A justificativa para essa variabilidade é o desgaste das arestas transversal, principal e secundária de corte das brocas de aço rápido A1141. A condição de corte que resultou em maiores valores para a força de avanço foram avanço de 0,15mm/rot e velocidade de 71m/min (figura 5.7).

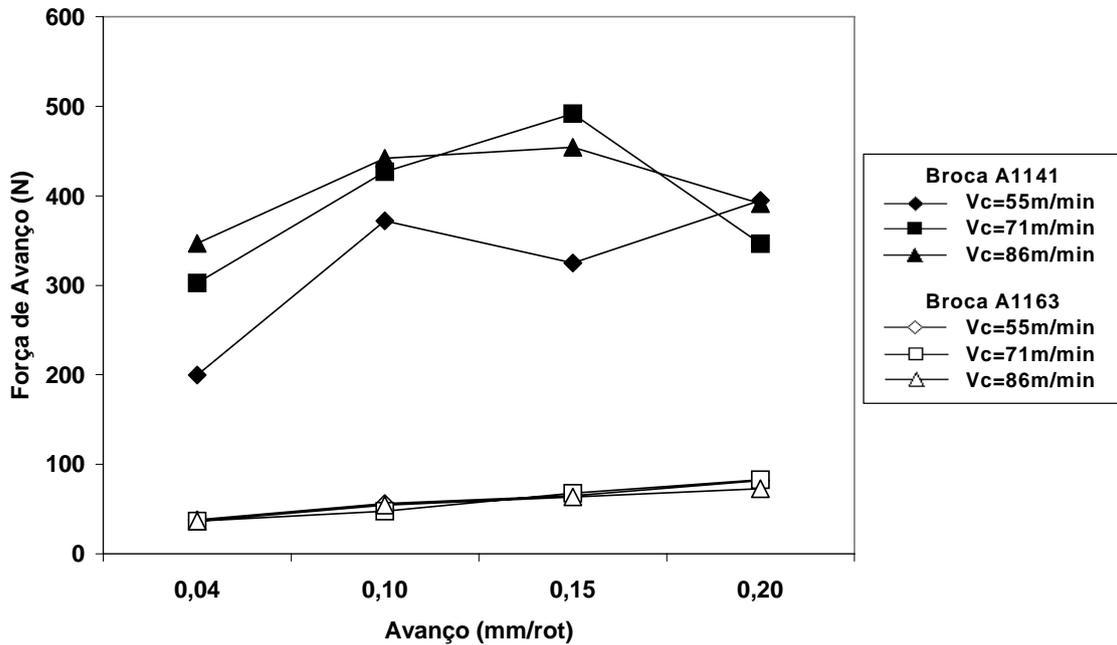


Figura 5.9 - Força de avanço em função do avanço para furação do milésimo furo, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

A tabela 5.1 mostra os resultados de análise de variância para a força de avanço medida na furação do milésimo furo, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Na coluna “p” estão mostrados os efeitos principais de f e v_c . Os resultados apresentados pela broca A1141 demonstram que f e v_c não foram significantes para a força de avanço, considerando-se o nível de significância adotado ($\alpha=5\%$). No entanto, para a broca A1163, a análise de variância mostra que v_c não teve significância para a força de avanço, ao passo que f foi significativa, isto é, a diferença é grande o suficiente tal que seja improvável que tenha ocorrido ao acaso (Drumond et al, 1996).

Tabela 5.1 - Análise de variância para a força de avanço medida na furação do milésimo furo, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

Fator	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Broca A1141						
f(mm/rot)	3	23455	23455	7818	1,62	0,282
Vc(m/min)	2	15259	15259	7630	1,58	0,282
Error	6	29038	29038	4840		
Total	11	67753				
Broca A1163						
f(mm/rot)	3	2886,59	2886,59	962,2	61,93	0,000
Vc(m/min)	2	21,24	21,24	10,62	0,68	0,540
Error	6	93,23	93,23	15,54		
Total	11	3001,06				

Como a broca de metal duro apresentou melhor desempenho, ela foi submetida a uma nova bateria de testes. Nesses novos ensaios, o número de furos foi aumentado, e os parâmetros de corte foram mantidos constantes. O número de furos para cada broca nesses ensaios foi 10000 e os parâmetros de corte escolhidos foram velocidade de corte de 86m/min e avanço de 0,15mm/rot. A escolha dessa condição foi feita baseada no resultado de otimização fornecido pelo *Software* MINITAB, que indicou que os parâmetros que apresentaram valor de F_f mais alto para a broca de aço rápido A1141 foram $v_c=71$ m/min e $f=0,15$ mm/rot, como pode ser visto na figura 5.9. Entretanto, considerando-se que a análise de variância da tabela 5.1 apontou apenas o avanço como fator significativo, optou-se por elevar v_c para 86m/min, e acelerar a realização dos testes, mantendo-se $f=0,15$ mm/rot. No primeiro teste foram empregadas as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN, sendo que cada broca realizou 10000 furos. O objetivo foi investigar a influência do revestimento sobre a força de avanço. Como o desgaste apresentado foi desprezível, no segundo e último testes, foram feitos 24000 furos, empregando-se a broca de metal duro A1163.

A figura 5.10 apresenta o gráfico onde se vê a evolução da força de avanço até o limite de 10000 furos para a broca de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

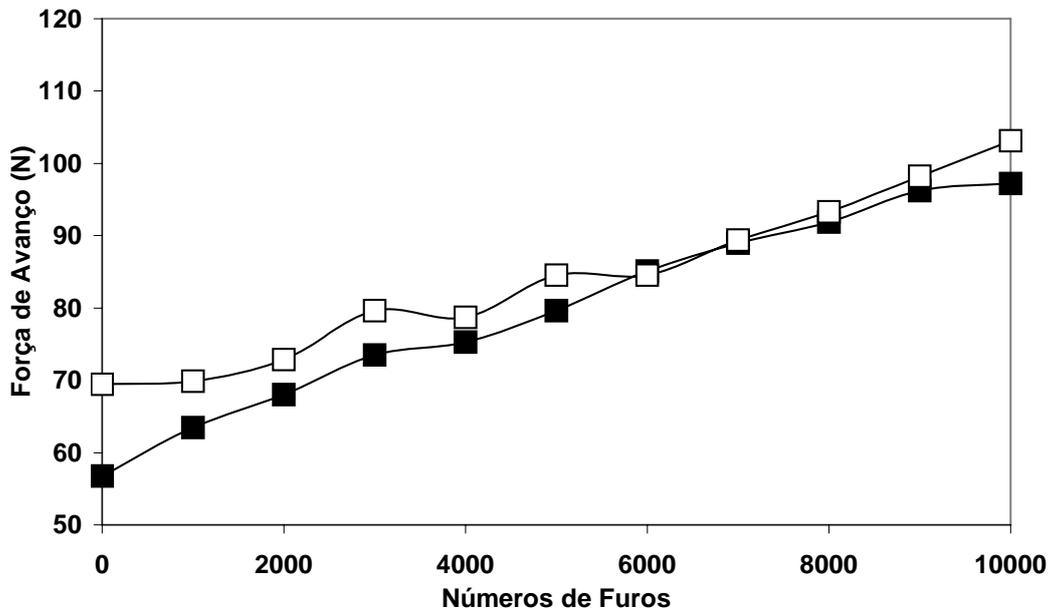


Figura 5.10 - Força de avanço em função do número de furos para as brocas de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

Nesse caso, foi realizada uma réplica com o objetivo de se avaliar a variabilidade do sistema de medição e dos materiais utilizados. A baixa dispersão entre os resultados indica que os materiais, equipamentos e procedimentos empregados são adequados. Observa-se também um discreto aumento da força de avanço, atribuído ao desgaste da ferramenta. Porém, esse desgaste não chegou a afetar o desempenho das ferramentas, nem ficou tão evidente, ou seja, só pôde ser notado com o uso do microscópio, como será mostrado posteriormente.

Com o objetivo de se avaliar a influência do revestimento da ferramenta sobre a força de avanço, um segundo teste com 10000 furos foi executado, usando-se a broca de metal duro revestida A1163TiN e empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$ A figura 5.11 compara o desempenho da broca revestida com TiN com o desempenho da broca sem revestimento.

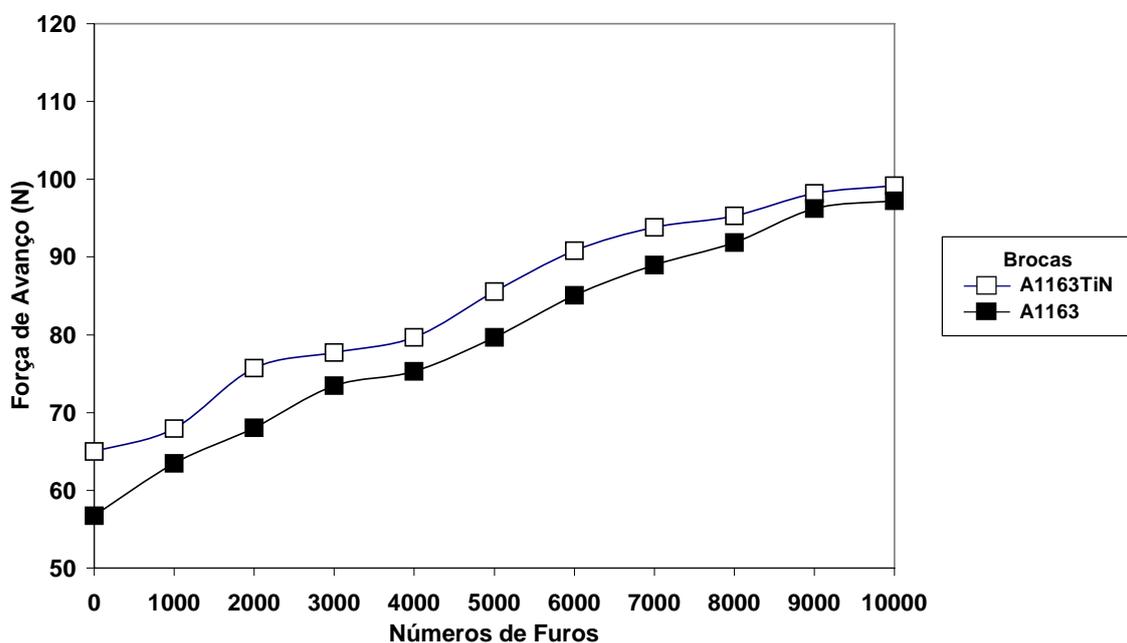


Figura 5.11 - Força de avanço em função do número de furos para as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN.

As curvas mostram tendências semelhantes para as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN, porém com a força de avanço maior para a broca de metal duro revestida A1163TiN. Esse aumento da força de avanço para a broca revestida pode ser atribuído aos gumes das arestas principal e secundária de corte, que apresenta arredondamento devido ao recobrimento. Essa conclusão vem comprovar mais uma vez que a geometria da aresta de corte tem influência considerável sobre a força de avanço.

Um outro resultado que esse ensaio apresentou é que parte do revestimento de nitreto de titânio (TiN) foi removido das arestas principal e secundária de corte, devido a abrasividade da fibra de vidro, porém, a geometria da aresta de corte não sofreu nenhum dano (vide fotomicrografias da tabela 5.7), o que comprova que o revestimento foi eficaz na proteção das arestas principal e secundária de corte.

Finalmente, o teste com a broca de metal duro A1163 foi conduzido sob a mesma condição de corte até que o número de furos chegasse a 24000, conforme ilustra a figura 5.12. Como nos resultados anteriores, a curva nesse gráfico também tem uma inclinação ascendente, mostrando um aumento na força de avanço. Esse aumento é atribuído ao desgaste das arestas de corte. Entretanto, esse desgaste não chegou a afetar de forma significativa o desempenho da broca de metal duro A1163, visto que, após 24000 furos, a força de avanço aproximou-se de 150N, enquanto a broca de aço rápido A1141 proporcionou $F_f=450\text{N}$ após 1000 furos.

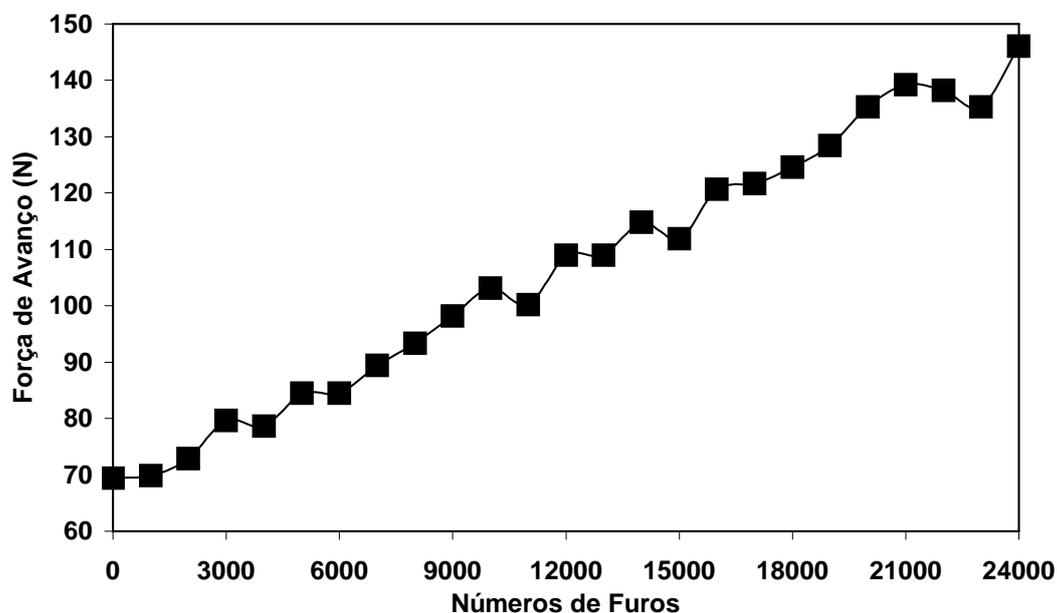


Figura 5.12 - Força de avanço em função do número de furos, para a broca de metal duro A1163 empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

5.3 Desgaste das Ferramentas de Corte

A seguir, serão apresentadas fotografias obtidas pelo sistema de aquisição de imagens e fotomicrografias produzidas pelo microscópio eletrônico de varredura das ferramentas de corte utilizadas sob condições distintas.

O objetivo desta etapa consiste em avaliar o comportamento das brocas sob condições distintas, além de identificar os mecanismos de desgastes envolvidos na furação de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro. As fotografias e fotomicrografias das tabelas seguintes mostram o desgaste da ponta das ferramentas em função dos parâmetros de corte (tabelas 5.2, 5.3 e 5.4), do número de furos (tabelas 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8) e da presença do revestimento (tabelas 5.6 e 5.7). Não são apresentadas todas as condições de corte indicadas na tabela 4.4, apenas as condições extremas de velocidade de corte (55m/min e 86m/min) e avanço (0,05mm/rot e 0,20mm/rot).

Ao observar as fotografias da tabela 5.2, pode-se ver o desgaste nas pontas das brocas de aço rápido A1141, após a execução de 1000 furos, sendo que esse desgaste não ocorreu com a broca de metal duro A1163 sob os mesmos parâmetros de corte e número de furos. Isso demonstra que o aço rápido tem menor resistência ao desgaste para furar compósito polimérico reforçado com fibras de vidro. O desgaste ocorreu na ponta e nas arestas principal e secundária da broca. Pode-se notar ainda que para a broca de aço rápido A1141, há uma variação na intensidade do desgaste em função dos parâmetros de corte, sendo que o parâmetro que mais influenciou foi o avanço. Isso pode ter ocorrido devido ao maior número de vezes em que a broca passa sobre a superfície da parede do furo, quando se empregam baixos valores de avanços, ou seja, a ponta da broca fica em contato com a parede do furo, sofrendo atrito por um tempo mais longo. Embora tenha-se observado um desgaste acentuado quando se usa a ferramenta A1141 com $f=0,04\text{mm/rot}$, esse desgaste não foi suficiente para elevar a força de avanço de maneira considerável, como mostram as figuras 5.7 e 5.9.

Tabela 5.2 - Fotografias das pontas das brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, após os furos 1 e 1000.

		Brocas			
		A1141		A1163	
Vc (m/min)	f (mm/rot)	Furo 01	Furo 1000	Furo 01	Furo 1000
55	0,04				
	0,20				
86	0,04				
	0,20				

Uma fotomicrografia da broca de aço rápido A1141, tirada com o microscópio eletrônico de varredura, é ilustrada na figura 5.13, e tem como objetivo mostrar por um outro ângulo como se inicia o desgaste sofrido pela broca. Nesse caso, a broca foi utilizada nos testes de força de avanço, empregando-se todos os parâmetros de corte da tabela 4.4. Pode-se observar na ampliação de 350 vezes o desgaste da aresta transversal; e na de 750 vezes, que as arestas apresentam sulcos perpendiculares às arestas principal e secundária de corte. Esses desgastes foram produzidos possivelmente pelo atrito com as fibras de vidro e indicam que abrasão é o principal mecanismo de desgaste presente.

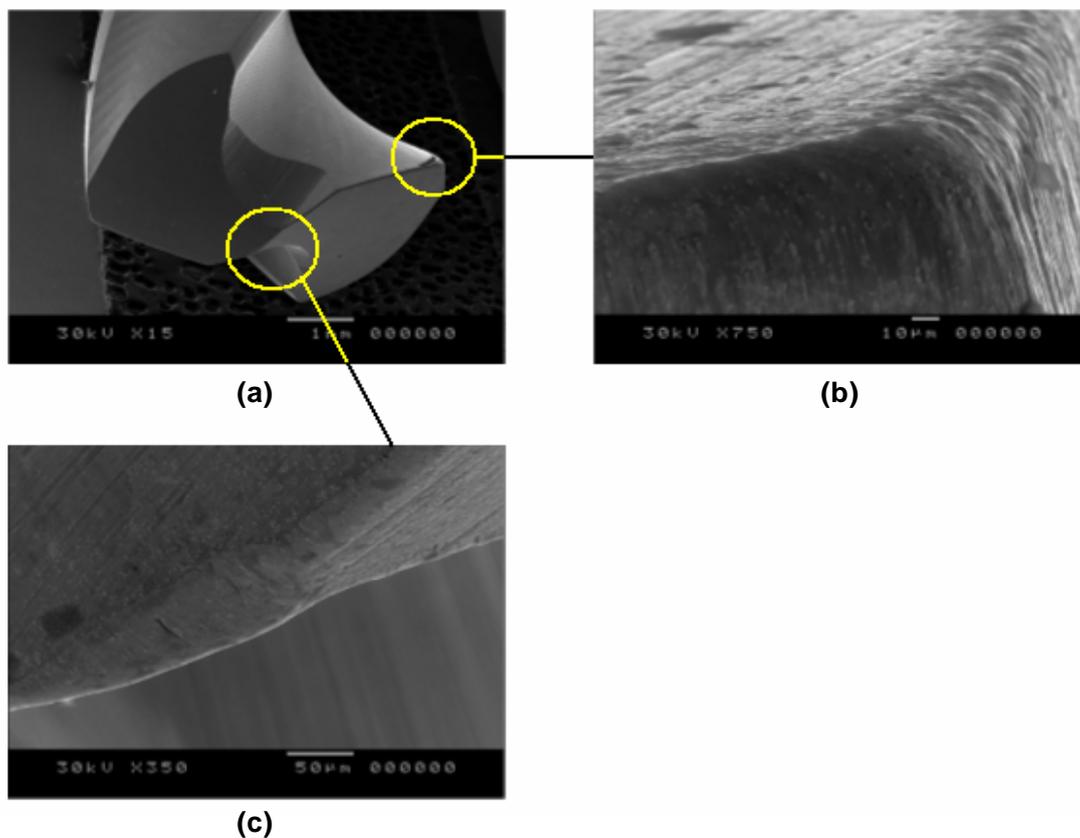


Figura 5.13 - Fotomicrografia do desgaste das arestas transversal, principal e secundária da broca de aço rápido A1141: (a) ampliação de 15 vezes, (b) ampliação de 350 vezes e (c) ampliação de 750 vezes.

Nas tabelas 5.3 e 5.4 têm-se as fotomicrografias que mostram com mais detalhes as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Nessas fotomicrografias, pode-se ver que apenas a broca A1141 sofreu desgaste mais acentuado e que esse desgaste provavelmente é também de origem abrasiva. Pode-se afirmar ainda que não há nenhum vestígio de deformação plástica, desgaste de cratera, lascamento, quebra ou trinca de origem térmica ou mecânica. Em contraste, a broca A1163 apresenta-se com desgaste mínimo, porém mais evidente quando o avanço mais baixo é usado.

Tabela 5.3 - Fotomicrografias da broca de aço rápido A1141 após 1000 furos para diferentes parâmetros de corte.

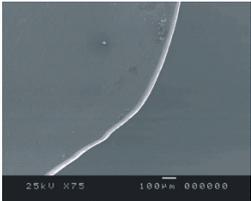
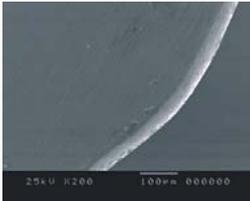
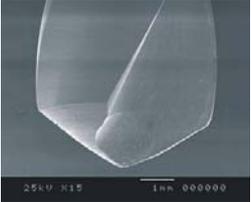
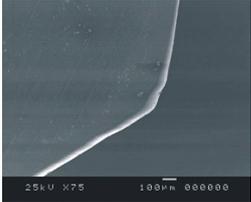
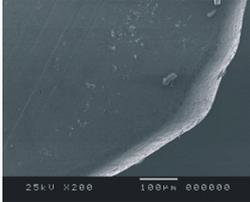
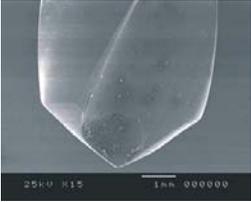
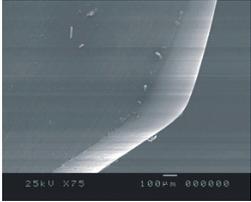
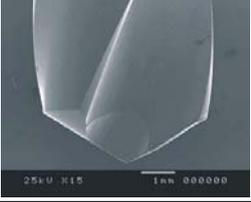
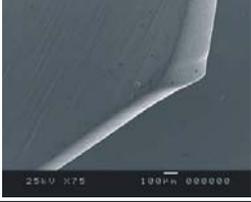
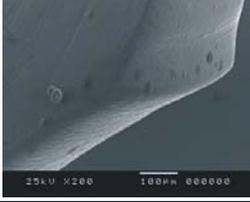
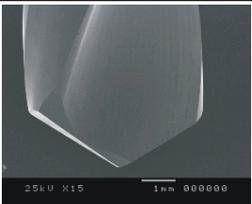
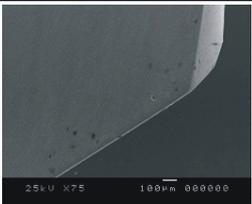
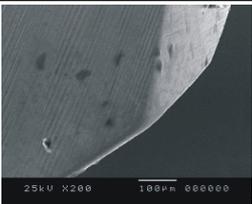
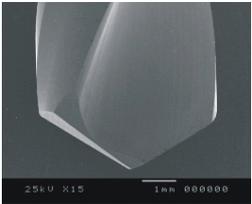
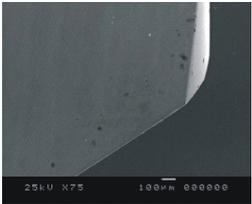
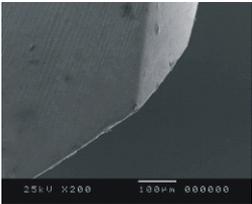
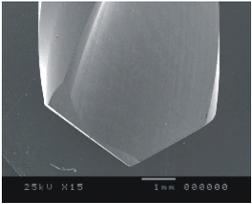
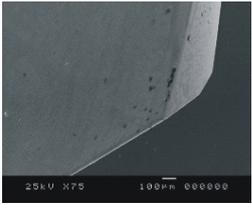
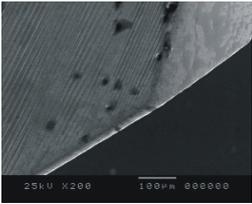
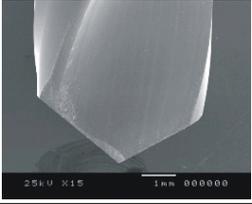
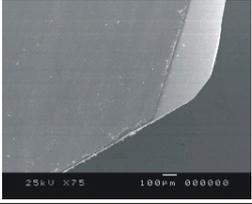
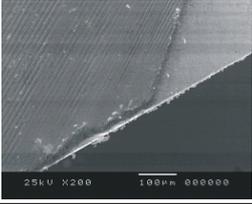
Parâmetros de Corte		Broca A1141		
		Ampliação		
Vc (m/min)	f (mm/rot)	x15	x75	x200
55	0,04			
	0,20			
86	0,04			
	0,20			

Tabela 5.4 - Fotomicrografias da broca de metal duro A1163 após 1000 furos para diferentes parâmetros de corte.

Parâmetros de Corte		Broca A1163		
		Ampliação		
Vc (m/min)	f (mm/rot)	x15	x75	x200
55	0,04			
	0,20			
86	0,04			
	0,20			

A tabela 5.5 apresenta uma seqüência de fotografias da broca de aço rápido A1141 com o desgaste das arestas principal e secundária de corte a cada 100 furos, para que se possa observar a evolução do desgaste. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte igual a 86m/min e avanço igual a 0,04mm/rot, responsáveis pelo desgaste mais intenso.

Tabela 5.5 - Evolução do desgaste da broca de aço rápido A1141 em função do número de furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot.}$

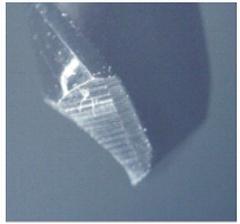


Fazendo-se uma análise da seqüência mostrada na tabela 5.5, observa-se que o desgaste evolui de forma gradual. Esse desgaste afeta de forma significativa a força de avanço, como demonstrado na figura 5.7, e a qualidade do furo, como será visto mais à frente nos resultados relativos à delaminação.

Como já foi dito, a broca de metal duro A1163 apresentou o melhor desempenho e por isso foi submetida a uma nova bateria de testes. Nesses novos ensaios, o número de furos foi aumentado e os parâmetros de corte foram mantidos constantes. A seqüência de fotografias dessa broca, juntamente com a broca de metal duro revestida A1163TiN e de aço rápido A1141 são apresentadas na tabela 5.6. Essas fotografias tiradas com o sistema de aquisição de imagem são das brocas virgens e após 1000, 10000, 20000 e 24000 furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

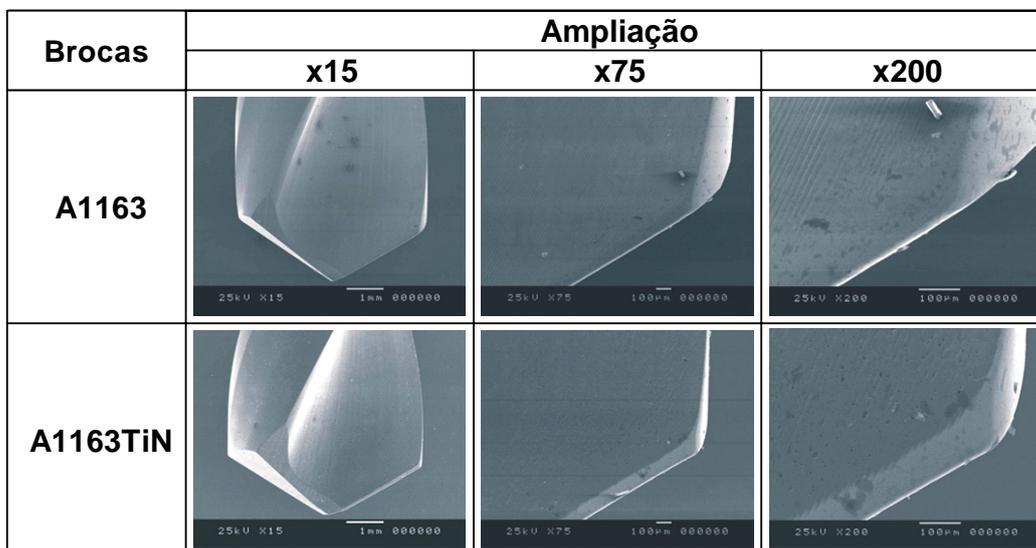
Nessa seqüência, só é possível observar o desgaste da broca de aço rápido A1141. Para as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestido A1163TiN, serão apresentadas fotomicrografias com o objetivo de se mostrar em detalhe a ponta dessas ferramentas.

Tabela 5.6 - Fotografias das pontas e arestas principal e secundária de corte para as brocas de metal duro A1163, de metal duro revestido A1163TiN e de aço rápido A1141, após os furos 1, 1000, 10000, 20000 e 24000.

Furos	Brocas		
	A1163	A1163TiN	A1141
1			
1000			
10000			
20000			
24000			

Na tabela 5.7, são mostradas fotomicrografias das brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN. Essas fotomicrografias foram tiradas depois de a broca ter feito 10000 furos com os mesmos parâmetros de corte ($v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$).

Tabela 5.7 - Fotomicrografias das brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestido A1163TiN, após 10000 furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

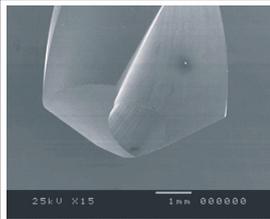
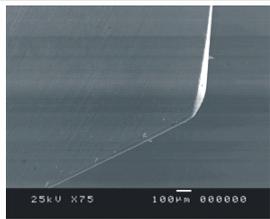
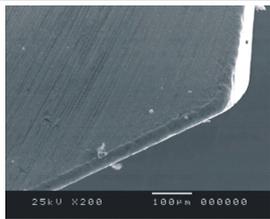
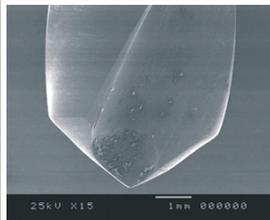
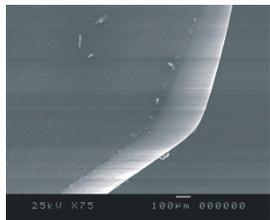
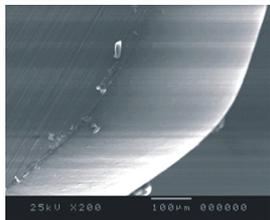


Fazendo-se uma análise das fotomicrografias, pode-se afirmar que a broca A1163 começa a sofrer desgaste, evidenciado pelo arredondamento das arestas principal e secundária de corte, mas que ainda não compromete o seu desempenho. Pode-se afirmar também que a broca A1163TiN não sofreu nenhuma avaria. Como observação, é preciso citar que o revestimento de nitreto de titânio (TiN) da broca A1163TiN foi removido das arestas principal e secundária de corte após os 10000 furos. Essa remoção ocorreu devido à abrasividade das fibras de vidro que reforçavam o compósito. Nota-se que a broca A1163TiN mantém uma geometria mais próxima da original, enquanto que a broca A1163 apresenta arredondamento das arestas principal e secundária de corte juntamente com a ponta, por desgaste abrasivo. Embora o revestimento tenha provocado um aumento da força de avanço (figura 5.11), com o arredondamento da ponta e dos gumes das arestas principal e secundária de corte, devido ao recobrimento, como já foi dito, sua dureza manteve as arestas e a ponta da ferramenta intacta, ou seja, sem desgaste por mais tempo.

Como 10000 furos não foram suficientes para provocar desgaste na broca de metal duro A1163, que viesse a prejudicar o seu desempenho foram feitos mais 14000 furos com a mesma ferramenta, totalizando 24000 furos. Na tabela 5.8, são mostradas a fotomicrografias da broca de metal duro A1163. As fotomicrografias da broca sem

desgaste foram apresentadas com o objetivo de facilitar a visualização do desgaste, já que esse desgaste não ficou tão evidente como o apresentado pela broca de aço rápido A1141. Nessas fotomicrografias, é possível ver que a ponta e as arestas principal e secundária de corte começam a apresentar desgaste, ou seja, arredondamento das arestas como na broca de aço rápido A1141. Também é evidente a redução gradativa do diâmetro da ferramenta na ampliação de 15 vezes. Porém, esses níveis de desgaste não foram suficientes para prejudicar o desempenho da broca em termos de qualidade do furo, mostrado a seguir, e resultaram em pequena elevação na força de avanço, como apresentado na figura 5.12.

Tabela 5.8 - Fotomicrografia da broca de metal duro A1163 após 24000 furos empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

Broca A1163	Ampliação		
	x15	x75	x200
Virgem			
Após 24000 furos			

5.4 Delaminação do Corpo-de-Prova

A seguir, serão apresentados os resultados referentes à delaminação na entrada e na saída dos furos em função do tipo de broca, dos parâmetros de corte, da gramatura da fibra de reforço e do número de furos. Foram utilizadas as condições de corte da tabela 4.4.

5.4.1 Influência do Tipo de Broca

A influência do tipo de broca (material e geometria) e dos parâmetros de corte sobre a delaminação na entrada e na saída do primeiro furo é apresentada nas tabelas 5.9 a 5.12.

Tabela 5.9 - Delaminação na entrada e saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro EDP27199.

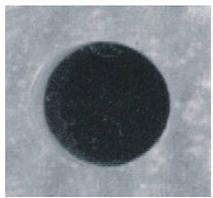
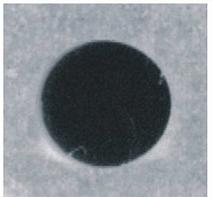
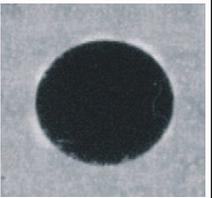
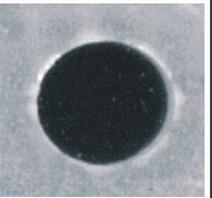
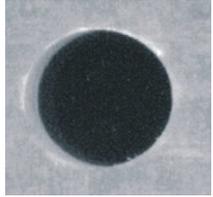
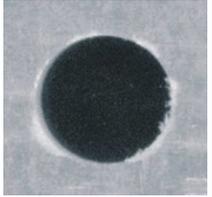
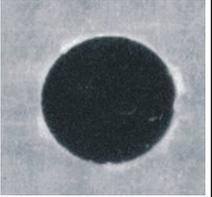
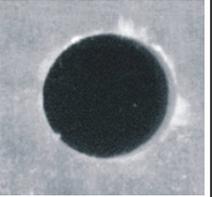
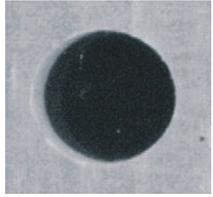
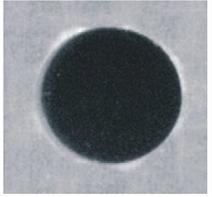
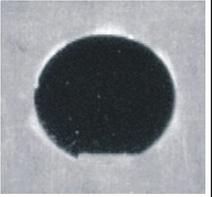
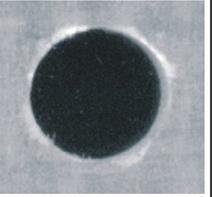
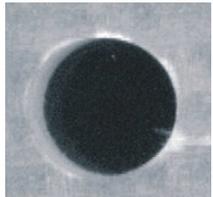
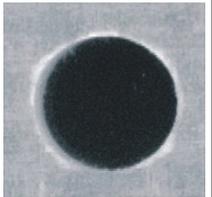
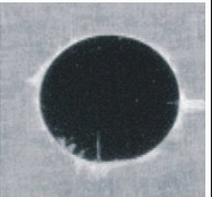
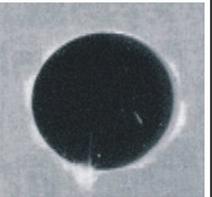
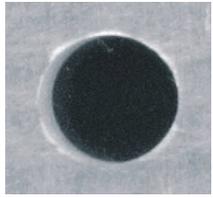
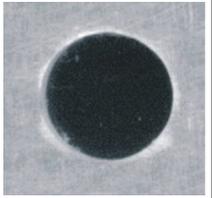
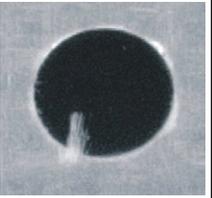
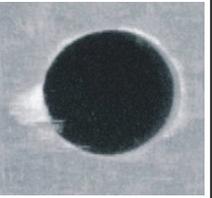
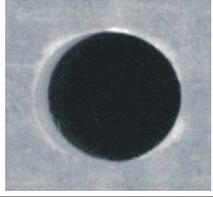
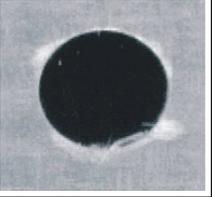
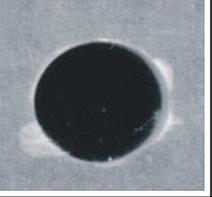
Broca EDP27199				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

Tabela 5.10 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de aço rápido A1141.

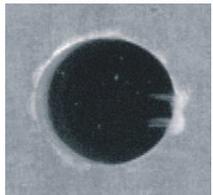
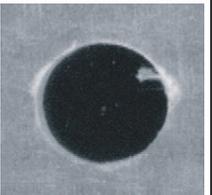
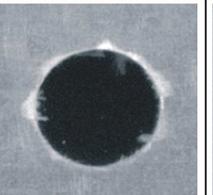
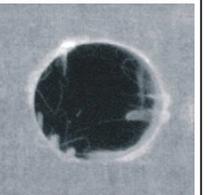
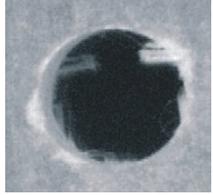
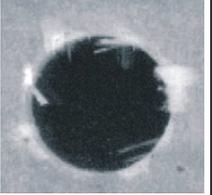
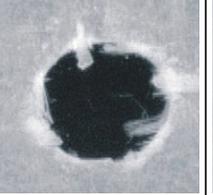
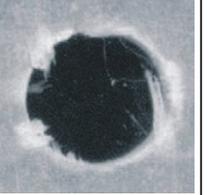
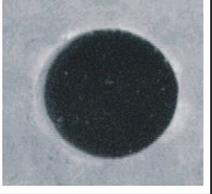
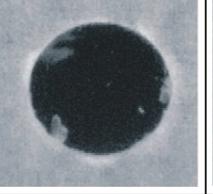
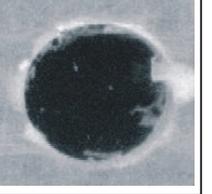
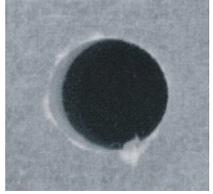
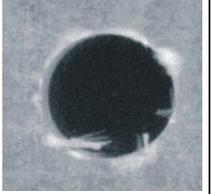
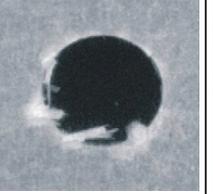
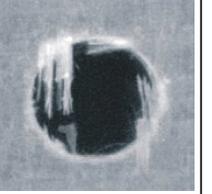
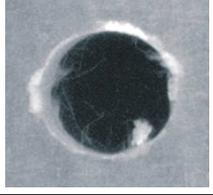
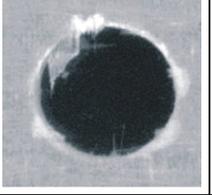
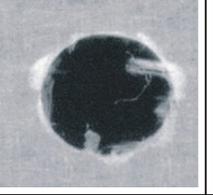
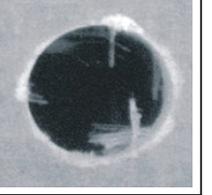
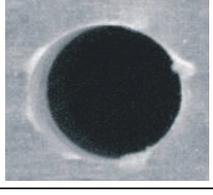
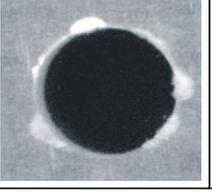
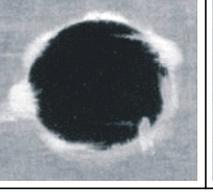
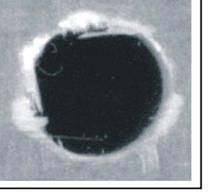
Broca A1141				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

Tabela 5.11 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro A1163.

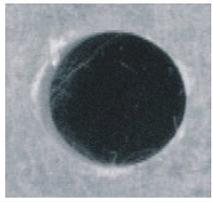
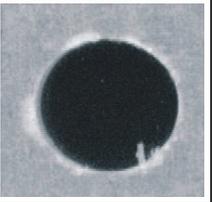
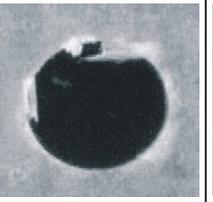
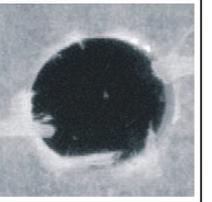
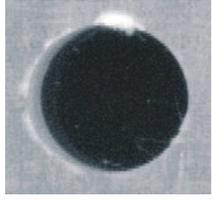
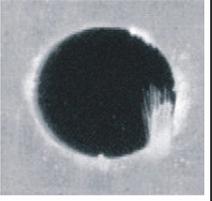
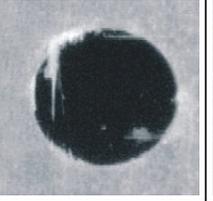
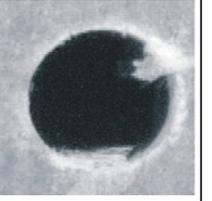
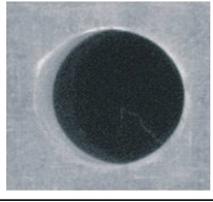
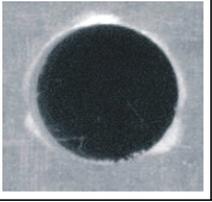
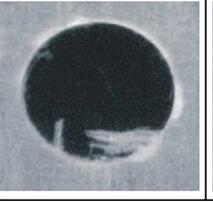
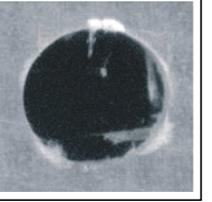
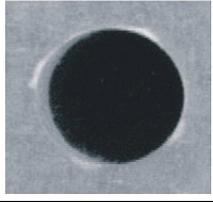
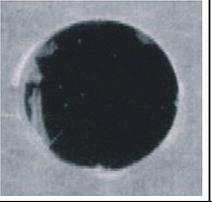
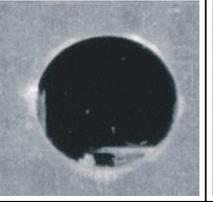
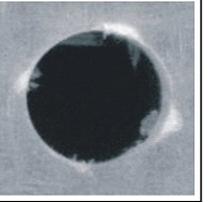
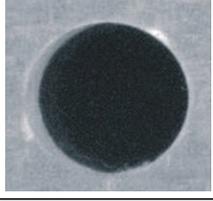
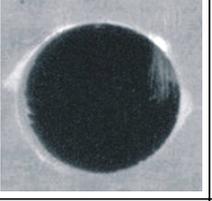
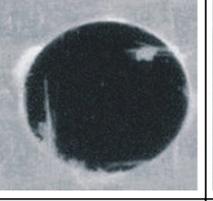
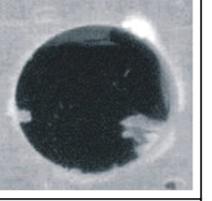
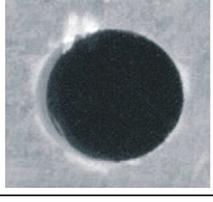
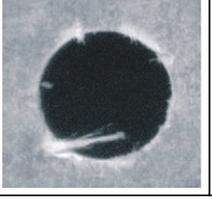
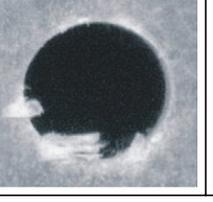
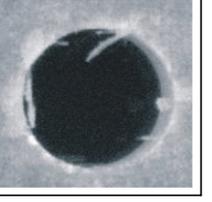
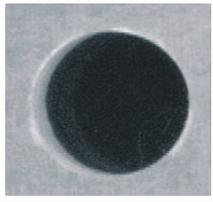
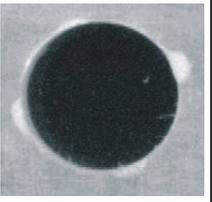
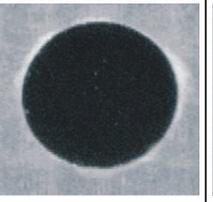
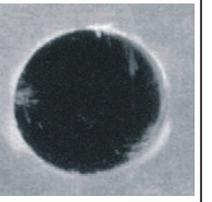
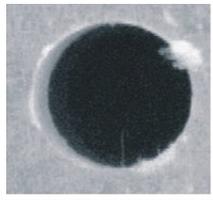
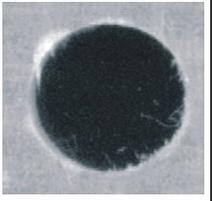
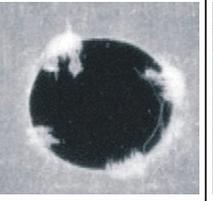
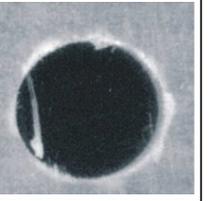
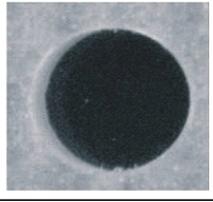
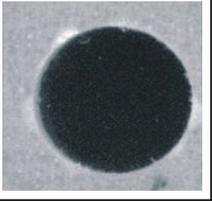
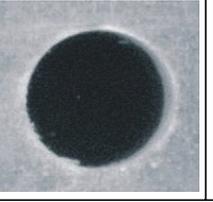
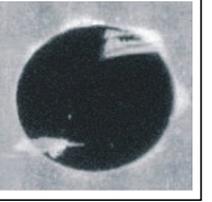
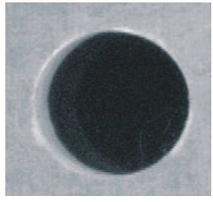
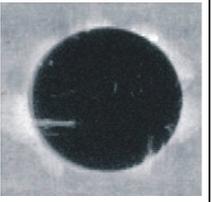
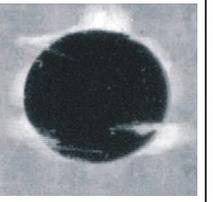
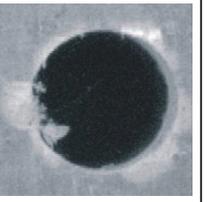
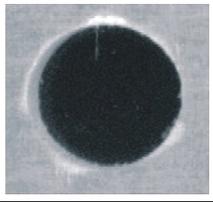
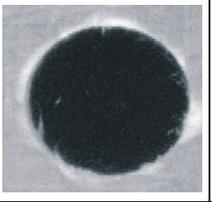
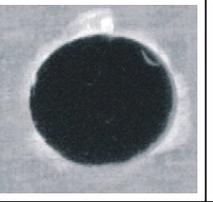
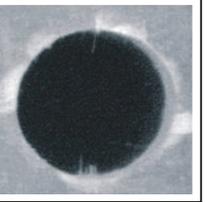
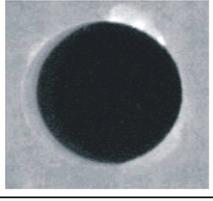
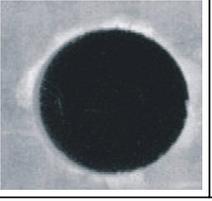
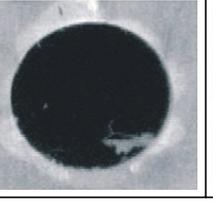
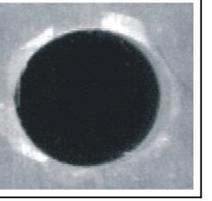
Broca A1163				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

Tabela 5.12 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito com a broca de metal duro A1167A.

Broca A1167A				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

De uma maneira geral, analisando-se as fotografias dos furos das tabelas de 5.9 a 5.12, observa-se que o avanço foi o parâmetro de corte que teve maior influência sobre a delaminação (ou seja, maior avanço maior delaminação), enquanto que a velocidade de corte teve uma influência discreta.

Entre as brocas, a que apresentou melhores resultados foi a broca de metal duro EDP27199, seguida pela broca de metal duro A1167A, e os piores resultados foram alcançados pelas brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Pode-se afirmar ainda que a geometria da ferramenta de corte tem influência sobre a delaminação, pois as brocas A1141 e A1163, que têm ângulo de ponta igual, apresentaram furos com delaminação semelhantes, ao passo que as outras duas brocas mostraram resultados melhores, mas diferentes entre si, por possuíam geometrias diferentes.

A geometria da broca de metal duro EDP27199 mostrou-se mais apropriada porque nela o cisalhamento do compósito ocorre da parte mais externa da broca (onde o diâmetro e a velocidade de corte são altas) para seu interior. Dessa forma, não há o esmagamento do material no centro da broca, e tanto a força de avanço como a delaminação são mínimas.

Outro fato que deve ser discutido é a influência da força de avanço sobre a delaminação, pois se esperava que com a elevação da força de avanço, a delaminação também aumentasse. Porém, isso não foi observado nos resultados apresentados. Comparando-se os furos das tabelas 5.10 e 5.11, que foram feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, respectivamente, com os da tabela 5.12 (feitos com a broca de metal duro A1167A), pode-se observar que os resultados da broca de metal duro A1167A foram bem melhores que os das brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163; no entanto, a maior força de avanço foi proporcionada pela broca de metal duro A1167A. Esse fato pode estar relacionado com o mecanismo de corte, ou seja, com a forma com que a cunha de corte cisalha as fibras de reforço, pois as geometrias das ferramentas de corte são diferentes.

Deve-se salientar ainda com relação ao aumento da força que não foi verificada nenhuma alteração significativa nos danos na entrada e na saída do furo, ao contrário do que sugere a revisão bibliográfica. Esse fato pode ser atribuído às dimensões reduzidas dos corpos-de-prova (65mm x 90mm) e ao sistema de fixação composto por duas placas de alumínio, o que provavelmente evitou a deflexão excessiva da placa de compósito e, conseqüentemente, danos mais severos na saída do furo.

5.4.2 *Influência da Gramatura da Fibra*

As fotografias mostradas nas tabelas 5.13 a 5.15 apresentam os resultados de delaminação após a furação dos compósitos de malhas fina, média e grossa, usando-se as condições de corte da tabela 4.4 e a broca de aço rápido A1141. Tendo em vista que entre as brocas testadas esta foi a que apresentou os piores resultados, ela foi utilizada nesses testes para evidenciar possíveis diferenças entre as três gramaturas. Essas fotografias foram obtidas com o *scanner*.

Observando-se as tabelas 5.13 a 5.15, pode-se afirmar que a delaminação para as três malhas foram semelhante, indicando que a espessura das fibras não exerce forte influência sobre a delaminação. O avanço teve uma pequena influência sobre a delaminação das malhas média e grossa, sendo que o mesmo não pode ser afirmado para a malha fina, que apresentou delaminação intensa para todos os parâmetros de corte.

Tabela 5.13 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha fina, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.

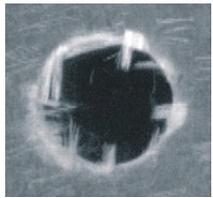
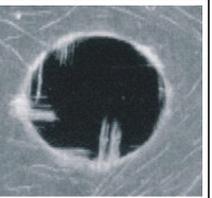
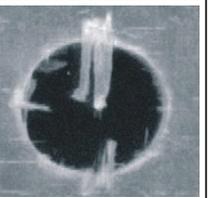
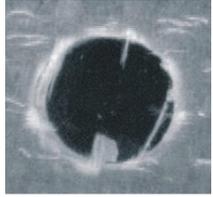
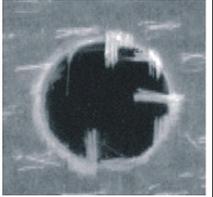
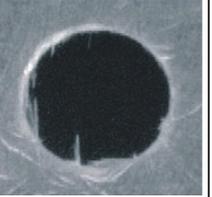
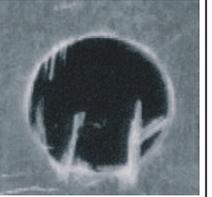
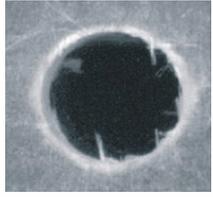
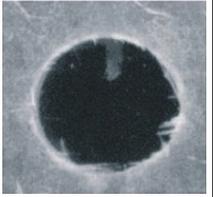
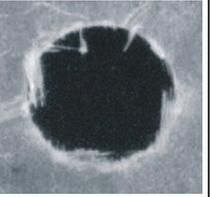
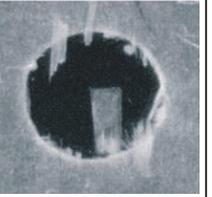
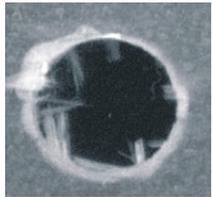
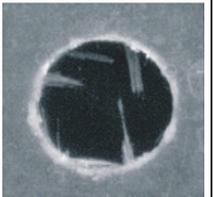
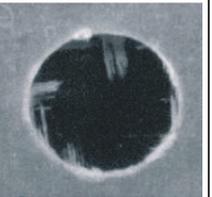
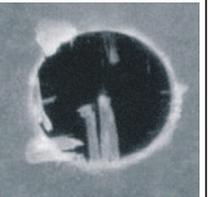
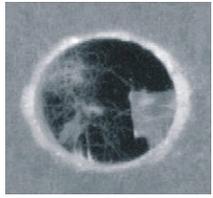
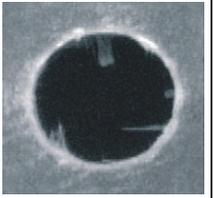
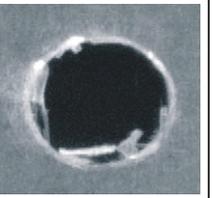
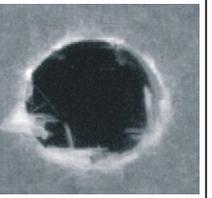
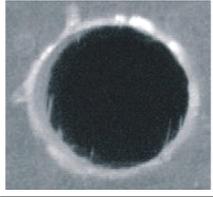
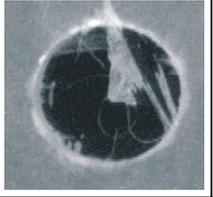
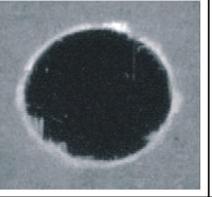
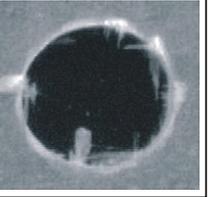
Malha Fina				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

Tabela 5.14 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha média, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.

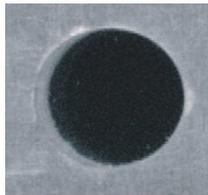
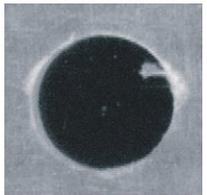
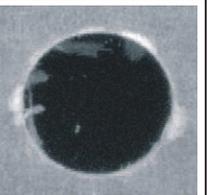
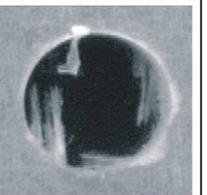
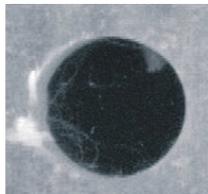
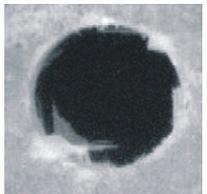
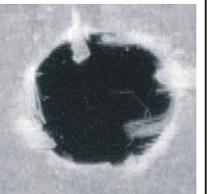
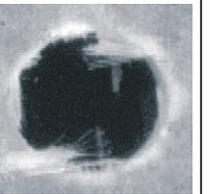
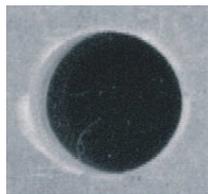
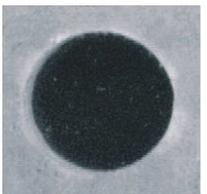
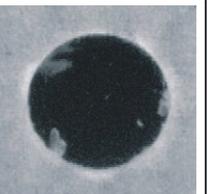
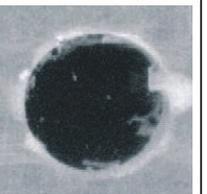
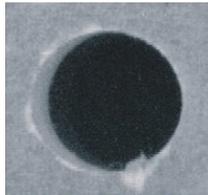
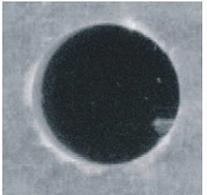
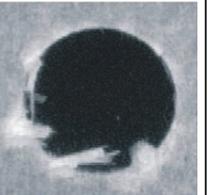
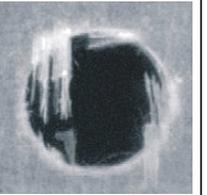
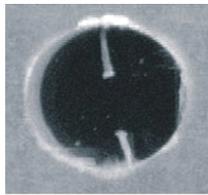
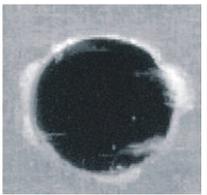
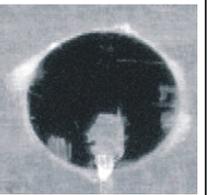
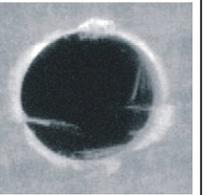
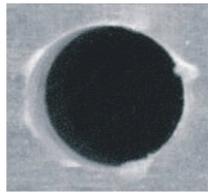
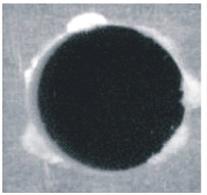
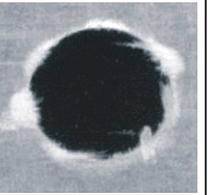
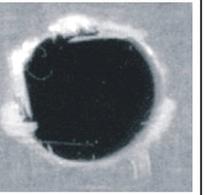
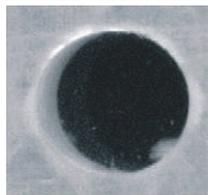
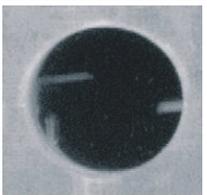
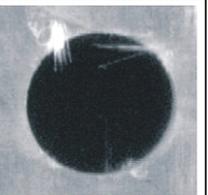
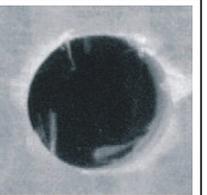
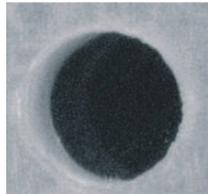
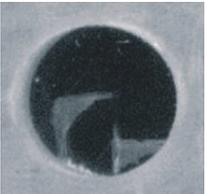
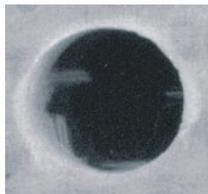
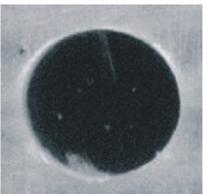
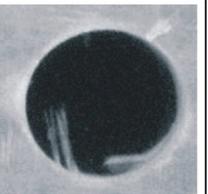
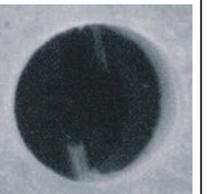
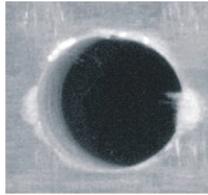
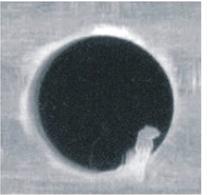
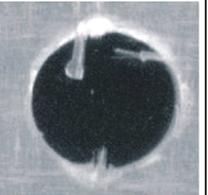
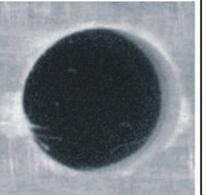
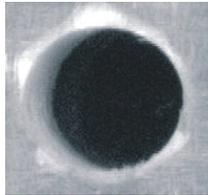
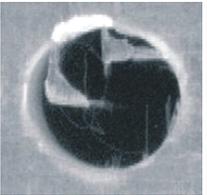
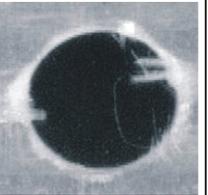
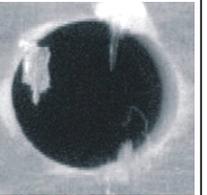
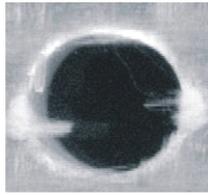
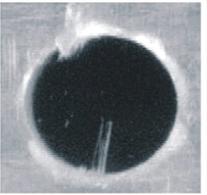
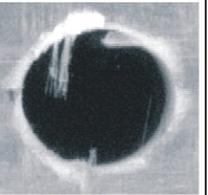
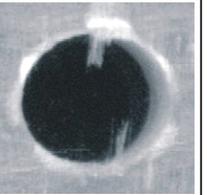
Malha Média				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

Tabela 5.15 - Delaminação na entrada e na saída dos furos, após a furação do compósito de malha grossa, utilizando-se a broca de aço rápido A1141.

Malha Grossa				
Entrada do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				
Saída do Furo				
f (mm/rot)				
Vc (m/min)	0,04	0,10	0,15	0,20
55				
71				
86				

5.4.3 *Influência do Número de Furos*

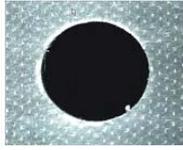
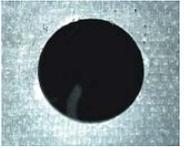
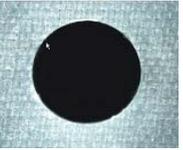
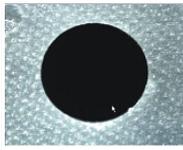
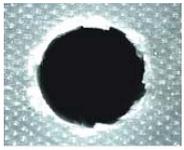
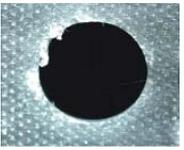
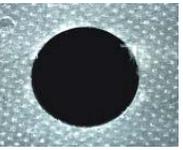
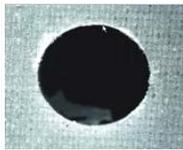
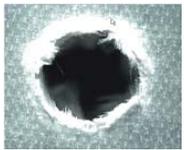
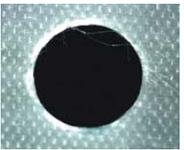
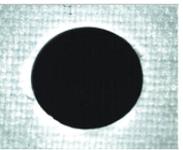
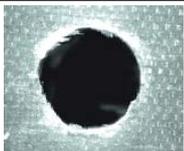
As tabelas 5.16 a 5.18 mostram a delaminação na entrada e na saída dos furos em função do número de furos para tipos de brocas e condições de cortes distintos. Esses resultados foram obtidos com o sistema de aquisição de imagens.

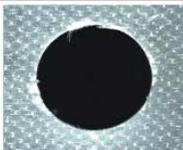
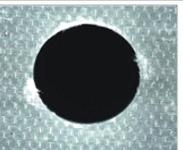
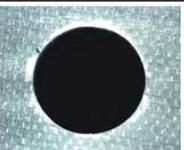
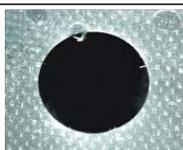
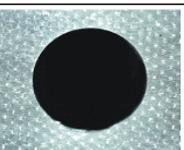
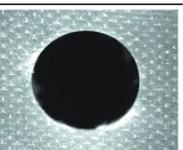
Na tabela 5.16, são mostrados os resultados para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. As fotografias são dos furos 1 e 1000, e os parâmetros de corte correspondem somente às velocidades de 55m/min e 86m/min e aos avanços de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot, que foram os valores mínimos e máximos empregados nos testes.

Fazendo-se uma análise da qualidade dos furos feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, pode-se concluir que a broca de metal duro A1163 teve melhor desempenho, visto que os furos não apresentaram alteração significativa nos danos em sua entrada e em sua saída. Esse fato já era esperado, pois a broca não sofreu nenhum desgaste em suas arestas de corte após a furação de 1000 furos, como já foi demonstrado, ao contrário do que aconteceu com a entrada e na saída dos furos feitos com a broca de aço rápido A1141, que apresentou um elevado desgaste em suas arestas principal e secundária de corte.

Um outro fato que deve ser observado é que mais uma vez o avanço teve maior influência sobre a delaminação. Como se pode ver na tabela 5.16, a variação da velocidade de corte não causou tantos danos como a variação do avanço. Esse fato é justificável, pois o avanço interfere diretamente no desgaste da broca, acentuando assim a delaminação.

Tabela 5.16 - Delaminação na entrada e na saída dos furos 1 e 1000, empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

		Entrada do Furo			
		Brocas			
		A1141		A1163	
Vc (m/min)	f (mm/rot)	Furo 01	Furo 1000	Furo 01	Furo 1000
55	0,04				
	0,20				
86	0,04				
	0,20				

		Saída do Furo			
		Brocas			
		A1141		A1163	
Vc (m/min)	f (mm/rot)	Furo 01	Furo 1000	Furo 01	Furo 1000
55	0,04				
	0,20				
86	0,04				
	0,20				

A figura 5.14 mostra o valor da área delaminada na entrada e na saída dos furos, em função da velocidade de corte e do avanço, empregando-se a broca de aço rápido A1141, após a execução do furo 1000. Os resultados indicam que a área delaminada diminui drasticamente em função do aumento do avanço, e em geral, aumenta lentamente em função da velocidade de corte. O avanço de 0,04mm/rot foi o parâmetro de corte que apresentou maior área delaminada, independentemente da velocidade de corte empregada. A justificativa para esse resultado é o acentuado desgaste das arestas principal e secundária de corte da broca de aço rápido A1141, como ficou demonstrado nas fotografias da tabela 5.2 e nas fotomicrografias da tabela 5.3.

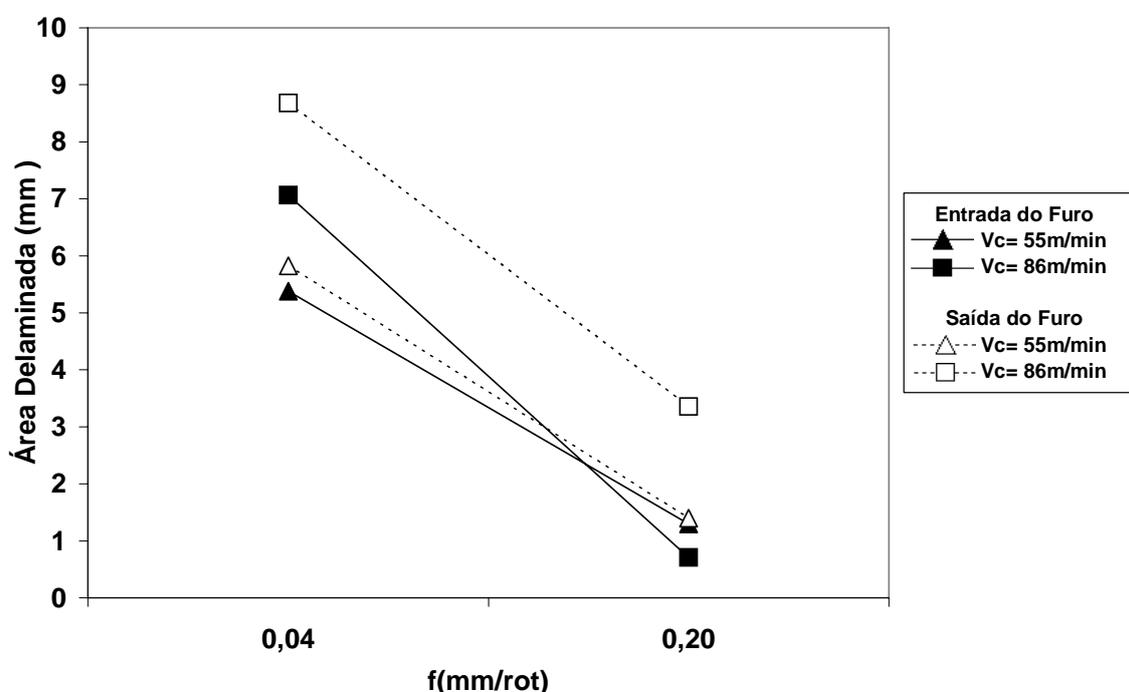
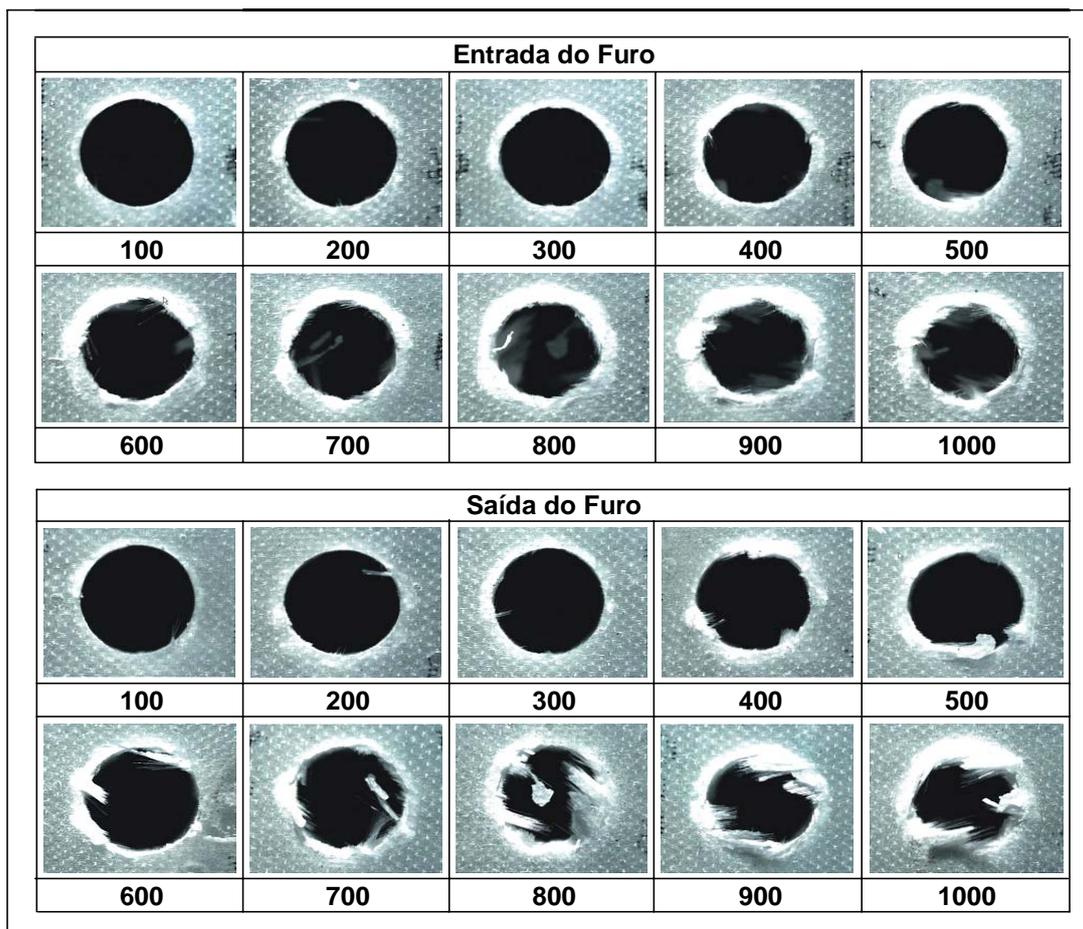


Figura 5.14 - Valor da área delaminada em função das velocidades de corte 55 e 86m/min e avanços de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot, respectivamente, empregando-se a broca de aço rápido A1141.

Como o pior resultado de delaminação da tabela 5.16, tanto na entrada como na saída do furo, foi para a broca de aço rápido A1141, utilizando-se a velocidade de corte de 86m/min e avanço de 0,04mm/rot, é prudente que se apresente a evolução da delaminação em função do número de furos para esse caso, como foi mostrado na tabela 5.5 em relação à

evolução do desgaste da broca de aço rápido A1141 em função do número de furos. Essa evolução da delaminação em função do número de furos é mostrada na tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Delaminação na entrada e na saída dos furos feitos com a broca de aço rápido A1141, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot.}$



A análise das fotografias da tabela 5.17 mostra um aumento gradativo da delaminação na entrada e na saída dos furos em função do número de furos. Isso vem corroborar o fato de que o desgaste da broca é um dos maiores responsáveis pela delaminação. Essa afirmação se justifica, pois foi mostrado na tabela 5.5 o aumento gradativo do desgaste da broca em função do número de furos, o que conseqüentemente influenciou a qualidade de cada furo. Portanto, o desgaste da broca pode ser considerado, ao lado do avanço, o principal responsável pela delaminação na entrada e na saída dos furos.

A figura 5.15 apresenta a evolução no valor da área delaminada na entrada e na saída dos furos em função do número de furos empregando-se a broca de aço rápido A1141 e utilizando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot}$. Os resultados mostram que o valor da área delaminada aumenta proporcionalmente com o número de furos. Aqui, também a justificativa para esse aumento é o desgaste da broca, como demonstrado na tabela 5.5.

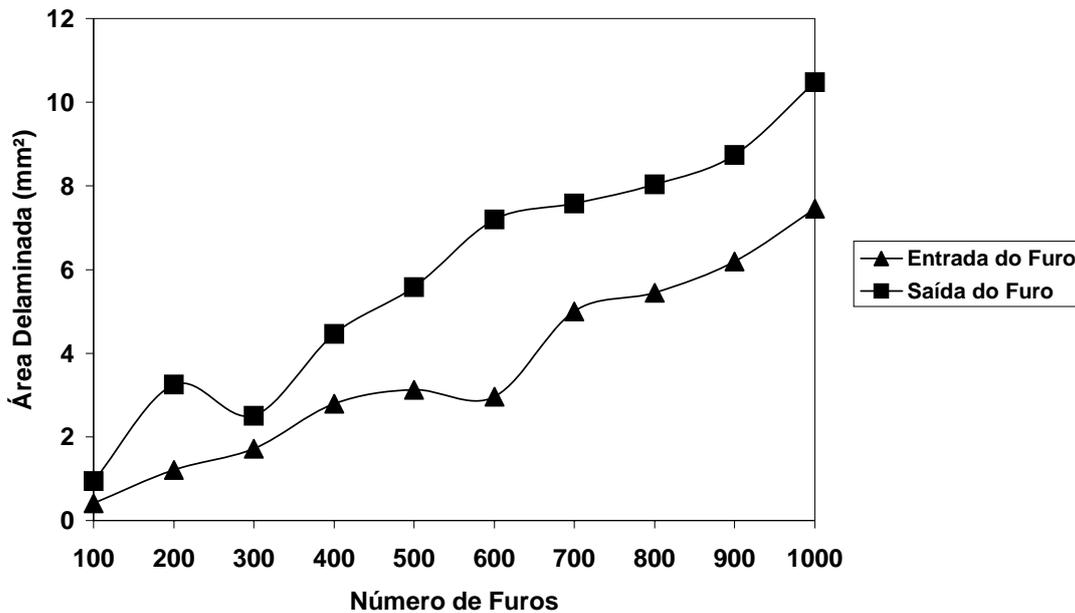


Figura 5.15 - Valor da área delaminada em função do número de furos, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot}$ utilizando-se a broca de aço rápido A1141.

A seqüência de fotos de delaminação na entrada e na saída dos furos para as brocas de metal duro A1163, de metal duro revestida A1163TiN e de aço rápido A1141 em função do número de furos, está representada na tabela 5.18. Na seqüência dos furos feitos pela broca de metal duro A1163, é possível ver o aumento gradativo da delaminação em função do número de furos; porém, sem comprometer consideravelmente a qualidade do furo. Entretanto, isso já é um indicativo do desgaste sofrido pela broca, como mostrado na tabela 5.8. Para a broca de metal duro revestida A1163TiN, os resultados indicam delaminação ligeiramente mais acentuada que a provocada pela broca metal duro A1163 após 10000 furos. Este aumento na delaminação dos furos feitos pela broca revestida também pode ser

atribuído ao arredondamento do gume das arestas principal e secundária de corte, pois este arredondamento pode diminuir a afiação dos gumes e dificultando o cisalhamento das fibras provocando o aumento da delaminação na borda dos furos.

Tabela 5.18 - Delaminação na entrada e na saída dos furos feitos com as brocas de metal duro A1163, de metal duro revestida A1163TiN e de aço rápido A1141, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot.}$

		Entrada do Furo				
		Furos				
Brocas		1	1000	10000	20000	24000
A1163						
A1163TiN						
A1141						

		Saída do Furo				
		Brocas				
Brocas		1	1000	10000	20000	24000
A1163						
A1163TiN						
A1141						

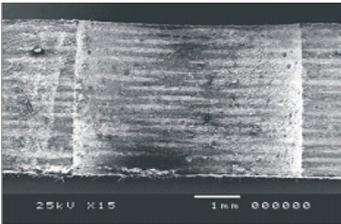
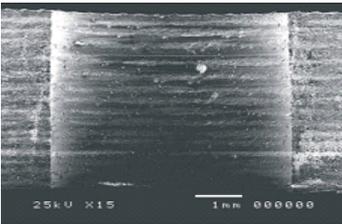
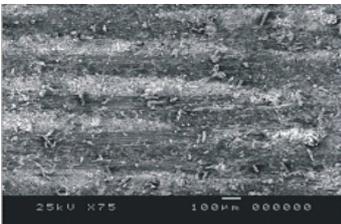
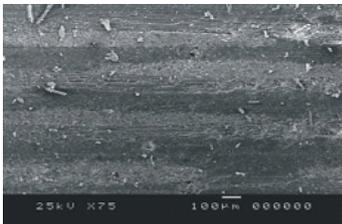
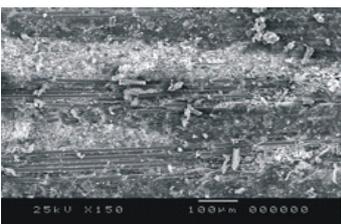
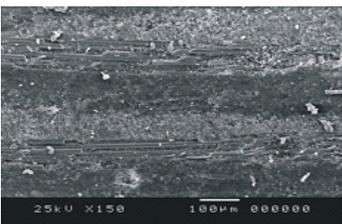
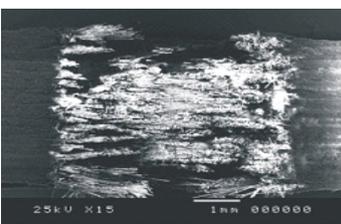
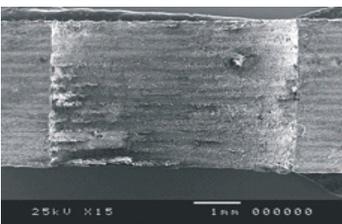
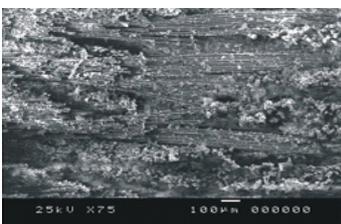
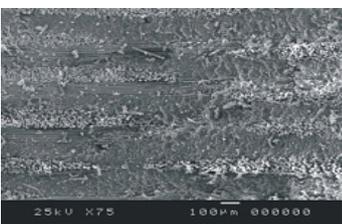
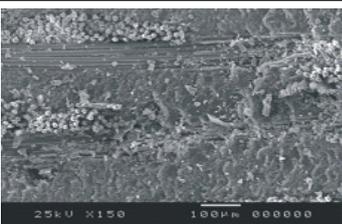
Não foi mostrada a fotografia do furo 1000, na entrada e saída do furo, para a broca de metal duro revestida A1163TiN, porque não houve variação na delaminação, quando se comparada com a fotografia do furo 10000.

Para as fotografias de delaminação da entrada e na saída do furo 1000, feito pela broca de aço rápido A1141, deve-se fazer uma observação à parte: pode-se notar que a delaminação na entrada e na saída do furo 1000 não teve o mesmo aspecto dos furos da tabela 5.17, feitos com o mesmo tipo de broca. Essa diferença na delaminação da entrada e da saída do furo deve-se ao desgaste da broca (que está ligado diretamente aos parâmetros de corte utilizados). Como os parâmetros de corte empregados ($v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$) para esse teste foram diferentes, e o desgaste das arestas principal e secundária de corte foi menor, possibilitando que a broca continuasse cortando e fazendo com que a qualidade do furo fosse melhor, houve uma menor delaminação na entrada e na saída do furo. Esse resultado vem mais uma vez comprovar que o desgaste é um dos maiores responsáveis pela qualidade do furo.

5.5 Qualidade da Parede do Furo

A tabela 5.19 mostra uma seqüência de fotomicrografias das paredes dos furos 1 e 1000 tiradas com o microscópio eletrônico de varredura. Esses furos foram feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=71\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot}$. Na seqüência de fotografias da tabela 5.19, é possível observar que a qualidade da parede do furo variou com o tipo de broca e com a quantidade de furos produzidos. Para a ampliação de 15 vezes do furo 1, já é possível ver uma pequena diferença no aspecto da superfície da parede do furo. Essa diferença pode ser atribuída talvez à afiação das brocas, que por serem de materiais diferentes, têm uma afiação diferente, embora possuam a mesma geometria. Já para a parede do furo 1000, a qualidade oferecida pela broca de aço rápido A1141 é bem inferior. Esta piora pode ser atribuída ao desgaste das arestas transversal, principal e secundária da broca. Além disso, observando-se as fotomicrografias de maior ampliação, verifica-se para o furo 1000 que a broca de aço rápido A1141, já desgastada, não é capaz de cisalhar as fibras de reforço como a broca de metal duro A1163.

Tabela 5.19 - Fotomicrografias das paredes dos furos 1 e 1000 feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=71\text{m/min}$ e $f=0,04\text{mm/rot.}$

Furos	Brocas		Ampliação
	A1141	A1163	
1			x15
			x75
			x150
1000			x15
			x75
			x150

5.6 Rugosidade

Os resultados de rugosidade média aritmética (R_a) da parede do furo em compósito polimérico reforçado com fibras de vidro são representados em seis gráficos, sendo que os três primeiros mostram a rugosidade em função do avanço (com velocidade de corte constante), e os três últimos apresentam a rugosidade em função da velocidade de corte (com avanço constante). Para cada condição, foram feitas três medições, sendo apresentado o valor médio de R_a e seu desvio padrão.

As figuras 5.16 a 5.18 apresentam os gráficos de rugosidade em função do avanço, para velocidades de corte constantes, iguais a 30m/min, 60m/min e 90m/min, respectivamente, empregando-se uma broca helicoidal de aço rápido com 6mm de diâmetro.

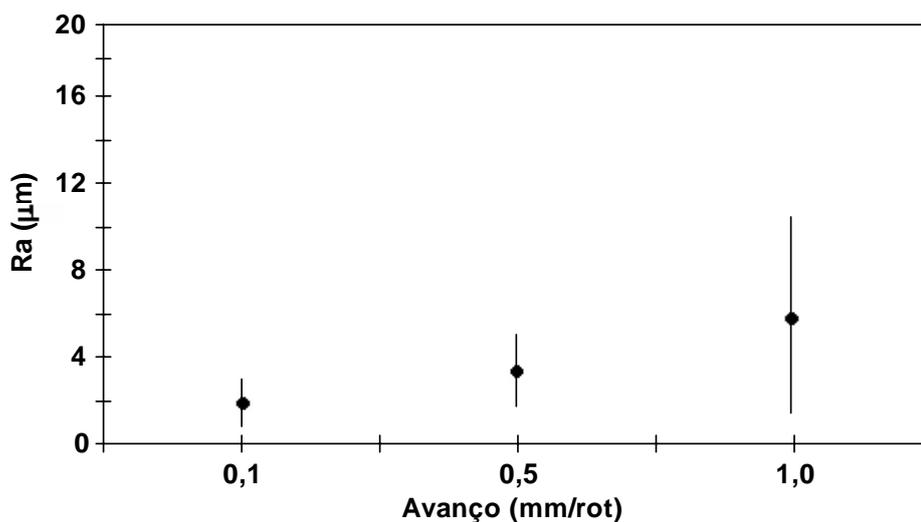


Figura 5.16 - R_a em função do avanço, para $v_c=30$ m/min.

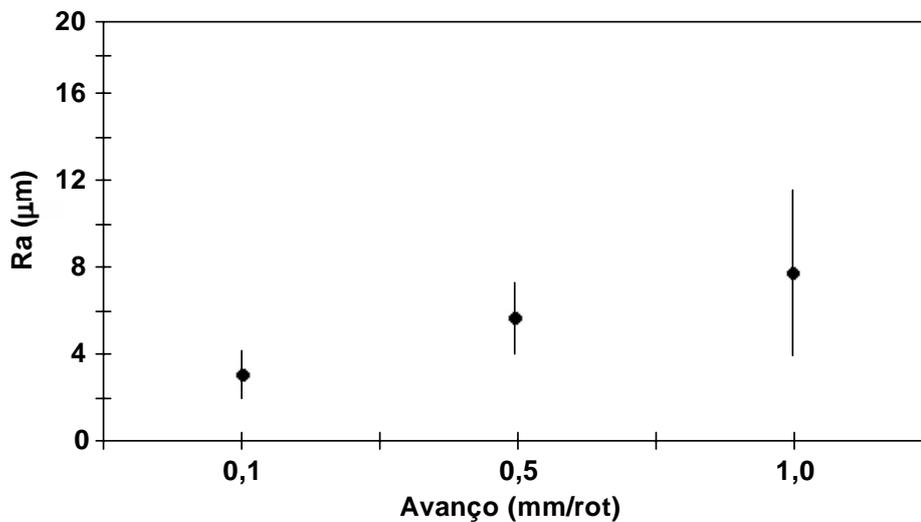


Figura 5.17 - R_a em função do avanço, para $v_c=60\text{m/min}$.

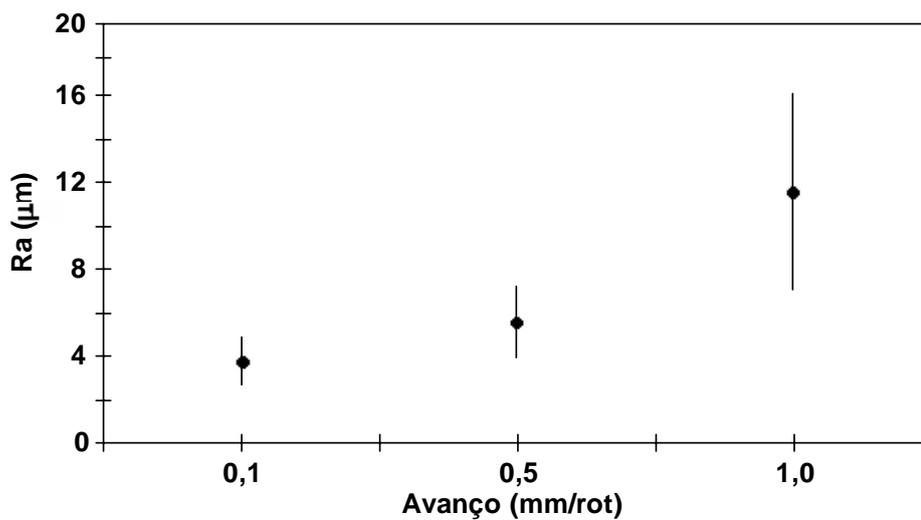


Figura 5.18 - R_a em função do avanço, para $v_c=90\text{m/min}$.

As três figuras mostram que R_a aumenta em função do avanço, demonstrando que ele afeta o acabamento superficial da parede do furo. Outro fato que deve ser observado é a elevação na dispersão dos resultados com o aumento do avanço, como demonstra o desvio padrão de cada ensaio. Provavelmente, a causa desse aumento de R_a possa ser atribuído ao aumento dos espaçamentos entre as irregularidades da superfície, gerada pela ponta da ferramenta de corte.

As figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam os gráficos de R_a em função da velocidade de corte, para avanços constantes, iguais a 0,1mm/rot, 0,5mm/rot e 1,0mm/rot, respectivamente, empregando-se a mesma broca de aço rápido com diâmetro de 6mm.

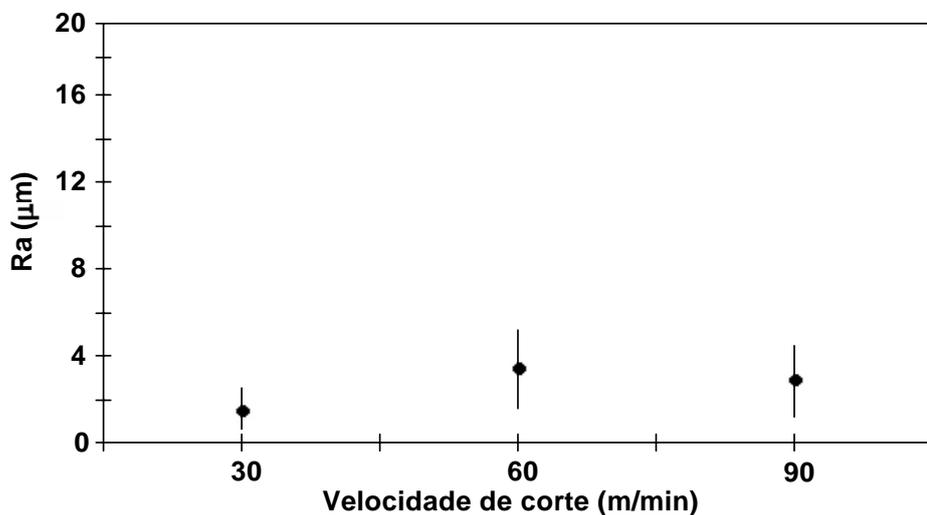


Figura 5.19 - R_a em função da velocidade de corte, para $f=0,1\text{mm/rot}$.

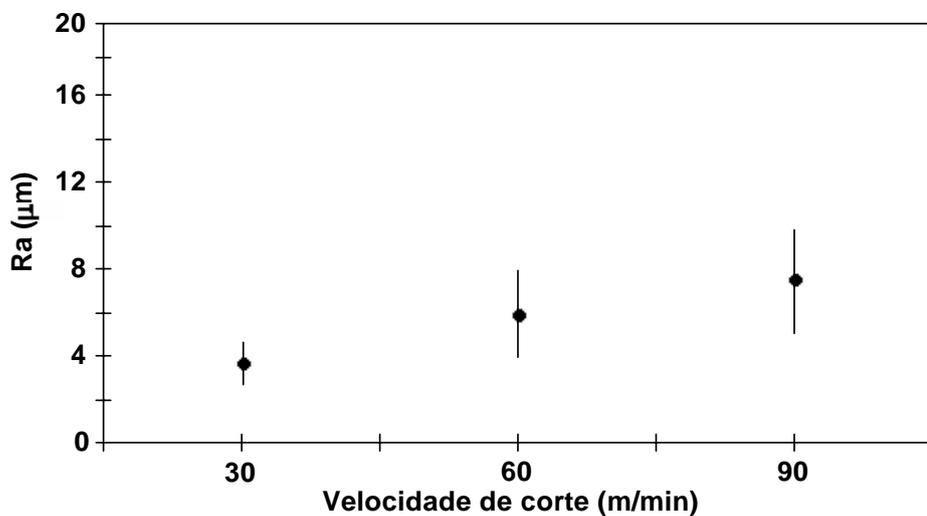


Figura 5.20 - R_a em função da velocidade de corte, para $f=0,5\text{mm/rot}$.

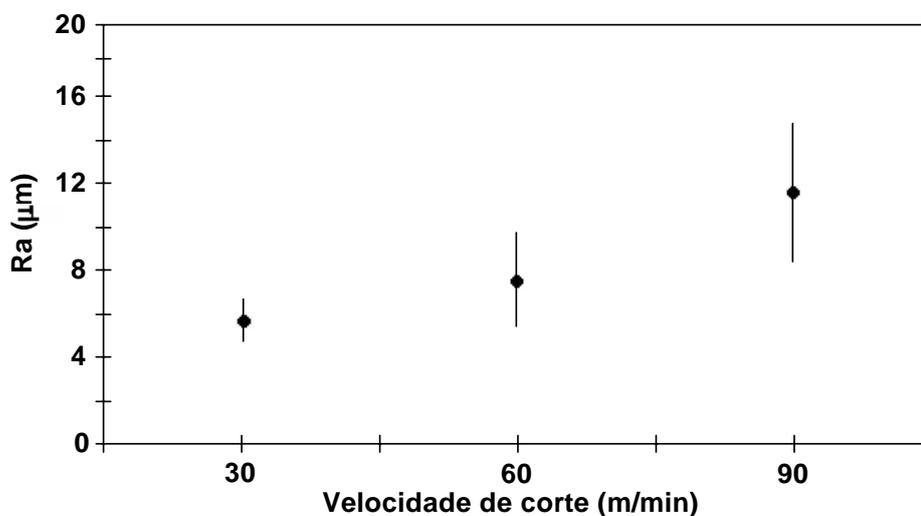


Figura 5.21 - R_a em função da velocidade de corte, para $f= 1,0\text{mm/rot}$.

Os gráficos das figuras 5.19 e 5.20 apresentam valores de R_a bem próximos para as respectivas velocidades, mas comparando-se com o gráfico da figura 5.21 pode-se observar que houve uma maior variação no valor de R_a . Esse aumento pode ser atribuído ao avanço elevado de 1,0mm/rev. Para a velocidade de corte, também houve elevação na dispersão dos resultados, como mostra o desvio padrão de cada curva.

A figura 5.22 apresenta um gráfico de rugosidade média (R_a) em função da velocidade de corte (v_c) e do avanço (f) para todos os parâmetros de corte empregados nos ensaios. Comprova-se uma maior influência do avanço sobre (R_a) em comparação com a velocidade de corte. Entretanto, pode-se observar que para elevados avanços, a velocidade de corte começa a apresentar uma parcela de influência sobre a rugosidade.

A análise desses resultados mostra que a qualidade superficial da parede do furo é afetada pelo avanço e pela velocidade de corte. Porém, o avanço tem maior influência, comprovando-se os resultados descritos na literatura, onde observa-se que a qualidade superficial (nesse caso, na parede do furo) é inversamente proporcional ao aumento do avanço, ou seja, melhores valores de rugosidade foram conseguidos com menores avanços.

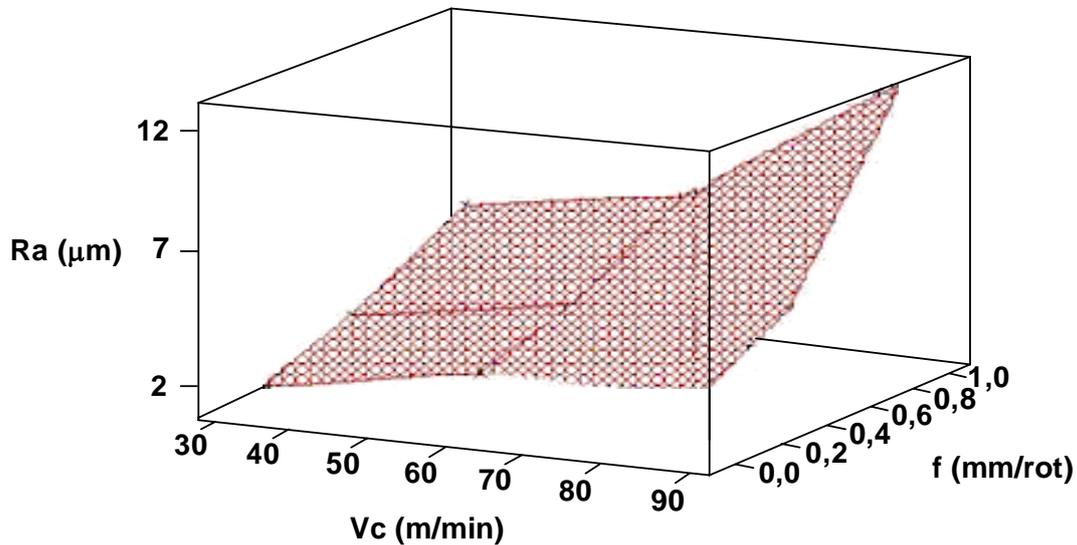


Figura 5.22 - Rugosidade média aritmética (R_a) (μm) em função da velocidade de corte (m/min) e do avanço (mm/rot).

5.7 Diâmetro e Circularidade dos Furos

O objetivo desses ensaios foi avaliar de forma quantitativa a qualidade dos furos. Foi analisada a influência dos parâmetros de corte, do tipo de broca (aço rápido, metal duro e metal duro revestida) e do número de furos produzidos sobre a variação de medição no diâmetro e na circularidade dos furos.

Os gráficos das figuras 5.23 a 5.26 apresentam os resultados da medição do diâmetro para os furos 1 e 1000, feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Não são apresentadas todas as condições de corte indicadas na tabela 4.4, apenas as condições extremas de velocidade de corte (55m/min e 86m/min) e avanço (0,04mm/rot e 0,20mm/rot).

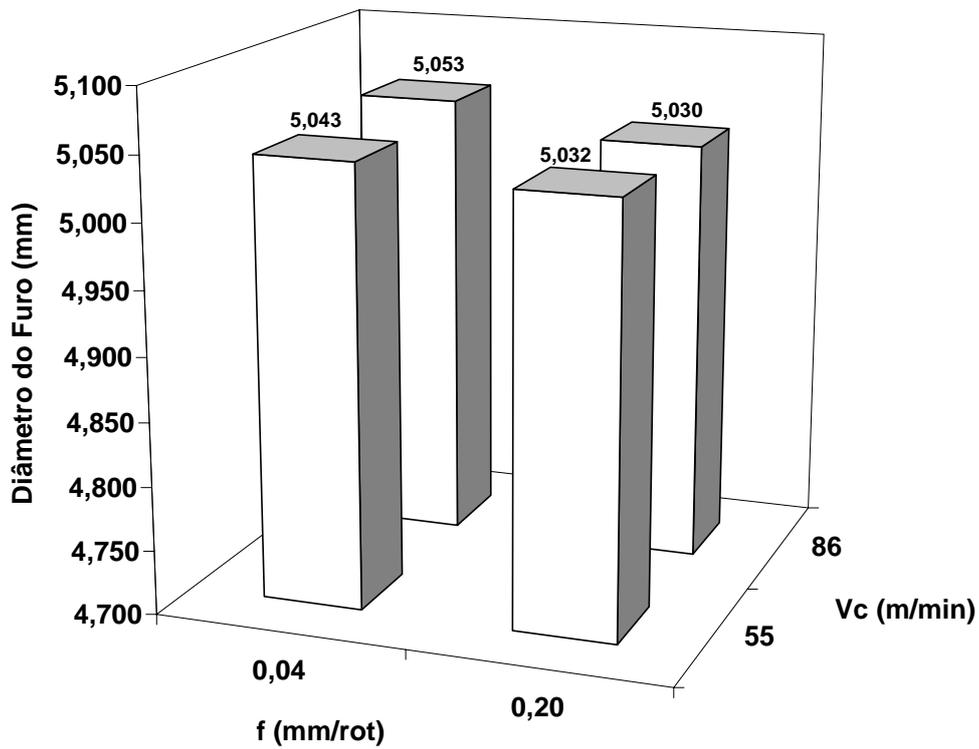


Figura 5.23 - Medição do diâmetro do furo 1 para a broca de aço rápido A1141.

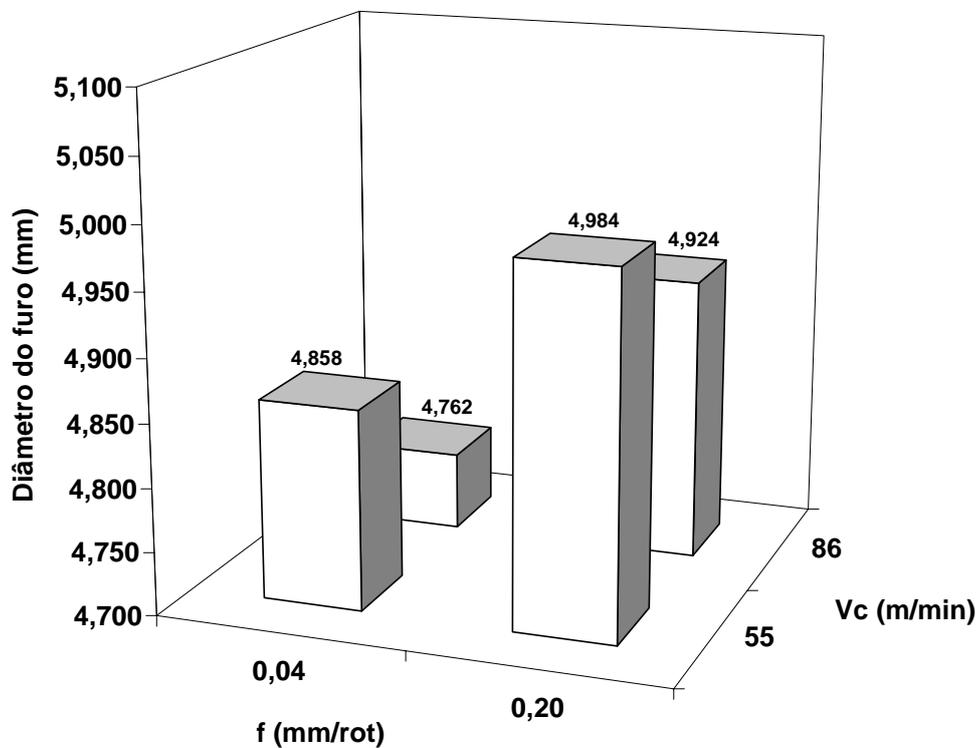


Figura 5.24 - Medição do diâmetro do furo 1000 para a broca de aço rápido A1141.

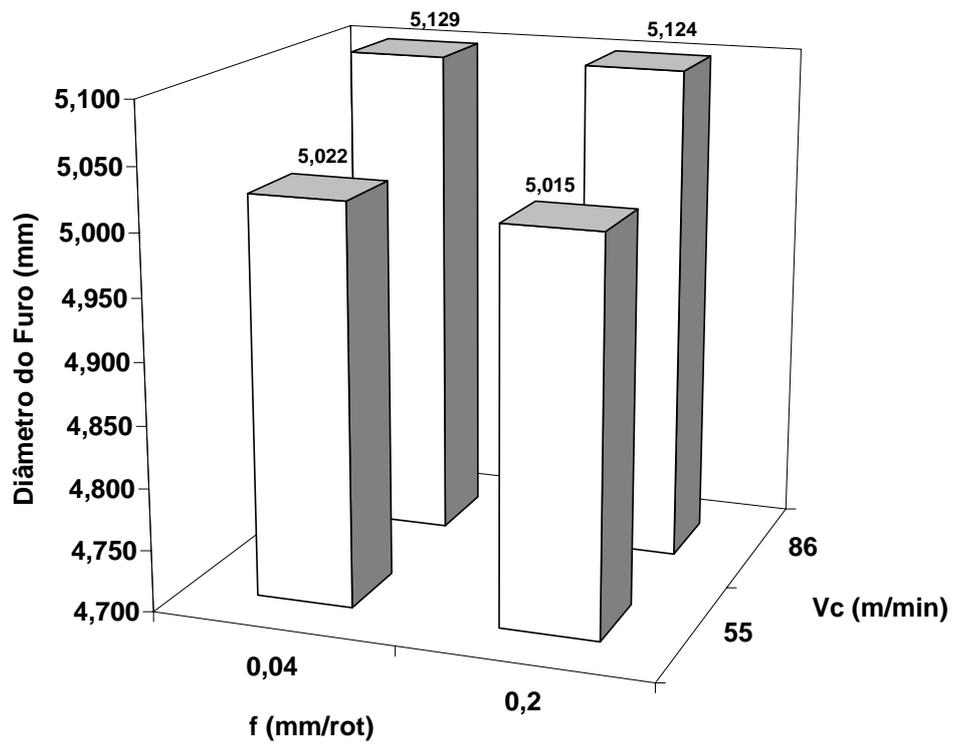


Figura 5.25 - Medição do diâmetro do furo 1 para a broca de metal duro A1163.

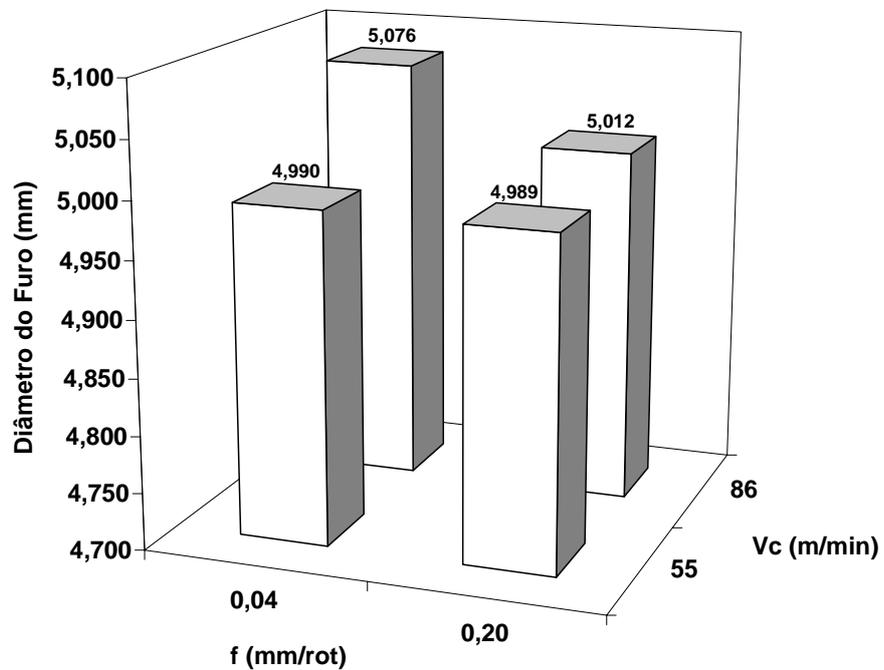


Figura 5.26 - Medição do diâmetro do furo 1000 para a broca de metal duro A1163.

Comparando-se os gráficos das figuras 5.23 e 5.26 para a broca de aço rápido A1141, observa-se que há uma diferença entre o valor do diâmetro do furo 1 (figura 5.23) e do diâmetro do furo 1000 (figura 5.24) em consequência do desgaste da broca. Observa-se na figura 5.23 que após a execução do primeiro furo não houve variação significativa nos diâmetros dos furos, independentemente dos parâmetros de corte empregados. Entretanto, após a execução do furo 1000, nota-se que o avanço de 0,04mm/rot foi responsável pela maior variação diametral, particularmente para $v_c=86\text{m/min}$, condição responsável pelo desgaste mais acentuado da ferramenta. Os gráficos das figuras 5.25 e 5.26 para a broca de metal duro A1163 mostram que houve diferença mínima nos valores de medição do diâmetro entre os furos 1 e 1000, indicando que não houve desgaste das brocas. A variação nos valores de medição desses gráficos pode ser atribuída a diferenças entre os diâmetros iniciais das brocas.

O gráfico da figura 5.27 apresenta o resultado da medição do diâmetro para os furos 1, 1000, 10000, 20000 e 24000, feitos com as brocas de aço rápido A1141, de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$.

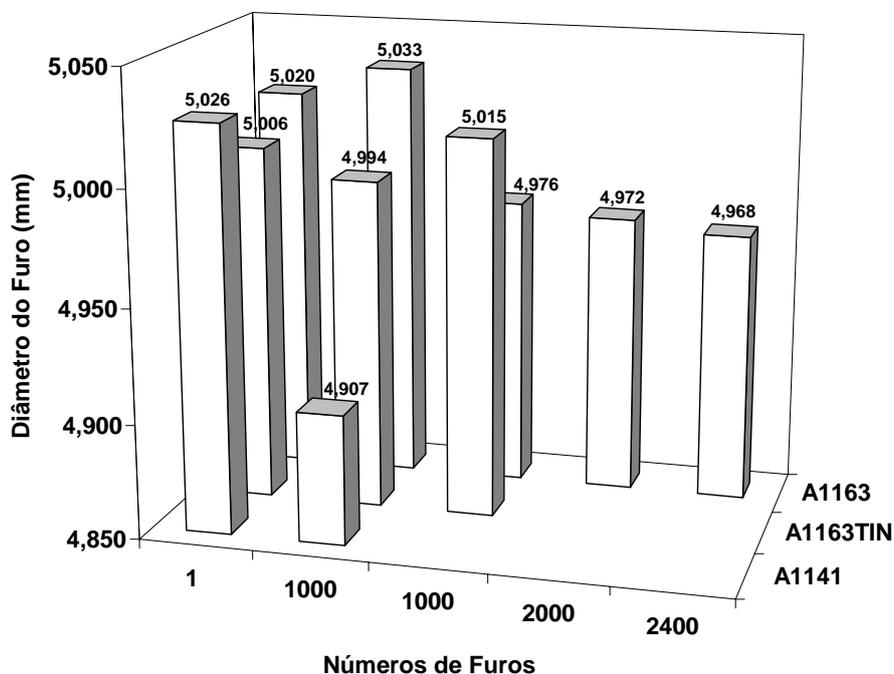


Figura 5.27 - Diâmetro dos furos em função dos números de furos para as brocas de aço rápido A1141, de metal duro revestida A1163TiN e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$.

Nota-se novamente que o diâmetro dos furos foi afetado pelo número de furos em consequência do desgaste das brocas. Para a broca de aço rápido A1141, a redução no valor do diâmetro do furo foi coerente com o desgaste sofrido pela ferramenta. Outra variação no diâmetro que pode ser notada é a dos furos feitos pela broca de metal duro A1163, que apresentaram redução gradativa e proporcional ao desgaste sofrido pela broca. Para a broca de metal duro revestida A1163TiN, não houve variação significativa no valor do diâmetro, o que também está coerente com os resultados anteriores, pois a broca não apresentou desgaste. A pequena variação no valor do diâmetro pode ser atribuída à diferença entre as ferramentas.

Os gráficos das figuras 5.28 a 5.31 apresentam os resultados da medição da circularidade para os furos 1 e 1000 feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Não são apresentadas todas as condições de corte indicadas na tabela 4.4, apenas as condições extremas de velocidade de corte (55m/min e 86m/min) e do avanço (0,04mm/rot e 0,20 mm/rot).

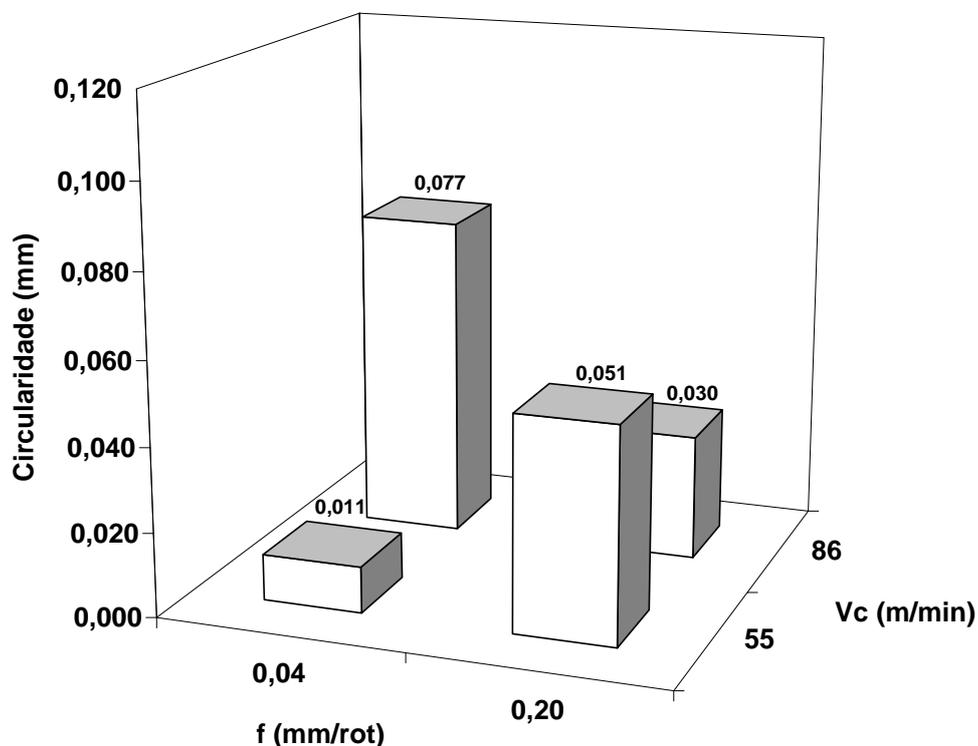


Figura 5.28 - Medição da circularidade do furo 1 para a broca de aço rápido A1141.

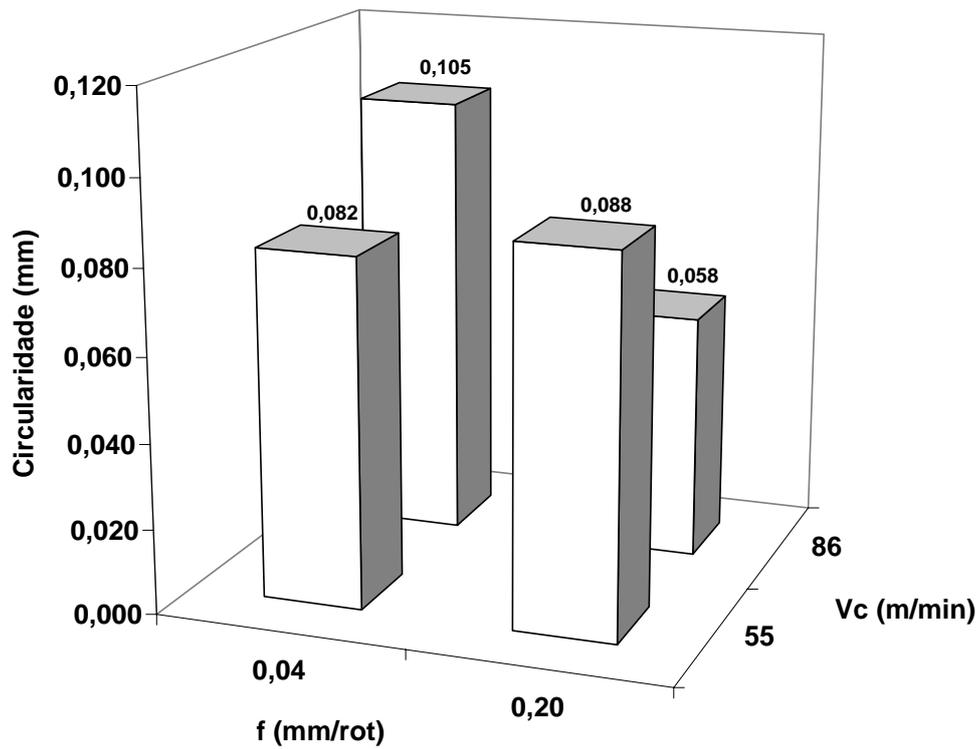


Figura 5.29 - Medição da circularidade do furo 1000 para a broca de aço rápido A1141.

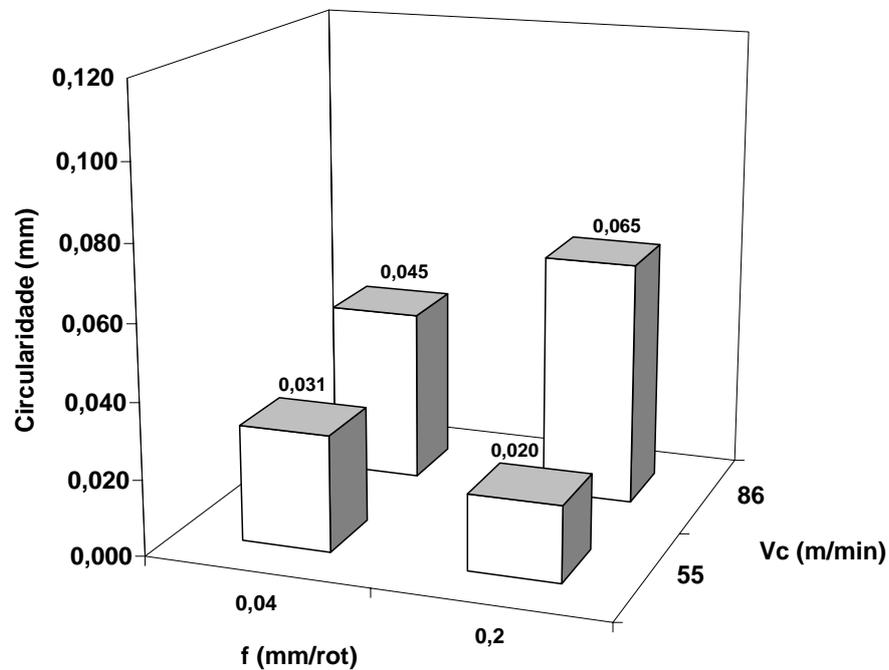


Figura 5.30 - Medição da circularidade do furo 1 para a broca de metal duro A1163.

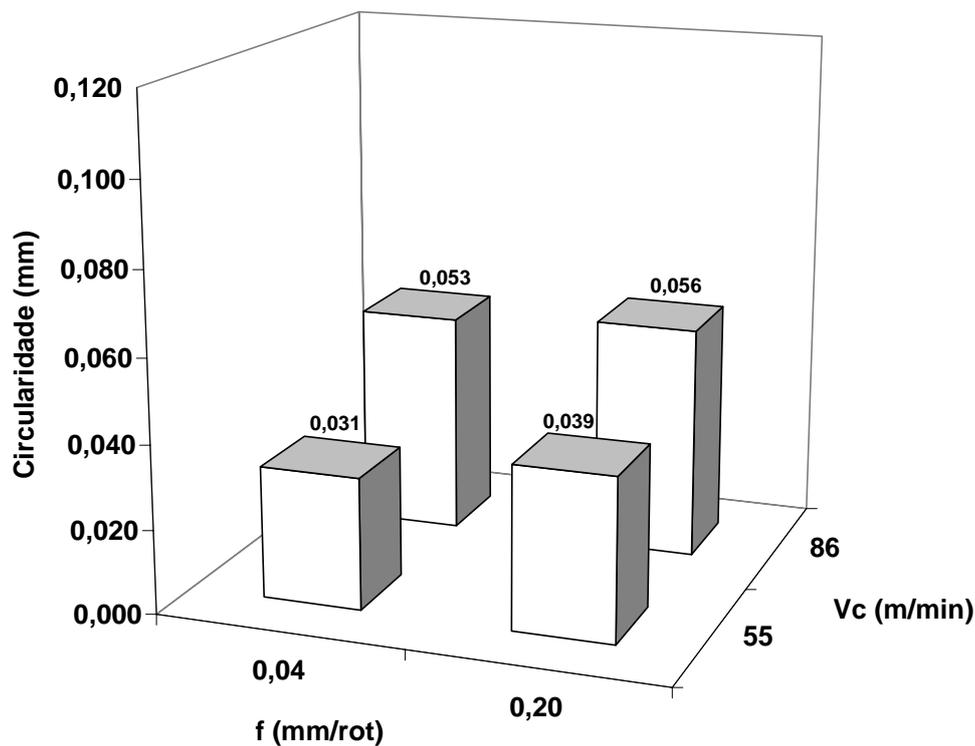


Figura 5.31 - Medição da circularidade do furo 1000 para a broca de metal duro A1163.

A figura 5.28 mostra que não há uma tendência clara de comportamento do desvio de circularidade em função dos parâmetros de corte para a broca de aço rápido A1141. No caso do corte de metais, esperar-se-ia menor circularidade sob velocidades de corte mais altas e valores de avanços mais baixos, mas no caso de polímeros reforçados com fibras, a posição do centro da broca exerce um importante papel, pois ao atingir um feixe de fibras, a broca será redirecionada para uma região de menor resistência ao cisalhamento, interferindo assim no resultado de circularidade.

A influência do desgaste da broca de aço rápido A1141 pode ser vista comparando-se as figuras 5.28 e 5.29. Apesar de o desgaste provocar a redução do diâmetro da broca, e conseqüentemente do diâmetro do furo, os valores de circularidade aumentam, indicando que o desgaste das arestas de corte não ocorre de maneira uniforme.

No caso da broca de metal duro A1163 (figuras 5.30 e 5.31), não houve alteração significativa, tanto devido aos parâmetros de corte, quanto ao número de furos produzidos; porém, uma comparação com a broca de aço rápido A1141 sugere que o metal duro proporciona circularidade mais homogênea.

A figura 5.32 apresenta os resultados da medição da circularidade para os furos 1, 1000, 10000, 20000 e 24000, feitos com as brocas de aço rápido A1141, de metal duro A1163 e de metal duro revestida A1163TiN, empregando $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$.

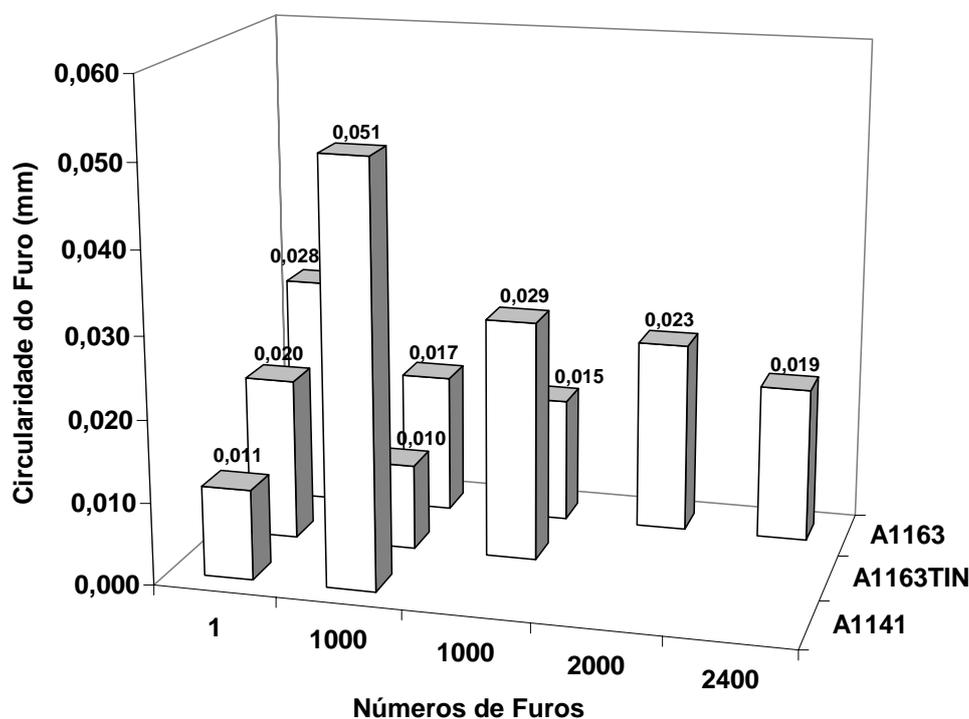


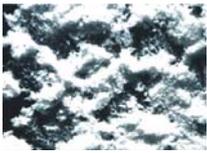
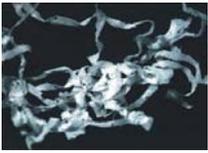
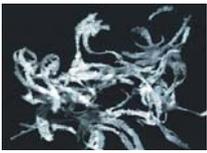
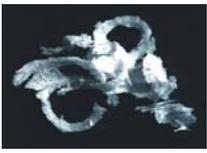
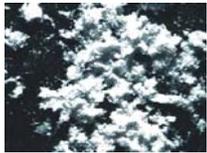
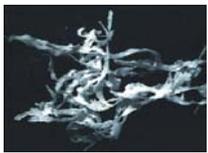
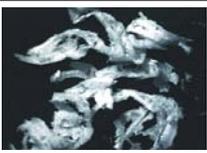
Figura 5.32 - Circularidade dos furos em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141, de metal duro revestida A1163TiN e de metal duro A1163, empregando-se $v_c=86\text{m/min}$ e $f=0,15\text{mm/rot}$.

Nota-se que a circularidade dos furos também variou em função do número de furos, como consequência do desgaste das brocas. Porém, somente os furos feitos pela broca de aço rápido A1141 apresentaram uma variação significativa que deve ser atribuída ao desgaste não uniforme da broca. Para as brocas de metal duro revestida A1163TiN e de metal duro A1163, a variação deve ser atribuída à diferença entre as ferramentas de corte.

5.8 Formas de Cavaco

A tabela 5.20 apresenta as fotografias dos cavacos produzidas sob condições selecionadas. Foram feitas fotografias dos cavacos do início e do final de cada teste, porém serão mostradas somente as fotografias correspondentes às velocidades de corte de 55m/min e 86m/min e aos avanços de 0,04mm/rot e 0,20mm/rot (valores mínimo e máximo), empregando-se as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

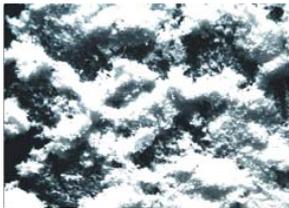
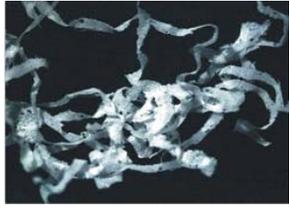
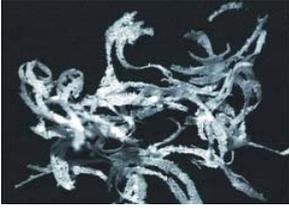
Tabela 5.20 - Formas de cavacos do compósito em função dos parâmetros de corte para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

Vc (m/min)		Brocas			
		A1141		A1163	
		Furo 01	Furo 1000	Furo 01	Furo 1000
55	0,04				
	0,20				
86	0,04				
	0,20				

Nessa seqüência, pode-se observar que as formas dos cavacos variam de fitas emaranhadas, passando por cavacos em arco solto, até chegar à forma de pó. Essa forma final do cavaco está diretamente ligada ao desgaste da broca, sendo, portanto, mais freqüente quando utilizada a broca de aço rápido A1141. Em termos de parâmetros de corte, fica evidente que, mais uma vez, o avanço exerce a maior influência, fazendo com que sejam produzidos cavacos mais espessos.

Na tabela 5.21 são mostradas fotografias dos cavacos em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163. Como já ficou demonstrado que as brocas de metal duro A1163 não sofreram nenhuma avaria em suas arestas de corte que pudesse comprometer o seu desempenho, os cavacos também não sofreram nenhuma alteração na forma durante todo o processo, ou seja, começaram como cavacos em forma de fita emaranhada e foram até o final com essa mesma forma. O mesmo não pode ser afirmado para a broca de aço rápido A1141, pois os primeiros cavacos têm a forma de fita, passando para a forma de cavacos em arco solto e terminando na forma de pó.

Tabela 5.21 - Formas de cavacos do compósito em função do número de furos para as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.

Brocas	Furos		
	1	500	1000
A1141			
A1163			

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões extraídas do trabalho realizado são as seguintes:

- O compósito polimérico de resina epóxi reforçada com fibras de vidro possui tensão máxima de $\sigma_{\max.}=376,6\text{MPa}$, módulo de elasticidade de $E=28,1\text{GPa}$ e resistência à carga máxima à tração de $C_{\max.}=29,3\text{kN}$, valores compatíveis com aqueles citados na literatura.
 - O teste de esfera sobre disco mostrou que o metal duro apresenta taxa de desgaste constante (inferior a $20\mu\text{m}$) e coeficiente de atrito médio de 0,15, com desvio padrão de 0,01 e que o aço rápido apresenta taxa de desgaste crescente e coeficiente de atrito médio de 0,36 com desvio padrão de 0,12.
 - O ensaio de parada rápida demonstrou que não há propagação de trinca à frente da cunha de corte durante o corte ortogonal.
 - Com relação à força de avanço, conclui-se que o avanço tem influência significativa sobre a F_f , enquanto que a velocidade de corte apresentou uma discreta influência em todos os testes.
 - A geometria e o material das brocas de aço rápido e metal duro afetaram os valores de força de avanço, sendo que a broca de metal duro EDP27199 proporcionou forças mais baixas em função de sua geometria, que faz com que o corte ocorra das extremidades para o centro da broca. As brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, ambas com geometrias idênticas ($\chi_r=59^\circ$), apresentaram valores similares para F_f , especialmente quando utilizados com avanços com valores mais baixos. A broca de metal duro A1167A apresentou pior desempenho devido ao maior ângulo de posição ($\chi_r=75^\circ$) e presença de três arestas de corte (maior atrito com o reforço).
-

-
- O reforço exerceu influência sobre a força de avanço. Alterando-se a gramatura do tecido, altera-se a resistência ao cisalhamento do material compósito. Assim, forças mais altas são necessárias para cisalhar o compósito de maior gramatura.
 - A força de avanço aumentou gradativamente quando foram produzidos 1000 furos com a broca de aço rápido A1141, aproximando-se de 500N, o que não foi observado quando usada a broca de metal duro A1163.
 - Após a realização de 10000 furos, a força de avanço registrada com o uso da broca de metal duro A1163 chegou a 100N, e após 24000 furos a força de avanço atingiu 150N. O uso do revestimento de nitreto de titânio (TiN) também afetou a força de avanço.
 - O desgaste sofrido pela broca de aço rápido A1141 foi mais intenso que o desgaste sofrido pela broca de metal duro A1163. Após os 1000 furos, houve variação na intensidade do desgaste das brocas em função da variação dos parâmetros de corte, sendo que para baixos avanços o desgaste foi mais intenso, provavelmente porque as de corte e a ponta da broca ficaram mais tempo em contato com as paredes do furo, sofrendo maior atrito.
 - O desgaste das brocas deu-se essencialmente por abrasão, não sendo encontrados vestígios de deformação plástica, lascamento, quebra ou trincas.
 - O revestimento de nitreto de titânio manteve a geometria da ferramenta de metal duro em melhores condições após a execução de 10000 furos, isto é, sem desgaste notável.
 - Após a furação de 24000 furos, a broca de metal duro A1163 apresentou as mesmas características do desgaste sofrido pela broca de aço rápido A1141, ou seja, desgaste abrasivo com o arredondamento das arestas principal e secundária de corte.
-

-
- Os parâmetros de corte também tiveram influência sobre a delaminação, sendo que a influência do avanço foi maior que a influência da velocidade de corte. Os danos causados na entrada e na saída dos furos não apresentaram diferenças consideráveis entre si, provavelmente devido à rigidez do sistema de fixação dos compósitos.
 - A geometria das brocas apresentou forte influência sobre a delaminação. Os testes revelaram que, com a mudança de broca e conseqüentemente da geometria da cunha de corte, a delaminação na entrada e na saída dos furos também se alterou. A geometria que se mostrou mais apropriada foi a da broca de metal duro EDP27199, por apresentar as menores delaminação na entrada e na saída dos furos. Isso está relacionado com a forma em que a aresta cisalha o compósito, pois o corte ocorre da parte mais externa da broca para seu interior.
 - Ao contrário do que se esperava, não houve relação direta entre a delaminação e a força de avanço, visto que a broca de metal duro A1167A, que apresentou maior força de avanço, teve melhores resultados de delaminação do que as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163.
 - Os resultados de delaminação para as três gramaturas de malhas foram semelhantes, indicando que a espessura das fibras não tem influência sobre a delaminação como teve para a força de avanço.
 - Os resultados de delaminação após 1000 furos feitos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163 foram diferentes. Os furos feitos com a broca de metal duro A1163 não apresentaram nenhuma, ou quase nenhuma delaminação na entrada ou na saída dos furos, ao contrário dos furos feitos com a broca de aço rápido A1141, que apresentaram uma alta delaminação. Esse fato revela que a delaminação está diretamente ligada ao desgaste da broca, pois a broca de aço rápido A1141 apresentou elevado desgaste. Já as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestido A1163TiN, cujos desgastes foram desprezíveis, foram capazes de produzir 24000 e 10000 furos, respectivamente, sem indícios de delaminação acentuada.
-

-
- A qualidade da parede do furo sofre influência do tipo de broca, mas especialmente do desgaste da ferramenta. Após a execução de 1000 furos com as brocas de aço rápido A1141 e de metal duro A1163, a ferramenta de metal duro, que até então não apresentava nenhum desgaste, fez um furo com parede de boa qualidade, ao passo que a broca de aço rápido, que mostrava desgaste nas arestas principal e secundária, fez um furo com parede de péssima qualidade, mostrando fibras extraídas da matriz em vez de cisalhadas.
 - A rugosidade da parede dos furos aumenta com o avanço em uma maior proporção do que com a velocidade de corte. Além disso, avanços mais elevados resultam em maior dispersão dos valores de R_a . O melhor acabamento ($R_a=2\mu\text{m}$) foi obtido para $v_c=30\text{m/min}$ e $f=0,1\text{mm/rot}$ e o pior ($R_a=13\mu\text{m}$) para $v_c=90\text{m/min}$ e $f=1\text{mm/rot}$.
 - De um modo geral, a broca de metal duro A1163 foi capaz de gerar furos com menor variação dimensional e geométrica. Os parâmetros de corte não afetaram a variação diametral do furo de maneira evidente. Entretanto, o desgaste acentuado da broca de aço rápido A1141 após 1000 furos resultou em furos de diâmetro consideravelmente menores. Já as brocas de metal duro A1163 e de metal duro revestido A1163TiN apresentam discreta redução de diâmetro após 1000 furos. Mesmo após 24000 furos, o diâmetro dos furos feitos pela broca de metal duro A1163 foi reduzido de 5,020mm para apenas 4,968mm.
 - Com relação ao desvio de circularidade, também não foi encontrada relação direta com o parâmetro de corte. Porém, ao contrário da variação dimensional, a circularidade aumentou em função do número de furos produzidos, provavelmente devido ao desgaste não uniforme das arestas de corte. Isso foi particularmente evidente para a broca de aço rápido. A broca de metal duro A1163 foi capaz de produzir 24000 furos com mínima alteração na circularidade do furo.
-

-
- As formas de cavacos obtidas variaram de fita emaranhada, passando por arcos soltos até chegar à forma de pó. Com a elevação do avanço teve-se um evidente aumento na espessura do cavaco. A forma de pó está associada ao desgaste da broca, visto que essa forma só foi obtida pela broca de aço rápido A1141 e após a execução de 1000 furos.
-

CAPÍTULO VII

7. PROPOSTA PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO

A fim de dar continuidade às pesquisas sobre esse tema, as seguintes atividades são propostas:

- Realizar testes de furação em compósitos poliméricos reforçados com fibra de aramida e carbono, empregando-se os mesmos procedimentos empregados nesta pesquisa, para que se possa estender o conhecimento sobre o assunto para os outros materiais do grupo.
 - Realizar testes de furação em compósitos com fibras dispostas em ângulos que não o ângulo de 90°, a fim de verificar a influência que a disposição das fibras tem sobre a usinabilidade do compósito.
 - Realizar testes de fresamento em compósitos de PRF, e medir as forças de usinagem, a delaminação e a rugosidade, empregando-se fresas com e sem revestimentos para que se possa analisar a influência do revestimento na vida da fresa e no acabamento final da peça.
 - Realizar ensaios de fadiga em corpos-de-prova usinados sob condições de corte distintas, com o objetivo de se avaliar a influência dos parâmetros de corte sobre a resistência à fadiga do material. Além disso, analisar se há relação entre a intensidade de delaminação e a resistência à fadiga.
-

8. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ABELE, E., DÖRR, J., *Ferramentas de Corte Protegidas contra a Defasagem Tecnológica*, Máquinas e Metais, vol. 439, pg. 38 - 53, 2002;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS – NBR 6405 de 1988: *Rugosidade das Superfícies*, S/i;

ABRÃO, A. M., ASPINWALL, D. K., WISE, M. L., *A Review of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting Tool Developments and Application*, A Review of PCBN Cutting Tool Developments, 1993;

AN, S.O., LEE, E.S., NOH, S. L., *A Study on the Cutting Characteristics of Glass Fiber Reinforced Plastics with Respect to Tool Materials and Geometries*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 68, pg. 60 - 67, 1997;

AOYAMA, E., INOUE, H., HIROGAKI, T., NOBE, H., KITAHARA, Y., KATAYAMA, T., *Study on Small Diameter Drilling in GFRP*, Composite Structures, vol. 32, pg. 567 – 573, 1995;

AOYAMA E., NOBE H., HIROGAKI T., *Drilled Hole Damage of Small Diameter Drilling in Printed Wiring Board*, Journal of Material Processing Technology, vol. 118, pg. 436 - 441, 2001;

ASM INTERNATIONAL, Metal Handbook – Nontraditional Machining Processes, 10^a ed. vol. 16, 1995;

ASTM D 3039/3039M - 95a, *Standart Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, Annual Book of American Society for Testing Materials, vol. 14.02, pg. 99 – 109;

ÁVILA, A. F., RODRIGUES, P.C.M., RIBEIRO, R.P., OLIVEIRA, J.H.I., OLIVEIRA, N.J.L., *Plain Weave Woven Fabric Composites: correlations between micromechanical models and experiments*, In Proceedings 42° AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit, CDROM Seattle, WA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2001;

ÁVILA, R. F., *A Influência do Uso de Fluidos de Corte sobre o Desempenho de Ferramentas Cerâmicas*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1999, 77pg. (Dissertação de Mestrando em Engenharia Mecânica – Processo de Fabricação);

BATISTA, J. C. A., LIMA, M. M., *Processos de Obtenção de Recobrimento Cerâmico*, Apostila da Disciplina: Processo de Materiais Cerâmicos, PPGEMM – UFMG, 1997;

BENEDICT, G. F., *Nontraditional Manufacturing Processes*, Ed. Marcel Dekker, New York, 381 pg., 1987;

BHATNAGAR, N., RAMAKRISHNAN, N., NAIK, N. K., KOMANDURI, R., *On the Machining of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composite Laminates*, Int. J. Mach. Tools Manufact, vol. 35, pg. 701 - 716, 1995;

BOEHS, L., BET, L., MOSTIACK, G. R., *Fontes de Erros na Medição da Textura Superficial com Estilete e Sonda Óptica*, Máquinas e Metais, pg. 66 - 77, abril, 1998;

BUENO, P. O., Dissertação, Análise Comparativa entre Juntas “Single-Lap” e “Wavy-Lap” de Compósito Unidas por Adesivos. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2002;

CALLISTER JR. W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*, 5ª ed., Rio de Janeiro, RJ, LTC, 590pg, 2002;

CAPELLO, E., *Workpiece Damping and its Effects on Delamination Damage in Drilling thin Composite Laminates*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 148, pg. 186 - 195, 2004;

CAPRINO, G. TAGLIAFERRI, V. *Damage Development in Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 35 (6), pg 817 - 829, 1995;

CAPRINO, G., DE IORIO, I., NELE, L., SANTO, L., *Effect of Tool Wear on Cutting Forces in the Orthogonal Cutting of Unidirectional Glass Fibre Reinforced Plastics*, Composites: Part A, vol. 27A, pg. 409 – 415, 1996;

CAVACO, M. A. M., *Metrologia – parte II*, Laboratório de Metrologia e Automação, UFSC – Dep. Eng. Mecânica, 2002;

DANIEL, I. M., ISHAI, O., *Engineering Mechanics of Composite Material*, Oxford University Press, Inc., New York, USA, 1994;

DAVIM, J. P., REIS, P., ANTONIO, C. C., *Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Manufactured by Hand Lay-Up*, Composite Science and Technology, vol. 64, pg. 289 - 297, 2004 (a);

DAVIM, J. P., REIS P., *Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics Manufactured by Autoclave Experimental and Statistical Study*, Materials and Design, vol. 24, pg. 315 - 324, 2003 (b);

DAVIM, J. P., REIS, P., ANTONIO, C. C., *A Study on Milling of Glass Fiber Reinforced Plastics Manufactured by Hand-Lay Up Using Statistical Analysis (ANOVA)*, Composite Structures, vol. 64, pg. 493 - 500, 2004 (c);

DAVIM, J. P., REIS, P., *Damage and Dimensional Precision on Milling Carbon Fiber Reinforced Plastics Using Design Experiments*, Journal of Materials Processing Technology, 2004 (d);

DAVIM, J. P., REIS, P., *Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments*, Composite Structures, vol 59, pg. 481 - 487, 2003 (e);

DENÍCULI, F. D., *Determinação de Propriedades Termoelásticas de Compósitos Particulados de Matriz de Metal Utilizando um Modelo Micromecânico*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 1999, (Dissertação de Mestrando em Engenharia Mecânica – Processo de Fabricação);

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*, 4ª ed., São Paulo – SP, MM Editora, 248pg, 2003;

DRUMOND, F. B., WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S., *Análise de Variância: comparação de várias situações*, 1ª ed, Belo Horizonte – MG, Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia – UFMG, 302pg, 1996;

EL-SONBATY, I., KHASHABA, U. A., MACHALY, T., *Factors Affecting the Machinability of GFR - Epoxy Composites*, Composite Structures, vol. 63, pg 329 - 338, 2004;

ERIKSEN, E., *Influence from Production Parameters on the Surface Roughness of a Machined Short Fibre Reinforced Thermoplastic*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 39, pg 1611 - 1618, 1999;

FERRANTE, M., *Seleção de Materiais*, 2ª ed, São Carlos, SP, Editora da USCar, 286pg 2002;

FERRARESI, D., *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, 1ª ed., São Paulo – SP, Ed. Edgard Blücher Ltda, 751pg, 1977;

FERREIRA, J. R., CUPINI, N. L., *Escolha da Ferramenta no Torneamento de Resina Reforçada com Fibras de Vidro e Carbono*, Revista Brasileira de Ciência Mecânica, vol. 15, 112 - 123, 1993;

FERREIRA, J. R., COPPINI, N. L., MIRANDA, G. W. A., *Machining Optimisation in Carbon Fibre Reinforced Composite Materials*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 92 – 93, pg. 135 - 140, 1999;

FILETIN, T., *An Overview of the Development and Application of Advanced Material*, Welding Society, 2001;

FIGLIOLI, J., *Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira*, São Carlos, Universidade de São Paulo, XXpg, 2002.(Dissertação de Mestrado);

GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R., RUBIO, J.C., CORREIA, A.E., ABRÃO, A. M., DAVIN, J.P., *An Experimental Study on Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) for Minimizing Delamination in High Speed Drilling Using Taguchi Optimization Method*, *in press*, 2006;

GAMARRA, J. R., HSM – *Características das Ferramentas em HSM - Fresamento, Furação e Faceamento*, In. Vários Autores. Usinagem em Altíssima Velocidade – Com os Conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2003. cap. 7, pg. 94 – 110, 214p;

GEY, C., *Novos Revestimentos Dão Origem a Ferramentas mais Eficientes*, Máquinas e Metais, vol. 485, pg. 52 – 67, 2006;

GHIDOSSO, P., EL MANSORI, M., PIERRON, F., *Influence of Specimen Preparation by Machining on the Failure of Polymer Matrix Off-Axis Tensile Coupons*, Composites Science and Technology, vol. 66, pg. 1857 – 1872, 2006;

HERAKOVICH, C. T., *Mechanics of Fibrous Composites*, University of Virginia, 1998;

HIROGAKI, T., AOYAMA, E., INOUSE, H., OGAWA, K., MAEDA, S., KATAYAMA, T., *Laser Drilling of Blind via Holes in Aramid and Glass/Epóxi Composites for Multi-Layer Printed Wiring Boards*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 32, pg. 963 – 968, 2001;

HOLMBERG, K., MATTEWS, A., *Coatings Tribology – Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Tribology Series 28, Amsterdam, London, New York, Tokyo, Ed. D. Dowson, 441pg, 1994;

HULL, D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge, Cambridge University, 264pg, 1995;

KAO, W. H. *Tribological Properties and High Speed Drilling Application of MoS₂-Cr Coatings*, Wear, vol. 258, pg. 812 – 825, 2005;

KHASHABA, U. A., *Delamination in Drilling GFR-Thermoset Composites*, Composite Structures, vol 63, pg 313 - 327, 2004;

KISTLER INSTRUMENT CORP, *Manual n°6.9257BA*, Piezo-Instrumentation Kistler, modelos 9257BA, 9403 e 5233A1, nov-1995;

KOPAC, J., *Influence of Cutting Material and Coating on Tool Quality and Tool Life*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 78, pg. 95 – 103, 1998;

KOPAC, J., SOKOVIC, M., DOLINSEK, S., *Tribology of Coated Tools in Conventional and HSM Machining*, Journal of Material Processing Tecnology, vol118, pg 377 – 384, 2001;

LACHAUD, F., PIQUET, R., COLLOMBET, F., SURCIN, L., *Drilling of Composite Structures*, Composite Structures, vol 52, pg 511 - 516, 2001;

LANNA, M. A., Dissertação, *Desenvolvimento de um Protótipo de Usinagem Eletroquímica*, UFMG, Belo Horizonte, MG, 1989;

LANNA, M. A., Tese, Estudo da Usinabilidade do Compósito Carbono-Carbono 2D com Ferramentas Cerâmicas de Nitreto de Silício Comuns e Revestidas com Filme de Diamante por CVD, ITA, São José dos Campos, SP, 2006;

LIN, S. C., CHEN, I. K., (1996), *Drilling of carbon Fiber Reinforced Composite Material at High speed*. Wear, vol. 194, pg. 156 – 162;

LUCAS, E. O., WEINGAERTNER, W. L., BERNARDINI, P. A. N., *Como o Cavaco se Forma no Torneamento do FoFo Nodular Ferrítico*, Máquinas e Metais, vol. 477, pg. 152 – 163, 2005;

MACHADO, A. R., SILVA, M. F., *Usinagem dos Metais*, Depto de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, MG, 174pg, 1999;

MANFÉ, G., POZZA, R., SCARATO, G., *Desenho Técnico Mecânico: curso completo*, Hemus Livraria Editora Ltda, vol 2, 277pg, 1977;

MARQUES, A. T., *Materiais Compósitos: um desafio permanente*, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, 2003;

MUMMERY, L., *Surface Texture Analysis – The Handbook*, 106pg, 1990;

NASSEH, J., *Manual de Construção de Barcos*, Rio de Janeiro, Booklook, 2000;

OGAWA, K., AOYAMA, E., INOUE, H., HIROGAKI, T., NOBE, H., KITAHARA, Y., KATAYAMA, T., GUNJIMA, M., *Investigation on Cutting Mechanism in Small Diameter Drilling for GFRP (Thrust Force and Surface Roughness at Drilled Hole Wall)*, Composite Structures, vol 38, nº1–4, pg 343 - 350, 1997;

OLIVEIRA, F. G., HSM – *Conceitos e Aplicações*, In. Vários Autores. Usinagem em Altíssima Velocidade – Com o os Conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2003. cap. 2, pg. 29 – 35, 214p;

PIQUET, R., FERRET, F., LACHAUD, F., SWIDER, P., *Experimental Analysis of Drilling Damage in thin Carbon/Epoxi Plate Using Special Drills*, Composites: Part A, vol 31, pg 1107 - 1115, 2000;

PORTO, A. J. V., DUDUCH, G. J., JASINEVICIUS, R. G., *Usinagem de Ultra-Precisão*, In. VÁRIOS AUTORES, Tecnologias Avançadas de Manufatura, 1ªed., Jaboticabal, SP, Ed. Novos Talentos, 2005, Coleção Fabrica do Milênio, IFM, cap 8, pg 147 – 169, 172p;
RAHAMN, M., RAMAKRISHNA, S., PRAKASH, J. R. S., TAN, D. C. G., *Machinability Study of Carbon Fiber Reinforce Composite*; Journal of Materials Processing Technology, vol 89, pg 292 - 297, 1999;

RASLAN, A. A., AMORIN, F. L., LIMA, M. S. F., GUZZO, P. L., ROSSI, W., *Processos Especiais de Usinagem*, In. VÁRIOS AUTORES, Tecnologias Avançadas de Manufatura, 1ªed., Jaboticabal, SP, Editora Novos Talentos, 2005, Coleção Fabrica do Milênio, IFM, cap. 7, pgs. 125 – 145, 172p;

RIBEIRO, R. P., Utilização de Reforço de Fibra de Vidro em Matriz Epóxi no Reparo de Tensores de Fuselagem de Aeronaves com Estrutura de Madeira, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2000, (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica);

RIBEIRO, R. P., Apostila, *Manutenção e Fabricação de Aeronaves*, Centro de Estudos Aeronáuticos, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, UFMG, 2002;

RODRIGUEZ, A. J. D., Dissertação, Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento para Retificação por Descarga Eletroquímica, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2001;

ROTHON, R., *Particulate-Filled Polymer Composites*, Polymer Science and Technology Series, Longman Scientific & Technical, England, 1995;

SANDIVIK COROMANT, *Ferramentas de Tornear, AB Sandivik Coromant, Sandviken*, Sweden, catálogo C-1000 SPA, 2000;

SANDVIK DO BRASIL S.A., *Titex Plus - Ferramentas de Corte de Precisão*, catálogo completo, São Paulo – SP, 704pg, 2002;

SANTHANAKRISHNAN, G., KRISHANAMUTHY, R., MALHOTRA, S. K., *Machining of Polymeric Composites*, Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium, Chicago, pg 139 - 148, 1993;

SCHÜTZER, I. K. E SCHULZ, I. H., *Histórico da Usinagem com Altíssima Velocidade até os Dias Atuais*, In. Vários Autores. Usinagem em Altíssima Velocidade – Com o os Conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2003. cap. 1, pg. 13 – 28, 214p;

SHANMUGAM, D. K., CHEN, F. L., SIORES, E., BRANDT, M., *Comparative Study of Jetting Machining Technologies over Laser Machining Technology for Cutting Composite Materials*, Composite Structures, vol. 57, pg. 289 – 296, 2002;

SHAW, M. C., *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press, 594pg, 1984;

SMITH, F. W., *Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais*, 3ª ed., Lisboa, Portugal, Editora Mc Graw-Hill, 896pg, 1998;

SOUZA, P. R. *Projeto, Construção e Avaliação de um Dinamômetro para Medição de Forças no Torneamento*, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2003, XXpg. (Dissertação de Mestrando em Engenharia Mecânica – Processo de Fabricação);

SREEJITH, P. S., KRISHNAMURTHY, R., MALHOTRA, S. K., NARAYANASAMY, K., *Evaluation of PCD Tool Performance During Machining of Carbon/Phenolic Ablative Composites*, Journal of Materials Processing Technology, vol 104, pg 53 - 58, 2000;

STONE, R., KRISHNAMURTHY, K., *A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite Epoxy Laminates*, International Journal Mach Tools Manufacture, vol. 36 (9), pg. 985 – 1003, 1196;

TANIGUCHI, N., *Current Status in and Future Trends of Ultra-Precision Machining and Ultrafine Materials Processing*. Annals of the CIRP, vol 32, n° 2, pg 579 - 582, 1983;

TITEX PLUS, *Ferramentas de Corte de Precisão*, Catálogo Completo – produtos e serviços, São Paulo – SP, 704pg, 2002;

TRENT, E. M., *Metal Cutting*, London, Butterworths, 2ª ed., 245 pg, 1984;

TSAO, C. C., HOCHENG, H., *The Effect of Chisel Length and Associated Pilot Hole on Delamination When Drilling Composite Materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 43, pg 1087 - 1092, 2003 (a);

TSAO, C. C., HOCHENG, H., *Taguchi Analysis of Delamination Associated with Various Drill Bits in Drilling of Composite Material*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 44, pg 1085 - 1090, 2004 (b);

VÁZQUEZ, R. Z., GONZÁLEZ, C. G., *Metrologia Dimensional*, Editora. Mc Graw Hill, México, 510pg, 1999;

WALTER DO BRASIL LTDA, *Ferramentas de Metal Duro*, Catálogo Geral, Sorocaba – SP, 752pg, 2000;

WANG, D. H., RAMULU, M., AROLA, D., *Orthogonal Cutting Mechanisms of Graphite/Epoxy Composite, Part I: Unidirectional Laminate*, Int. Journal Tools Manufact, vol 35, nº12, pg 1623 - 1638, 1995;

WANG, X. M., ZHANG, L. C., *An Experimental Investigation into the Orthogonal Cutting of Unidirectional Fibre Reinforced Plastics*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol 43, pg 1015 - 1022, 2003;

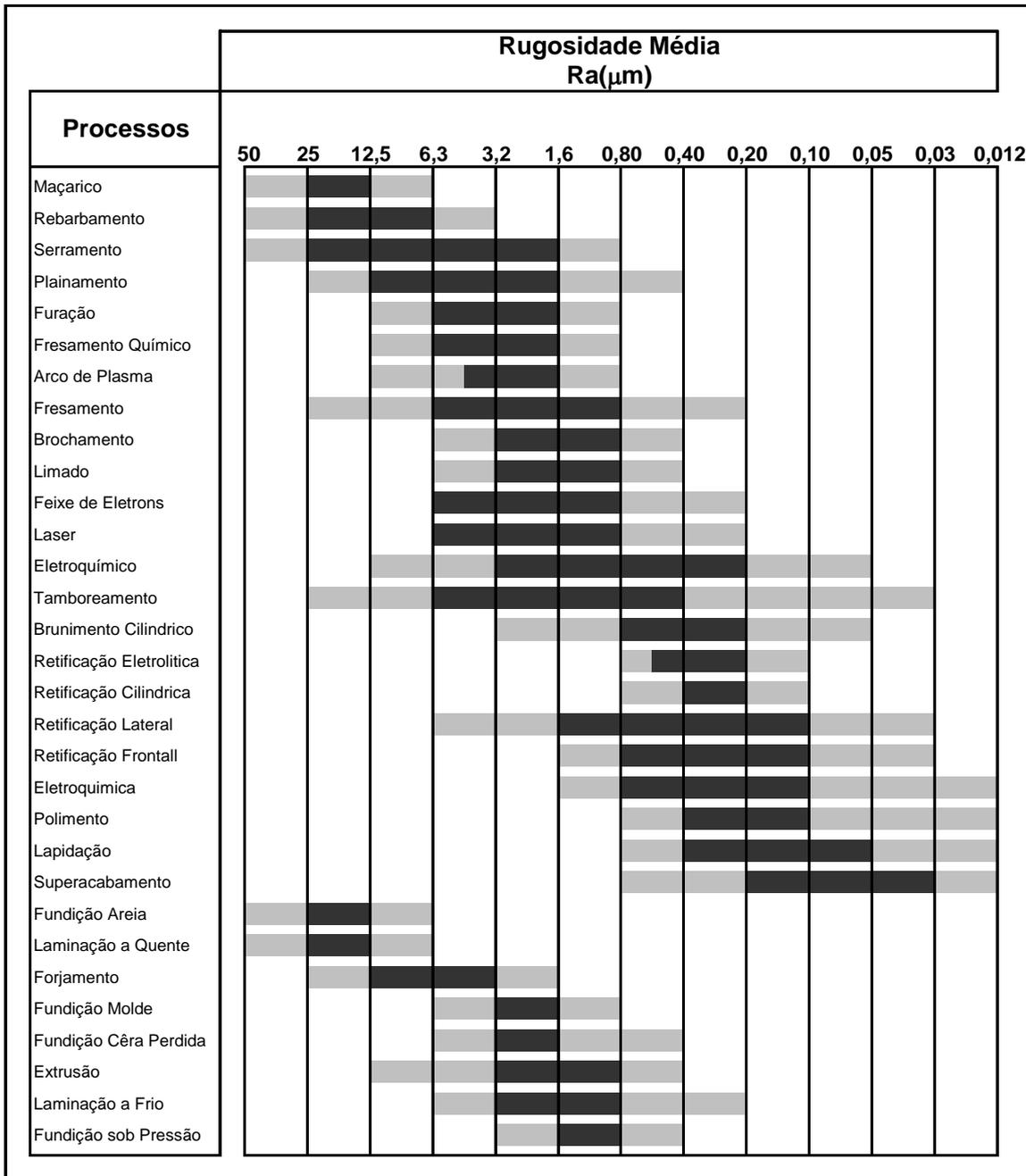
WECK, M., SCHUMACHER, A., QUEINS, M., *Nova Geração de Máquinas-Ferramenta de Alta Velocidade*, Revista Máquinas e Metais, São Paulo, nº 401, pg. 16 a 39, jun.1999;

ANEXO – I

Tabela I.1 -Simbologias dos Desvios de Formas Macrométricos. (Manfé et al 1977)

TOLERÂNCIAS DE FORMA (para elementos isolados de linhas)			
Denominação	Retilinearidade	Circularidade	Forma Qualquer
Símbolo			
TOLERÂNCIAS DE FORMA (para elementos isolados de superfícies)			
Denominação	Planicidade	Cilindricidade	Forma Qualquer
Símbolo			
TOLERÂNCIAS DE ORIENTAÇÃO (para elementos associados)			
Denominação	Paralelismo	Ortogonalidade	Inclinação
Símbolo			
TOLERÂNCIAS DE LOCALIZAÇÃO (para elementos associados)			
Denominação	Localização	Concentricidade	Simetria
Símbolo			
TOLERÂNCIAS DE MOVIMENTO			
Denominação	Radial e/ou Axial		
Símbolo			

Tabela I.2 -Classificação dos Acabamentos (R_a) em Função do Processo de Usinagem, de acordo com Vázquez (1999).



rugosidade mais frequente
 rugosidade menos frequente

ANEXO – II

Tabela II.1 -Propriedades Gerais da Resina Epóxi Araldite – M/HY956.

Araldite	M		
Endurecedor	HY956		
Características Iniciais	Produto	Unidade	
Cor	Resina		Incolor
	Endurecedor		Amarelo Transparente
Viscosidade a 25°C	Resina	cPs	1.000 - 2.000
	Endurecedor	cPs	350 - 600
	Mistura	cPs	800 - 1.000
Densidade	Resina	g/cm ³	1,10 - 1,20
	Endurecedor	g/cm ³	1,00 - 1,05
Proporção da Mistura	Resina	partes em peso	100
	Endurecedor	partes em peso	20
Temperatura de Trabalho	Mistura	°C	20 - 25
Tempo de Uso	Mistura (100g)	minutos	35 - 45
Tempo de Endurecimento a 25°C	Mistura	horas	10,0 - 14,0
Tempo de Cura a	25°C	dias	3,0 - 5,0
	50°C	horas	4,0 - 6,0
Propriedades após a cura	Norma	Unidade	Após 7 dias à 25°C
Resistência a Tração	VSM - 77101	kg/mm ²	4,5 - 5,5
Resistência à Compressão	VSM - 77102	kg/mm ²	7,5 - 8,5
Resistência à Flexão	VSM - 77103	kg/mm ²	9,0 - 10,0
Resistência ao Impacto	ISO 179	kJ/m ²	12,0- 13,0
Densidade	VSM - 77109	g/cm ³	1,10 - 1,15
Coef. de Dilatação Térmica Linear	VSM - 77110	10 °C	55 - 65
Retração Linear (obj. 28x1x3cm)	-	%	0,02 - 0,04
Dureza Shore D	ISO 868	Unidade	80 - 85
Estabilidade Dimensional	DIN - 53458	°C	50 - 60
Martens			

Fonte: Vantico Ltda

Procedimento para Furação dos Compósitos.

A figura II.1 apresenta em detalhes o procedimento empregado para fazer a furação dos compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de vidro. A seqüência é mostrada passo a passo, a seguir:

Primeiro Passo: exposição dos corpos-de-prova (placas de compósito utilizadas para a medição da força e desgastar a broca) e seus respectivos suportes de fixação (placas de alumínio, parafusos e porcas) antes da furação;

Segundo Passo: colocação dos corpos-de-prova (placas de compósito utilizadas para a medição da força e desgastar a broca) sobre os respectivos suportes de fixação antes da furação;

Terceiro Passo: furação do corpo-de-prova (placa de compósito utilizada para medir a força de avanço) no suporte de fixação sobre o dinamômetro antes de desgastar a broca;

Quarto Passo: furação do corpo-de-prova (placa de compósito utilizada para desgastar a broca) no suporte de fixação sobre a mesa da máquina;

Quinto Passo: furação do corpo-de-prova (placa de compósito utilizada para medir a força de avanço) no suporte de fixação sobre o dinamômetro depois de desgastar a broca;

Sexto Passo: retirada dos corpos-de-prova (placas de compósito utilizadas para a medição da força e desgastar a broca) dos respectivos suportes de fixação depois da furação;

Sétimo Passo: exposição dos corpos-de-prova (placas de compósito utilizadas para a medição da força e desgastar a broca) e seus respectivos suportes de fixação (placas de alumínio, parafusos e porcas) depois da furação;

Conjunto Montando: a esquerda suporte de fixação sobre a mesa da máquina, com as placas de alumínio superior e inferior e seus respectivos parafusos e porcas, juntamente com a placa de compósito, utilizada para desgastar a broca, em seu interior; e a direita suporte de fixação sobre o dinamômetro, com as placas de alumínio superior e inferior e seus respectivos parafusos e porcas, juntamente com a placa de compósito, utilizada para medir a força de avanço, em seu interior.

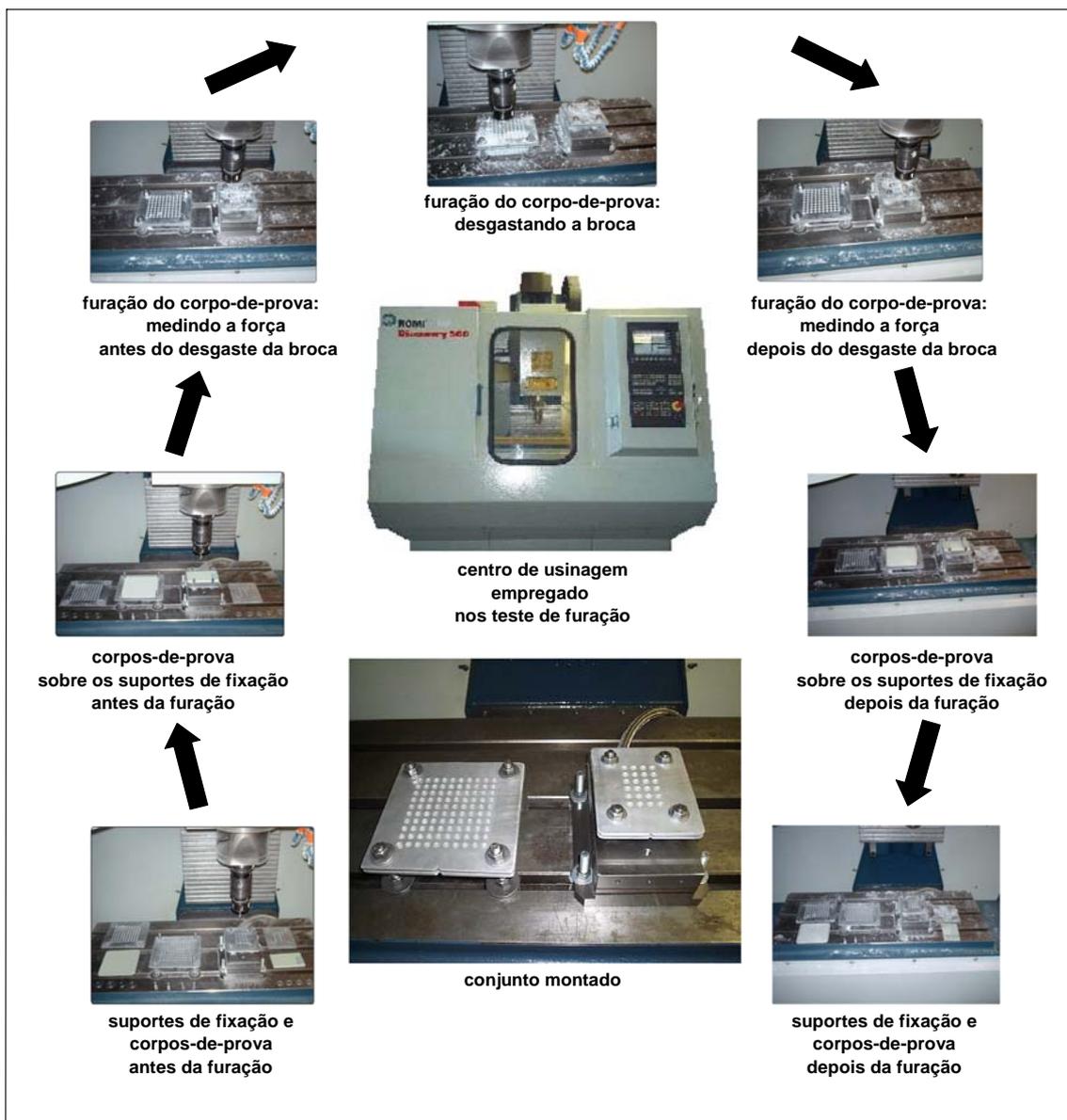


Figura II.1 - Detalhamento do procedimento para furação do compósito.

Medição da Área Delaminada

Para medir a delaminação, como já foi dito, foi empregado o *software* IMAGEM-PRO EXPRESS do sistema de aquisição de imagens. Este *software* possui comandos que permite demarcar o contorno da imagem gerada pelo sistema e calcular o valor da área demarcada, expressando o seu valor em *pixel*. Como *software* registra o valor da área em *pixel* é preciso criar um padrão para converter os valores da área em *pixel* para milímetros quadrados. A solução encontrada foi criar a imagem de um furo e torná-la padrão. Para isso utilizou-se um furo com cinco milímetros de diâmetro. Fez-se a sua imagem e calculou se o valor da sua área em *pixel*. Com o valor da área deste furo padrão nas duas unidades (milímetros quadrados e *pixel*) foi possível calcular os valores das áreas delaminadas em torno dos furos.

O procedimento para medir a área delaminada foi realizado em quatro passos, conforme descritos abaixo:

Primeiro Passo: Contorna a região delaminada em torno do furo com uma linha, como mostra a representação esquemática da figura II.2, e calcular o valor da área através o *software*.



Figura II.2 - Representação esquemática da imagem da área do furo, da área delaminada e da linha que demarca a região com delaminação.

Segundo Passo: A área demarcada tem o seu valor processado, porém o *software* calcula toda a área demarca, como indica representação esquemática da figura II.3.

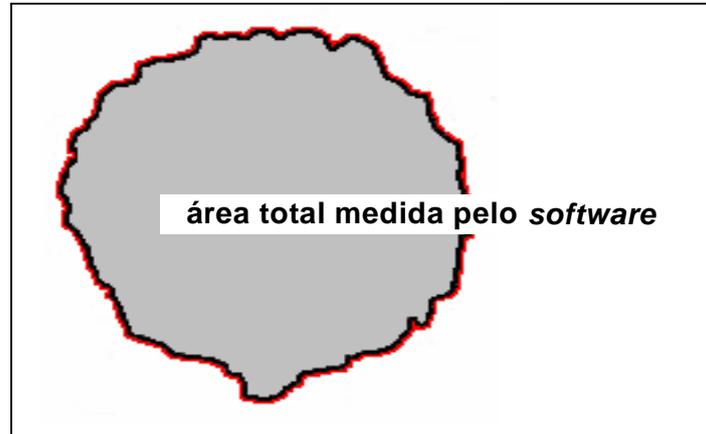


Figura II.3 - Representação esquemática da área total medida pelo *software*.

Terceiro Passo: Deste valor de área total medida em *pixel* é subtraído o valor da área do furo padrão também medida em *pixel* e o resultado é o valor da área delaminada em *pixel*, com mostra a figura II.4.

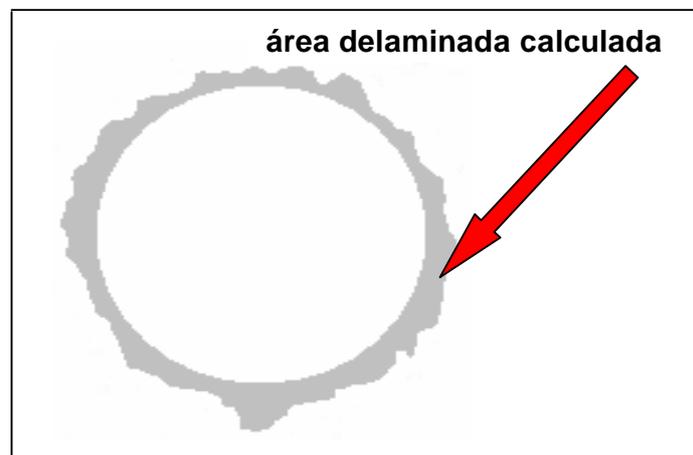


Figura II.4 - Representação esquemática da área delaminada em torno do furo.

Quarto Passo: Finalmene o resultado da área delaminada expresso em *pixel* é convertido em milímetros quadrados por meio de uma regra de três simples, empregado os valores em *pixel* e milímetros quadrados, respectivamente, do furo padrão.

Medição do Diâmetro e da Circularidade

A máquina de medição por coordenada possui três sistemas de eixos (x , y e z) que possibilita a medição de qualquer objeto tridimensional. Essa leitura é feita quando a ponta do apalpador toca a superfície do objeto. O valor é registrado pelo *software* REFLEX SCAN que vem equipando a máquina. Antes de executar qualquer tipo de medida, a máquina deve ser devidamente calibrada. Cada ponto é registrado individualmente e seu valor armazenado pelo *software*. No caso da medição dos furos foram registrados oito pontos para aumentar a precisão e cada furo foi medido cinco vezes. Porém, antes de fazer a medição do diâmetro e da circularidade dos furos, como já foi dito, a placa de compósito foi presa sobre a mesa de granito da máquina de medição por coordenadas, por meio de um suporte de fixação. Esse suporte era formado por duas barras de aço e três parafusos de fixação. A função desse suporte era prender a peça para que a mesma não se movimentasse quando a esfera de rubi do apalpador tocasse a lateral do furo. O procedimento para medir o diâmetro e a circularidade dos furos foi feito em quatro passos, descrito abaixo:

Primeiro passo: A placa de compósito foi presa sobre a mesa de granito da máquina de medição por coordenadas com dois suportes de fixação (barras de aço) e três parafusos, como mostra a representação esquemática na figura II.5.

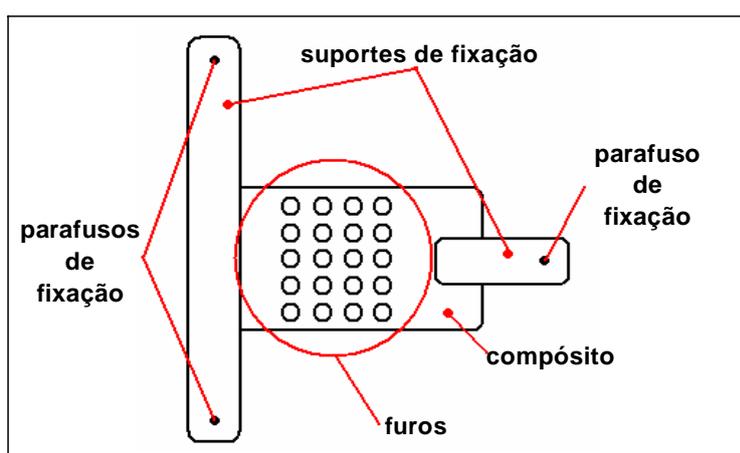


Figura II.5 - Representação esquemática da placa de compósito presa sobre a mesa da máquina de medição.

Segundo passo: Toque na lateral do furo com a ponta de medição (esfera de rubi), como indica a representação esquemática da figura II.6, para que o *software* da máquina pudesse fazer a leitura.

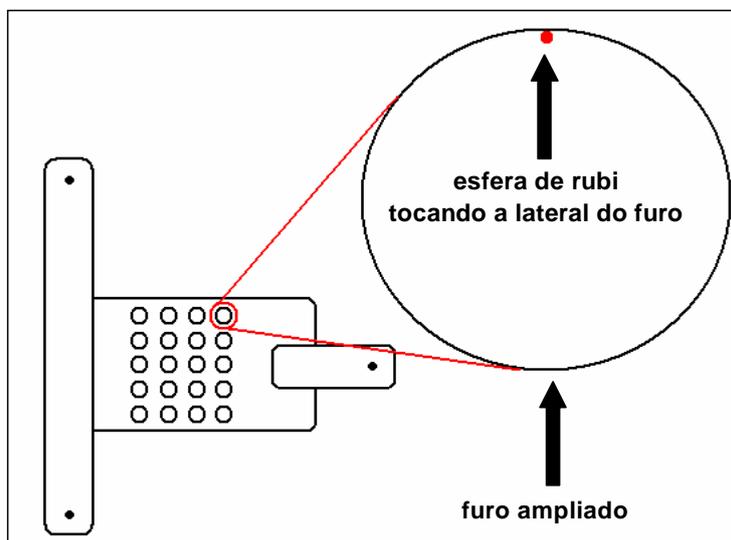


Figura II.6 - Representação esquemática da lateral do furo da placa de compósito sendo tocado pela esfera de rubi.

Terceiro passo: Toque em oito pontos distintos da lateral do furo, conforme representação esquemática mostrada na figura II.7.

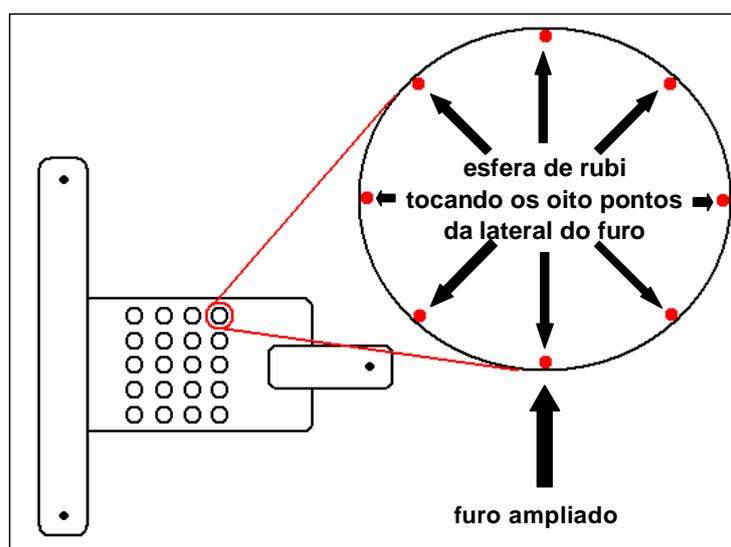


Figura II.7 - Representação esquemática da lateral do furo sendo tocado pela esfera de rubi em oito pontos distintos.

Quarto passo: Transferência dos valores da medição, por intermédio do *software*, para uma planilha.
