

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE E QUALIDADE DOS FUROS NA USINAGEM**  
**DE COMPÓSITOS À BASE DE RESINA EPÓXI COM CARGA DE PÓ DE FERRO**

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUSTAVO GAERTNER EBERHARDT**

Florianópolis, novembro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA – POSMEC**

**AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE E QUALIDADE DOS FUROS NA USINAGEM DE  
COMPÓSITOS À BASE DE RESINA EPÓXI COM CARGA DE PÓ DE FERRO**

**GUSTAVO GAERTNER EBERHARDT**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovado em sua forma final.

---

Prof. Lourival Boehs, Dr.Eng. – Orientador

---

Prof. Gean Vitor Salmoria, Dr. – Co-orientador

---

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D. - Presidente

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng.

---

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr.Eng.

"Se nosso cérebro fosse tão simples a ponto de podermos entendê-lo, seríamos tão tolos que continuaríamos sem entendê-lo."

*Jostein Gaarder*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por ter me dado a chance de estar aqui e saúde para continuar em minha jornada.

Em segundo lugar, aos meus pais, por incentivarem meus estudos e proporcionarem condições para que estes fossem efetivamente concretizados.

Ao meu orientador Prof. Lourival Boehs, por ter me mostrado o caminho correto a ser trilhado, por ter colaborado e repassado seu conhecimento, pelo tempo e dedicação despendidos para a realização deste trabalho e, principalmente, por ter acreditado nele.

Ao Prof. Gean Salmoria, pela co-orientação e grande ajuda prestada.

Aos colegas Flávio Palma (grande companheiro de viagem para Florianópolis) e Sérgio Imianowsky (mentor da ideia de fazer um mestrado), que foram grandes incentivadores, bem como, ao prof. Rolf Bertrand Schroeter, que me recepcionou e me instruiu dentro da UFSC com grande atenção.

Aos colegas do LMP-UFSC (Adriano Boaron, Daniel Gonçalves e Regis Pontel) e aos colegas do CIMJECT (Peixoto, Caubi, Eduardo e Lelo). Sem esquecer o colega Xavier do GRUCON-USICON.

Ao colega Ercio Massirer Junior, que me auxiliou imensamente na realização dos testes.

Aos meus irmãos, Samuel e Lucas (*in memoriam*)

À DORMER TOOLS, pelo fornecimento das ferramentas utilizadas nos ensaios e aos seus colaboradores, Marcos Soto, Almir Fonseca e Pedro Cunha.

E, por fim, agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização do presente trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	06
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE SIMBOLOS.....	14
RESUMO.....	16
ABSTRACT.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo geral.....	20
2.1.1 Objetivos específicos.....	20
2.2 Justificativa.....	21
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1 Materiais compósitos.....	22
3.1.1 Resina epóxi.....	24
3.1.2 Carga metálica particulada.....	25
3.1.3 Compósito de resina epóxi com pó de ferro.....	26
3.2 Generalidades do processo e das ferramentas para furação.....	28
3.2.1 Tipos de brocas.....	28
3.2.2 Metal-duro.....	29
3.2.3 Geometria e nomenclatura das brocas helicoidais.....	31
3.2.4 Parâmetros de corte.....	32
3.2.5 Desgaste da ferramenta e critérios de fim-de-vida.....	34
3.3 Qualidade da superfície do furo.....	38
3.4 Furação de materiais compósitos.....	42
3.4.1 Qualidade nos materiais compósitos.....	47
3.4.2 Torque e força de avanço nos materiais compósitos.....	49
3.5 Considerações finais.....	52
4 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS.....	53
4.1 Corpos de prova.....	53
4.1.1 Materiais do corpo de prova.....	54
4.2 Meios de medição.....	56
4.2.1 Análise de desgaste da ferramenta, rebarbas e lascamentos nos furos.....	56

4.2.2	Análise de rugosidade na parede do furo.....	57
4.2.3	Análise da textura e microestrutura na parede do furo.....	57
4.2.4	Medições da força de corte e da força de avanço.....	58
4.3	Máquina-ferramenta.....	59
4.4	Ferramentas de corte – brocas de metal-duro e aço-rápido.....	59
4.5	Pré-ensaios de furação.....	62
4.5.1	Parâmetros de corte Utilizados.....	62
4.6	Características do processo de fabricação dos corpos de prova.....	63
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
5.1	Caracterização do corpo de prova.....	67
5.1.1	Corte vertical do corpo de prova.....	67
5.1.2	Corte horizontal do corpo de prova.....	70
5.1.3	Análise da integridade da superfície na parede do furo.....	73
5.2	Avaliação da qualidade do furo.....	75
5.2.1	Resina epóxi sem carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	79
5.2.2	Resina epóxi sem carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	83
5.2.3	Resina epóxi sem carga metálica (usando broca de aço-rápido) .....	86
5.2.4	Resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	89
5.2.5	Resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	93
5.2.6	Resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	98
5.2.7	Resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	101
5.3	Análise da força de avanço e torque.....	106
5.4	Avaliação do desgaste das ferramentas.....	113
5.5	Usinabilidade.....	114
6	CONCLUSÕES.....	117
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	120
7	REFERÊNCIAS.....	121

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema de formação de um material compósito .....	22
Figura 02 – Ligação química do monômero epóxi.....	24
Figura 03 – Estrutura molecular da resina epóxi derivada do bisfenol A .....	24
Figura 04 – Micrografia da carga metálica particulada de pó de ferro com tamanho médio de 100 $\mu\text{m}$ .....	26
Figura 05 – Micrografia de carga de alumínio com três diferentes frações de volume: (a)10%, (b) 20% e (c) 30%. Escala de 200 $\mu\text{m}$ . Os pontos pretos são partículas arrancadas durante a preparação da amostra .....	27
Figura 06 - Broca tipo <i>Dagger</i> com quatro gumes principais e gume transversal reduzido .....	28
Figura 07 – Broca tipo <i>one shot</i> com canais retos e dois ângulos de corte no gume principal .....	29
Figura 08 – Constituintes presentes na estrutura do metal-duro em duas fases, alfa e beta .....	30
Figura 09 – Principais denominações da geometria de uma broca helicoidal.....	31
Figura 10 – Geometria da ponta da broca helicoidal .....	31
Figura 11 – Aumento da espessura do núcleo .....	32
Figura 12 – Largura e profundidade de corte na furação .....	34
Figura 13 – Desgaste de uma broca helicoidal .....	36
Figura 14 – Seção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores .....	39
Figura 15 – Representação esquemática dos fatores que definem a integridade da superfície de um produto acabado .....	40
Figura 16 – Ilustração do parâmetro de rugosidade $R_a$ em função da distância pela altura e profundidade de picos e vales, respectivamente.....	41
Figura 17 – Ilustração do parâmetro de rugosidade $R_z$ , evidenciando o comprimento de medição unitário " $l_e$ " dentro do comprimento de medição " $l_m$ ".....	41
Figura18 – Principais aspectos a serem considerados na furação de plásticos reforçados com fibra .....	43

Figura 19 – Radiografia de peças furadas: a) broca helicoidal; b) broca <i>Dagger</i> ; c) broca com ponta em W .....	44
Figura 20 – Materiais de ferramentas usados na furação de materiais compósitos.....	45
Figura 21 – Efeito de delaminação na furação de material compósito com carga de fibras .....	47
Figura 22 – Imagem feita por um microscópio eletrônico por varredura mostrando o arrancamento e quebra das fibras de um material compósito após a usinagem .....	48
Figura 23 – Curvas típicas de força de avanço (curva superior) e torque (curva inferior) .....	51
Figura 24 – Dimensões em milímetros do corpo de prova.....	54
Figura 25 – Distribuição por frequência de tamanho das partículas de ferro usadas nos corpos de prova .....	55
Figura 26 – Estereoscópio com câmera CCD.....	56
Figura 27 – Rugosímetro de bancada.....	57
Figura 28 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) – UFSC.....	58
Figura 29 – Equipamentos para ensaio de força .....	58
Figura 30 – Fresadora utilizada nos ensaios.....	59
Figura 31 – Broca com geometria especial de metal-duro para materiais compósitos, diâmetro de 8,0 milímetros.....	60
Figura 32 – Geometria da ponta da broca de metal-duro.....	60
Figura 33 – Broca de aço-rápido convencional usada nos ensaios, diâmetro de 8,0 milímetros.....	61
Figura 34 – Geometria da ponta da broca de aço-rápido.....	61
Figura 35 – Misturador especial a vácuo com manômetro.....	64
Figura 36 – Vazamento da resina epóxi no molde de vidro.....	64
Figura 37 – Corte vertical A-A do corpo de prova com carga de pó de ferro.....	67
Figura 38 – Análise da amostra da superfície da resina epóxi sem carga metálica, retirada do centro do corpo de prova em um corte vertical .....	68
Figura 39 – Amostra do corpo de prova com sedimentação da carga metálica com detalhe na parte que corresponde a entrada da broca no material.....	68
Figura 40 – Amostra do corpo de prova com sedimentação da carga metálica detalhando a parte que corresponde a entrada da broca no material..	69

Figura 41 – Distribuição da carga metálica na resina epóxi para o corpo de prova com 30% de carga metálica.....	70
Figura 42 – Corte horizontal B-B do corpo de prova no centro da espessura da parede.....	70
Figura 43 – Distribuição da carga metálica – partículas de ferro – em um corte horizontal no centro da espessura do corpo de prova de resina epóxi com 10% de carga metálica (MEV – BSE).....	71
Figura 44 – Distribuição da carga metálica na resina epóxi no copo de prova com 30% de carga metálica.....	72
Figura 45 – Corte do corpo de prova para analisar a integridade da superfície do furo.....	73
Figura 46 – Amostra do corpo de prova com 10% de carga metálica. A integridade da superfície não foi afetada durante a furação.....	74
Figura 47 – Amostra do corpo de prova com 30% de carga metálica. A integridade da superfície não foi afetada durante a furação.....	75
Figura 48 – Corte do corpo de prova mostrando a área da sondagem (em vermelho).....	76
Gráfico 49 – Gráfico mostrando os valores de rugosidade $R_a$ , para as velocidades de corte de 50 e 100 m/min para todas as composições de resinas epóxi.....	78
Gráfico 50 – Gráfico mostrando os valores de rugosidade $R_z$ , para as velocidades de corte de 50 e 100 m/min para todas as composições de resinas epóxi.....	78
Figura 51 – Micrografia da resina epóxi na metade do furo com aumento de 50x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	79
Figura 52 – Microestrutura da resina epóxi na metade do furo com aumento de 250x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	80
Figura 53 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 0% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	80
Figura 54 – Cavaco da resina sem carga e $v_c$ de 50 m/min .....	81
Figura 55 – Micrografia da resina epóxi na entrada do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	82

Figura 56 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro, $v_c$ 50 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	82
Figura 57 – Micrografia da resina epóxi na mediatriz do furo com aumento de 50x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	83
Figura 58 – Microestrutura da resina epóxi na metade do furo com aumento de 250x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	83
Figura 59 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 0% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	84
Figura 60 – Cavaco da resina sem carga e $v_c$ de 100 m/min.....	84
Figura 61 – Micrografia da resina epóxi na entrada do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	85
Figura 62 – Micrografia da resina epóxi na saída do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	85
Figura 63 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro, $v_c$ 100 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	86
Figura 64 – Micrografia do meio do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min.....	87
Figura 65 – Ampliação da cavidade da figura 64.....	87
Figura 66 – Micrografia da entrada do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min.....	88
Figura 67 – Micrografia da saída do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min.....	88
Figura 68 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro, $v_c$ 50 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	89
Figura 69 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	90
Figura 70 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 500x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	90

Figura 71 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	91
Figura 72 – Cavaco da resina com 10% de carga e $v_c$ de 50 m/min.....	91
Figura 73 – Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	92
Figura 74 – Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	92
Figura 75 – Resina epóxi com 10% de carga de pó de ferro, $v_c$ 50 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	93
Figura 76 – Micrografia da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	94
Figura 77 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 100x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	94
Figura 78 – Microestrutura no meio da parede do furo com aumento de 500x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	95
Figura 79 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	96
Figura 80 – Cavaco da resina com 10% de carga e $v_c$ de 100 m/min.....	96
Figura 81 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 31x. Resina com 10% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	97
Figura 82 – Resina epóxi com 10% de carga de pó de ferro, $v_c$ 100 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	97
Figura 83 – Micrografia da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 50x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	98
Figura 84 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	99
Figura 85 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min.....	99
Figura 86 – Cavaco da resina com 30% de carga e $v_c$ de 50 m/min.....	100
Figura 87 – Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	100

Figura 88 – Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 50 m/min.....	101
Figura 89 – Resina epóxi com 30% de carga de pó de ferro, $v_c$ 50 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	101
Figura 90 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 100x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	102
Figura 91 – Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	102
Figura 92 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min.....	103
Figura 93 – Cavaco da resina com 30% de carga e $v_c$ de 100 m/min.....	104
Figura 94 – Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 29x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min .....	105
Figura 95 – Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e $v_c$ 100 m/min.....	105
Figura 96 – Resina epóxi com 30% de carga de pó de ferro, $v_c$ 100 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.....	106
Figura 97 – Força de avanço para resina sem carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	107
Figura 98 – Torque para resina sem carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	108
Figura 99 – Força de avanço para resina sem carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	108
Figura 100 – Torque para resina sem carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	109
Figura 101 – Força de avanço para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	109
Figura 102 – Torque para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	110
Figura 103 – Força de avanço para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	110
Figura 104 – Torque para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	111

Figura 105 – Força de avanço para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	111
Figura 106 – Torque para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.....	112
Figura 107 – Força de avanço para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	112
Figura 108 – Torque para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.....	113
Figura 109 – Marca nos flancos da broca de metal-duro, na usinagem de resina epóxi com carga metálica.....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Forças de avanço e torque durante a furação de resina epóxi reforçada com fibra de vidro .....	52
Tabela 2 – Propriedades mecânicas da resina sem carga .....	55
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da resina com carga de pó de ferro .....	55
Tabela 4 – Relação entre material, velocidade de corte e broca utilizada.....	63
Tabela 5 – Força de avanço e torque para diferentes quantidades de carga na resina epóxi e diferentes velocidades de corte.....	107

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Minúsculas

$a_p$	[mm]	Profundidade de corte
$b$	[mm]	Largura de corte
$d$	[mm]	Diâmetro da broca
$f$	[mm]	Avanço
$f_z$	[N]	Força na direção Z
$F$	[N]	Força de usinagem
$F_c$	[N]	Força de corte
$F_f$	[N]	Força de avanço
$h$	[mm]	Espessura de corte
$l_e$	[mm]	Comprimento de medição unitário
$l_m$	[mm]	Comprimento de medição
$M_t$	N.m	Momento torçor
$r$	[mm]	Raio da broca
$r_\epsilon$	[mm]	Raio de quina
$v_c$	[m/min]	Velocidade de corte

### Letras Maiúsculas

$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Desvio médio das amplitudes
$R_y$	[ $\mu\text{m}$ ]	Altura máxima do perfil de rugosidade
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Profundidade média de rugosidade
$V_B$	[mm]	Largura média de desgaste do flanco
$V_{B\text{max}}$	[mm]	Largura máxima de desgaste do flanco

### Letras Gregas

$\alpha$	[graus]	Ângulo de incidência
$\beta$	[graus]	Ângulo de cunha
$\epsilon$	[graus]	Ângulo de quina

$\sigma$	[graus]	Ângulo de ponta
$\psi$	[graus]	Ângulo do gume transversal
$\pi$		Pi

### **Abreviaturas**

HSS	<i>High-speed-steel</i> (aço-rápido)
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro

## RESUMO

Os materiais compósitos vêm, a cada dia, ganhando mais espaço dentro das indústrias, principalmente para aplicações de alto desempenho como aeroespaciais, militares e esportivas. Nos anos mais recentes, os materiais compósitos têm se revelado como um dos grupos de materiais tecnológicos mais interessantes. As razões da sua crescente utilização estão ligadas às suas propriedades características, tais como o seu baixo peso, a elevada resistência, rigidez, propriedades térmicas e elétricas. Para aplicações como molde de injeção na produção de protótipos ou peças e estruturas para a proteção eletromagnética de equipamentos, é necessário conhecer as características de usinabilidade do material compósito que está sendo utilizado. Isto ocorre porque, na grande maioria dos casos, é preciso realizar algum tipo de usinagem após o processo de vazamento ou injeção do molde. Visto que o processo de furação é um dos mais utilizados na indústria, essas peças precisam frequentemente de furos para junção mecânica, extração do material injetado e adição de macho, quando necessário. Por isso, tais furos requerem uma qualidade da superfície compatível com a necessidade que se propõe, caso contrário, podem levar à ruptura do molde pela propagação de trincas ou deformações e irregularidades na peça injetada. Dentro desta conjuntura, o presente trabalho propõe uma avaliação da usinabilidade e, sobretudo, da qualidade dos furos tanto na entrada quanto na saída de materiais compósitos de matriz polimérica (resina epóxi) com e sem carga metálica (pó de ferro) em ensaios de furação. Para a realização dos ensaios de furação, foi utilizada uma velocidade de avanço constante (0,3 mm), variando a velocidade de corte (50 – 100 m/min) e a quantidade de carga metálica no material compósito (0% – 10% – 30%). Brocas de metal-duro com geometria especial sem revestimento foram usadas nos experimentos. Para efeito comparativo, também foi utilizada uma broca de aço-rápido convencional. A força de avanço e o torque foram monitorados durante os ensaios. A qualidade do furo foi analisada referente à rugosidade, marcas na parede do furo e arrancamento de carga metálica, bem como, lascamentos e rebarbas nas bordas do furo. Como resultado, pode-se verificar que, com o aumento da quantidade de carga metálica no material compósito, tanto o torque quanto a força de avanço tendem a aumentar. Na mesma direção segue a qualidade da superfície, onde os lascamentos na entrada e saída do furo foram reduzidos, tal como a rugosidade, esta última mais acentuadamente para o caso de 10% e 30% de carga metálica.

Palavras-chave: furação, qualidade, usinabilidade, compósitos, epóxi, pó de ferro.

## ABSTRACT

Composite materials have, at a daily basis, gained range in the industries, mainly in the use of high performance such as aerospace, military and sports. In more recent years, the composite materials have shown to be one of the most interesting group of technological materials. The reasons for their increasing use are linked to their characteristic proprieties, such as low weight, high resistance, strength, electrical and thermal proprieties. For the application as an injection mold in the production of prototypes or parts and structures for the electromagnetic protection of equipments, it is necessary to know the machining characteristic of the composite material which is being used. This happens because, in most cases, it is necessary to perform some kind of machining after the process of leakage or injection. As the drilling process is one of the most used in the industry, these parts frequently need holes for mechanic joint, extraction of the injected material, and addition of molding core, when necessary. Therefore, such holes require a quality of surface compatible with the necessity to which it is aimed, otherwise, they can cause the breakage of the mold through the spread of cracks or deformities and irregularities in the injected part. In this panorama, this work proposes an evaluation of the machining and, moreover, of the quality of the holes either at the entrance or at the exit of composite materials from polymer matrix - epoxy resin - with and without metallic charge - iron-powder - in drilling trials. To carry out the drilling trials, a constant feed speed of (0,3 mm) was used, by varying the cut speed (50 – 100 m/min) and the quantity of metallic charge in the composite material (0% – 10% – 30%). Drills of carbide without coating and with special geometry were used in the experiments. For a comparative effect, a conventional high speed steel drill was also used. The axial force and the torque were monitored during the trials. The quality of the hole was thoroughly analyzed in the aspects roughness, marcs on the wall of the hole and pull-out of the metallic charge as well as chippings and burrs. As a result, one can verify that, as the metallic charge in the composite material is increased, either the torque or the axial force tend to increase. The same way follows the quality of the surface, where the chippings at the entrance and exit of the hole were seduced, as well we the roughness, the latter more outstanding for the case of 10% and 30% of metallic charge.

Key-words: drilling, quality, machinability, epoxy, iron powder.

## 1 INTRODUÇÃO

A atual realidade de mercado exige que os ciclos de desenvolvimento de produtos sejam cada vez menores, de modo a se flexibilizar a produção e a não se perder competitividade. Além disso, na atualidade, percebe-se uma necessidade crescente de se produzir pequenos lotes com uma elevada diversificação de produtos (GARCIA, 2001).

Diante deste fato, surgem novos processos de prototipagem rápida com o objetivo de se minimizar o tempo de obtenção de um protótipo para teste. Um desses processos é a confecção de molde em resina epóxi com adição de carga metálica, para a injeção de termoplásticos. Tais compostos trazem vantagens para o processo de injeção, pois reduzem o custo de produção da peça em razão da otimização de moldes, levando em consideração o baixo custo de produção do molde. Outra aplicação de grande importância é a blindagem eletromagnética de equipamentos eletrônicos, tanto para não sofrerem como para não causarem interferências em outros equipamentos.

Estes materiais são chamados de compósitos por possuírem duas fases distintas: a fase contínua, denominada de matriz, e a fase dispersa, denominada de carga (JESUS, 2005). Em geral, a fase contínua envolve a fase dispersa. A união dos dois materiais geralmente proporciona características melhores que os dois materiais individualmente, desta forma, propriedades específicas podem ser alcançadas mais facilmente.

Tratando-se de materiais recentemente desenvolvidos, constata-se a falta de estudos mais aprofundados sobre a usinabilidade dos referidos compósitos, mais especificamente o processo de furação, que ocupa um lugar destacado dentre os processos de usinagem. Dentre estes, aproximadamente 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica dizem respeito a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da broca. A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com gumes de geometria definida (STEMMER, 2001). Esses moldes utilizados em prototipagem rápida necessitam frequentemente de furos para junção mecânica, extração do material injetado e adição de macho, quando necessário. Entretanto, tais furos requerem uma boa qualidade da superfície, caso contrário, podem levar à ruptura do molde pela propagação de trincas ou deformações e irregularidades na peça

injetada. Porém, tem-se constatado que as brocas usadas para a usinagem de metais não são apropriadas para a usinagem de materiais compósitos, por se tratar, neste caso, de um material termofixo e uma matriz frágil, que exigem geometrias específicas para broca.

Este trabalho visa estudar o processo de furação de materiais compósitos com matriz de resina epóxi com carga de pó de ferro e resina epóxi sem carga. Com este estudo, pretende-se contribuir para o entendimento do processo de furação desse material compósito buscando uma aplicação mais ampla destes novos materiais na indústria. A furação será realizada com brocas de metal-duro, que possuem uma geometria especialmente desenvolvida para o presente estudo.

Na sequência deste trabalho, no capítulo 2 são apresentados os objetivos, tanto o geral como os específicos, fazendo um direcionamento da linha de pesquisa. São explanadas também as justificativas para a realização do trabalho, comentando a real necessidade de fazê-lo e os benefícios que ele traz para o desenvolvimento tecnológico na usinagem de materiais compósitos. O capítulo 3 realiza uma fundamentação teórica sobre usinagem, descrevendo os tipos, geometria e nomenclatura das brocas, desgaste e critério de fim-de-vida da ferramenta. É dissertado ainda acerca da qualidade da superfície usinada, resina epóxi, materiais compósitos e sua usinagem. Referindo-se ao capítulo 4, tem-se os materiais, métodos e equipamentos utilizados no trabalho, em que são descritos o planejamento, a execução dos experimentos para estudo do melhor parâmetro de corte através dos pré-ensaios. No capítulo 5 é mostrada a fabricação e caracterização do corpo de prova, apresentado e discutido os resultados, medições da rugosidade, do desgaste da ferramenta, do torque e força de avanço. O capítulo 6 destaca as conclusões do trabalho e as sugestões para novas pesquisas. Por fim, no capítulo 7 traz a lista de referências usadas no trabalho.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Realizar a fabricação de peças, na forma de corpos de prova, em material de matriz polimérica epóxi, com 10% e 30% de carga de pó de ferro e em resina epóxi sem carga de ferro. Posteriormente, utilizando o processo de furação com brocas de metal-duro e que tem uma geometria especial, estudar a usinabilidade destes materiais e a qualidade dos furos obtidos.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Utilizando técnicas apropriadas, fabricar corpos de prova em material de matriz polimérica epóxi, com 10% e 30% de carga de pó de ferro e corpos de prova sem carga de pó de ferro;
- Examinar a microestrutura desses corpos de prova para avaliar a qualidade dos referidos materiais em termos da homogeneidade de distribuição da carga de pó de ferro e presença de vazios na microestrutura;
- Realizar a furação dos corpos de prova dos distintos materiais, utilizando uma broca especial e diferentes condições de corte;
- Analisar a parede dos furos no que tange à rugosidade da superfície desses furos;
- Determinar a presença de eventuais defeitos como rebarbas e lascamentos nos furos a fim de identificar as possíveis causas e procurar reduzir as suas ocorrências;
- Avaliar a integridade da superfície dos furos na camada (região) com maior risco de influência da ação da broca durante o processo de furação para identificar possíveis arrancamentos da carga metálica e a presença de trincas nas paredes desses furos;
- Verificar o comportamento ao desgaste dessas brocas na usinagem dos diferentes tipos de materiais em estudo;
- Analisar os materiais em questão sob o ponto de vista da usinabilidade, tendo referência às forças de corte, o desgaste das brocas, tipos e formas de cavaco, bem com a própria qualidade dos furos obtidos no processo de furação.

## 2.2 Justificativa

Este é um dos primeiros trabalhos, particularmente na UFSC, que se propõe a avaliar a furação de resina epóxi com carga metálica ferrosa visando à qualidade do furo no que diz respeito, principalmente, ao efeito de lascamento tanto na entrada como na saída do furo. E é um estudo primo do desempenho de uma ferramenta de metal-duro com a geometria especialmente desenvolvida para a usinagem de material compósito em questão.

Dentro do espectro da engenharia de manufatura, poucos questionam o fato de que a furação é a operação de corte mais amplamente usada (SANDVIK, 2000). No Brasil, uma grande parte das operações de furação ainda são realizadas com brocas helicoidais de aço-rápido com ou sem camada de revestimento (DINIZ,2000).

A furação é uma operação complexa, na qual existem mecanismos de extrusão e corte, no primeiro caso, é efetuada pela ponta da broca, cuja velocidade é nula ou quase nula, e no segundo, pelos gumes no movimento de rotação.

Devido à natureza dos compósitos, estes apresentam problemas específicos na furação, e como já dito anteriormente, um dos principais é o lascamento nos furos. Todavia, não podem ser descartados problemas de igual importância, como o amolecimento da matriz pelas altas temperaturas geradas em virtude do atrito da broca com a parede do furo, ou ainda, o arrancamento das cargas dispersas na matriz, riscos na parede do furo e rebarbas.

Com a realização deste trabalho, abre-se a oportunidade para uma aplicação mais embasada nos compósitos polímero-metais à base de resina epóxi nas indústrias, através da obtenção de informações sobre os melhores parâmetros de usinagem, em especial a furação, para se obter a melhor qualidade da superfície usinada.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo foi apresentada uma pesquisa bibliográfica, buscando informações a respeito de características de materiais compósitos e suas composições. Em seguida, são apresentados conceitos fundamentais de usinagem. Por fim, faz-se uma abordagem no estado da arte, especificamente na furação de materiais compósitos poliméricos.

#### 3.1 Materiais compósitos

Um material compósito é constituído pela combinação de dois ou mais materiais que resultam em uma única combinação de propriedade. Essa definição é mais geral e pode incluir ligas de metais, co-polímeros plásticos, minerais e madeira em geral. As propriedades finais dos materiais compósitos geralmente são melhores que as propriedades dos materiais individuais que os constituem. Em um material compósito há uma fase contínua, que é denominada matriz e uma fase dispersa, denominada carga (Figura 1).

Os compósitos não foram inventados pelo homem, uma vez que eles existem na natureza. Um exemplo é a madeira, um compósito de fibras de celulose em uma matriz de lignina (substância que se deposita nas paredes das células vegetais, conferindo a esta notável rigidez) (MAZUMDAR, 2002)

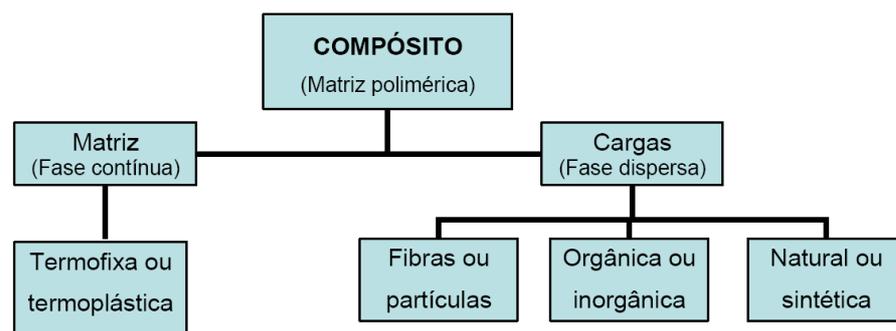


Figura 1 – Esquema de formação de um material compósito [17].

Nem todos os materiais que possuem mais de um componente são considerados compósitos. Por exemplo, aço perlítico não é considerado um compósito, ainda que possua mais de um componente, entretanto várias partes são da mesma natureza.

Para materiais reforçados com partículas dispersas, normalmente se utilizam partículas na ordem de 10 a 250 nanômetros de diâmetro adicionados na matriz e de 5% a 40% por volume de material podem ser dessas partículas. Tais partículas agem para ajudar na resistência à deformação da matriz, formando um material mais duro e mais resistente (SOTCKTON, 1997).

Compósitos baseados em polímeros possuem propriedades superiores, com alta razão de peso/resistência, peso/rigidez e resistência à corrosão. Desta forma, são preferidas para aplicações de alto desempenho, como aeroespaciais, militares e esportivas. Compósitos de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) têm, sucessivamente, substituído materiais tradicionais em muitas aplicações nas quais se requer baixo peso e alta resistência. Processos de usinagem são geralmente usados para cortar, furar ou dar acabamento em laminados de PRFV na montagem de produtos aeronáuticos, automobilísticos, esportivos, dentre outros.

Nos anos mais recentes, os materiais compósitos têm se revelado como um dos grupos de materiais tecnologicamente mais interessantes. As razões da sua crescente utilização estão ligadas às suas propriedades características, tais como o seu baixo peso, a elevada resistência e a grande rigidez mecânica. Entre as desvantagens na sua utilização, pode-se citar o seu elevado custo de produção e a necessidade de equipamento de proteção individual para os trabalhadores, além de problemas ambientais. Embora o desenvolvimento destes materiais tenha sido efetuado pelas indústrias de defesa e aeroespacial, assiste-se recentemente ao crescimento no uso dos citados materiais em áreas tão distintas como a indústria náutica, aeronáutica, automobilística, esportiva, lazer (DURÃO et al, 2006).

Os materiais são comumente classificados como: naturais, metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Todos eles são beneficiados, sintetizados ou compostos, para somente aí serem utilizados pela indústria.

Com os materiais compósitos, é possível obter produtos com diferentes propriedades, como: baixo peso, ductilidade, resistência a altas temperaturas, dureza, resistência ao choque, a corrosão, ao desgaste, cortes e a propagação de trincas. Avançadas aeronaves e ônibus espaciais têm confiado aos compósitos alguns de seus componentes devido a tais propriedades (ARAÚJO; ABRÃO; FARIA, 2005).

Plásticos reforçados com fibras estão sendo largamente usados na fabricação de aviões e naves espaciais. Outra aplicação relevante para a aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibra, sobretudo fibra de vidro, é na indústria

eletrônica, em que eles são empregados na produção de placas de circuito impresso (ABRÃO et al, 2007).

Um desses plásticos que estão cada vez mais sendo aplicados como reforço de fibras e partículas é a resina epóxi, que será apresentada a seguir.

### 3.1.1 Resina epóxi

A palavra epóxi vem do grego "EP" – sobre ou entre – e do inglês "OXI" – oxigênio – literalmente o termo significa oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. O grupo epóxi mais simples é aquele formado por um anel de três elementos, em que o termo a-epóxi ou 1,2-epóxi é aplicado. O óxido de etileno é um exemplo desse tipo, conforme pode ser visualizado na Figura 2 (SILAEX, 2007).

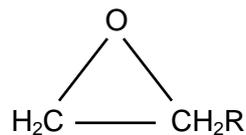


Figura 2 – Ligação química do monômero epóxi.

Assim, pode-se citar a resina epóxi à base de Bisfenol A (figura 3), que é a mais utilizada, já que é versátil e de menor custo, proveniente da reação de Epicloridrina e Bisfenol A, podendo ser líquida, semi-sólida ou sólida, dependendo do peso molecular.

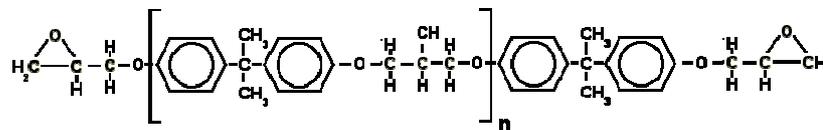


Figura 3 – Estrutura molecular da resina epóxi derivada do bisfenol A (SILAEX, 2007).

A resina epóxi é usada frequentemente com reforços de fibra para a aplicação em compósitos. As resinas dessa classe têm uma boa rigidez, resistência, estabilidade dimensional, resistência química e mostram uma adesão considerável quando embebidas na fibra.

Para o uso de matrizes em materiais compósitos, as resinas epóxi possuem algumas vantagens sobre outros tipos de polímeros, entre elas (CASTILHO, 2005):

- Natureza polar, que confere excelente adesão a uma grande variedade de cargas;
- Baixa contração na cura, oferecendo uma boa precisão dimensional para a fabricação de peças;
- Não existe o desprendimento de produtos voláteis durante a cura, evitando a formação indesejada de bolhas;
- Estrutura reticulada, que oferece uma excelente resistência em ambientes quimicamente agressivos, tanto aquosos como não aquosos.

Para que a reação de cura ocorra, é necessário adicionar agentes de cura. Os agentes de cura, às vezes chamados de endurecedores, unificam todos os constituintes monoméricos em uma única molécula, produzindo assim uma estrutura reticulada.

### **3.1.2 Carga metálica particulada**

Para Chung et al (2003), as cargas metálicas particuladas podem ser pó de alumínio, pó de cavaco de ferro fundido ou fibras curtas de alumínio. As partículas mostram uma grande variedade de características que determinam sua utilização. Apresentam-se com diferentes propriedades e formatos variados, que podem ser esféricos, cúbicos, floculares ou uma mistura das diferentes formas. Quanto ao tamanho, este também é bastante variado, podendo ser de apenas alguns nanômetros até várias dezenas de milímetros, como no caso de partículas em formato de fibras (JESUS, 2005).

Neste trabalho será usada como carga metálica partículas de ferro. O ferro é um elemento do grupo 8B, período 4 e bloco d da tabela periódica. À temperatura ambiente, o ferro se encontra no estado sólido. É o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre (aproximadamente 5%) e, entre os metais, somente o alumínio é mais abundante. O ferro é normalmente utilizado para aplicações comerciais devido à sua dureza, disponibilidade e baixo custo. Possui boa propriedade de liga com outros metais, tais como, níquel, molibidênio, manganês, entre outros elementos,

para produzir aço com diferentes propriedades. Na Figura 4 é exibida uma micrografia de carga de pó de ferro.

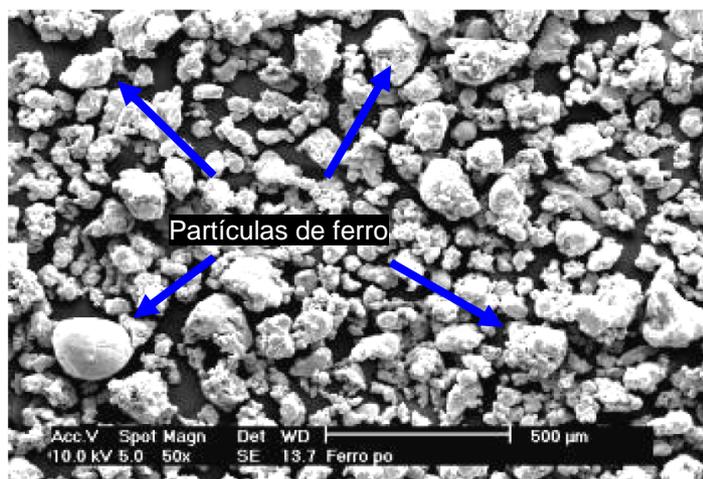


Figura 4 - Micrografia da carga metálica particulada de pó de ferro com tamanho médio de 100 µm (JESUS, 2005).

As cargas particuladas metálicas têm grande influência nas propriedades mecânicas e térmicas nos compostos de matriz polimérica. Aumentando-se a quantidade de carga metálica particulada na matriz polimérica, é verificado um aumento da condutividade térmica e uma melhora na precisão dimensional, assim como nas propriedades mecânicas (WYPYCH, 2000).

Tendo visto os principais constituintes do presente trabalho, que são a resina epóxi e a carga metálica, na sequência é feita uma abordagem nos materiais compósitos, que são a união desses dois materiais formando um só composto.

### 3.1.3 Compósito de resina epóxi com carga metálica

A forma das partículas influencia diretamente nas propriedades do compósito. Quando as partículas têm um formato irregular, permitem obter uma alta força de adesão interfacial entre a matriz e a carga. Para partículas com formato esférico, como possuem a menor razão possível entre volume e superfície, limita a área de absorção da resina, influenciando pouco na sua viscosidade.

Materiais compósitos feitos de matriz polimérica e partículas rígidas geralmente mostram um valor residual interno de tensões produzido durante o processo de fabricação. Esse fenômeno é uma consequência das diferenças na expansão térmica característico em um sistema bifásico. No caso de uma matriz polimérica feita pela cura da matriz em epóxi com carga metálica, tal diferença é

muito alta. Essa tensão interna no compósito tem uma forte influência no comportamento mecânico do material e depende do processo de cura, tipo de carga, formato, proporção e dispersão (GOYANES et al, 2003).

Goyanes et al (2003) usaram em seus experimentos diferentes quantidades de cargas particuladas de alumínio (Al 1060-0) e matriz de resina epóxi. O tamanho das partículas variava entre 106 e 125  $\mu\text{m}$ . Micrografias são mostradas na Figura 5, sem a presença de aglomerados ou bolhas. Em seu trabalho, o autor mostrou que a dureza do material compósito está ligada diretamente com a quantidade de carga metálica, e que quanto maior a quantidade de carga menor a dureza do material.

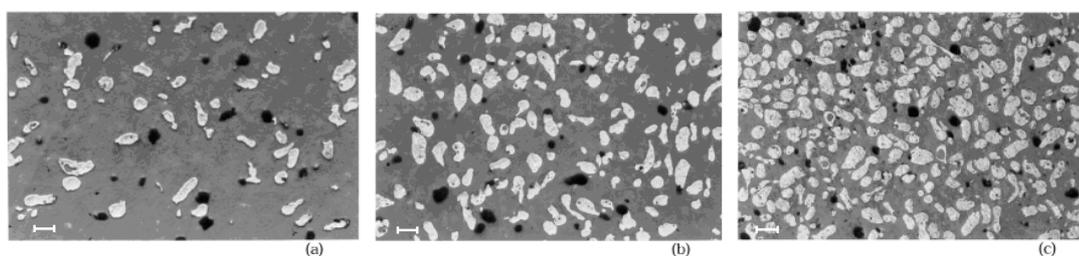


Figura 5 – Micrografia de carga de alumínio com três diferentes frações de volume: (a) 10%, (b) 20% e (c) 30%. Escala de 200  $\mu\text{m}$ . Os pontos pretos são partículas arrancadas durante a preparação da amostra (GOYANES et al, 2003).

Uma vez realizada esta apresentação sobre os materiais compósitos, passa-se na sequência à exposição dos tipos, materiais e geometrias das ferramentas para furação.

### 3.2 Generalidades do processo e das ferramentas para furação

Na usinagem com ferramenta de corte de geometria definida, tem-se como furação o processo empregado na execução de furos. Normalmente a ferramenta de corte, designada de broca, apresenta dois movimentos em relação à peça, sendo um de rotação e o outro de avanço (VILLARROEL, 1991).

Na furação, deve-se levar em consideração alguns fatores, como: diâmetro do furo, profundidade do furo, tolerâncias de forma e de medida, volumes de produção. O processo de furação é realizado sob condições relativamente severas, e como particularidades do processo, têm-se (KÖNIG, 1997; STEMMER, 2005):

- A velocidade de corte varia de um valor máximo na periferia até um valor nulo no centro da ferramenta, alterando assim os esforços no gume da ferramenta;

- O processo de remoção do cavaco, bem como o de distribuição do fluido de corte, é dificultado na furação à medida que aumenta a profundidade do furo;
- Existe uma distribuição inadequada de calor na região de corte;
- Cavacos grandes ou longos podem causar problemas na saída;
- As guias da ferramenta se atritam com a parede do furo durante o processo.

Os polímeros termofixos e termoplásticos puros, ou seja, quando não estão formando um material compósito, podem ser furados com brocas convencionais de aço-rápido (PLASTICSMAG, 2007). Porém, os parâmetros de usinagem são ligeiramente diferenciados, pois os polímeros termoplásticos possuem ponto de fusão, enquanto os termofixos não se fundem, mas pode haver um amolecimento do material polimérico com o aumento da temperatura (DURÃO et al, 2006; ABRÃO et al, 2007).

### 3.2.1 Tipos de brocas

Em função da aplicação, as brocas podem ser encontradas em diversas formas e tipos, tais como brocas chatas, brocas canhão, brocas helicoidais, brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro, brocas inteiriças de metal-duro, brocas escalonadas, brocas de centro, brocas com pastilhas reversíveis.

Durão *et al* (2006) se valeram de diferentes tipos de brocas de metal-duro para a furação de laminados de carbono/epóxi em seus estudos. A broca com ponta em “W” tem uma geometria do gume especial, que provoca uma tensão nas fibras de vidro, ao mesmo tempo em que as corta, proporcionando um corte mais limpo e uma superfície de corte com menos irregularidades. A broca *dagger* ou dardo, representada na Figura 6, pela sua geometria, obriga a que exista espaço suficiente para a saída da broca.



Figura 6 – Broca tipo *dagger* com dois gumes principais e gume transversal reduzido (DURÃO et al, 2006).

Segundo Fernandes e Cook (2006), a melhor geometria é a do tipo “*one shot*”, que pode ser vista na Figura 7. Esta broca foi especialmente desenvolvida para a furação de materiais compósitos e possui quatro canais retos e com dois

ângulos de corte. Seu projeto é similar ao de uma broca tipo *dagger*. Os canais retos são recomendados para uma rápida evacuação do cavaco. Outra importante característica desta broca é o gume transversal, o que equivale a um ponto diminuindo a força axial necessária para a furação.



Figura 7 – Broca tipo *one shot* com canais retos e dois ângulos de corte no gume principal (FERNANDES; COOK, 2006).

Piquet et al (2000), numa análise experimental da furação de placas carbono/epóxi com disposição quasi-isotrópica, recomendam que a broca deve ser em metal-duro, principalmente por razões econômicas, quando comparada com as brocas em diamante.

Um dos materiais de ferramentas utilizados na usinagem de materiais compósitos é o metal-duro, que é apresentado a seguir.

### 3.2.2 Metal-duro

Abrão et al. (2007) citaram em suas pesquisas que 48% das brocas utilizadas na furação de materiais compósitos são de aço-rápido e 49% são de metal-duro. Por este motivo, é interessante ressaltar algumas informações sobre o aço-rápido, visto que também será utilizado no presente trabalho.

O aço-rápido é uma ferramenta de alta liga e normalmente contém tungstênio, cromo e vanádio, como elementos principais de liga e outros metais para se obter as propriedades desejadas na ferramenta que podem ser: molibdênio, cobalto e manganês. A principal vantagem é a capacidade de manter a dureza até temperaturas em torno de 600°C enquanto que os aços carbono usados em ferramentas começam a amolecer em torno de 250°C. A maior desvantagem é dificuldade em se fazer o tratamento térmico que exige temperaturas de até 1300°C (STEMMER, 2001).

Como já dito anteriormente, a broca de aço-rápido será usada como comparação a de metal-duro que é apresentado a seguir.

O metal-duro foi desenvolvido em meados de 1927 e apresentado em Leipzig pela empresa Krupp, sob a denominação de WIDIA, que significa “como diamante” pela contração das palavras em alemão “Wie Diamant” (STEMMER, 2001; SCHROETER, 2002).

O metal-duro é um material compósito sinterizado, produto da metalurgia do pó, constituído por um ligante metálico, normalmente cobalto, e como carga, carboneto de tungstênio (Figura 8). A função do ligante é dar suporte e constituir a ligação dos carbonetos frágeis e oferecer tenacidade, enquanto que os carbonetos oferecem dureza e resistência ao desgaste do material. Outros materiais podem ser utilizados como ligantes e carga como níquel e carbonetos de titânio, tântalo e nióbio, respectivamente.

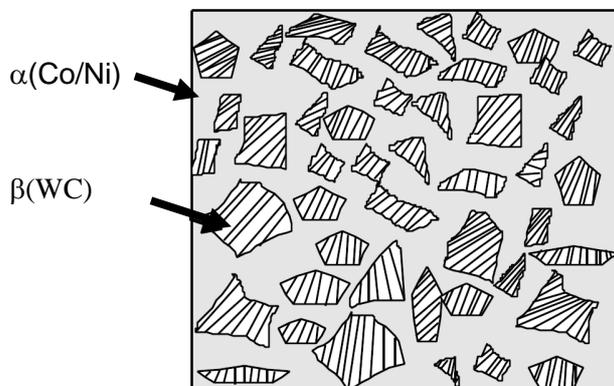


Figura 8 - Constituintes presentes na estrutura do metal-duro em duas fases, alfa e beta (SANDVIK, 2000).

Pode-se citar como vantagem do metal-duro: boa distribuição da estrutura em decorrência do próprio processo metalúrgico de fabricação, dureza elevada, resistência à compressão e resistência ao desgaste a quente. O metal-duro tem a 1000°C a dureza semelhante ao aço-rápido à temperatura ambiente, e ainda é possível melhorar essa qualidade com a mudança específica dos carbonetos e das proporções do ligante (KRATOCHVIL, 2004; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2002).

Brocas helicoidais com pastilhas de metal-duro são ferramentas utilizadas na execução de furos em materiais muito abrasivos, tais como: concreto, cerâmica e não-metálicos, numerosos tipos de plásticos, metais leves com ligas de silício e ferros fundidos duros (CASTILHO, 2005).

Além do material empregado, a geometria da ferramenta é muito importante para se obter bons resultados tanto na qualidade do furo quanto no rendimento do processo de usinagem. Assim a geometria das brocas helicoidais é discutida na próxima seção.

### 3.2.3 Geometria e nomenclatura das brocas helicoidais

As brocas helicoidais são as ferramentas mais usadas na execução de furos. Elas são normalizadas pela NBR 6176 e DIN 1412. De um modo geral, uma broca helicoidal é composta de uma haste, uma ou duas hélices com parte cortante.

As Figuras 9 e 10 mostram a extremidade onde está a parte cortante da broca helicoidal. Existem diversos tipos de afiação de brocas e deve-se buscar a afiação mais adequada para o material a ser usinado. O gume transversal é uma parte integrante do gume principal. Em decorrência do ângulo de saída negativo e da velocidade de corte muito baixa, este gume não apresenta uma ação de corte muito eficiente, e sim uma ação de esmagamento do material na direção dos gumes principais. Por este motivo, quanto menor for o gume transversal, menor será a força axial de corte, isto é, a força de avanço.

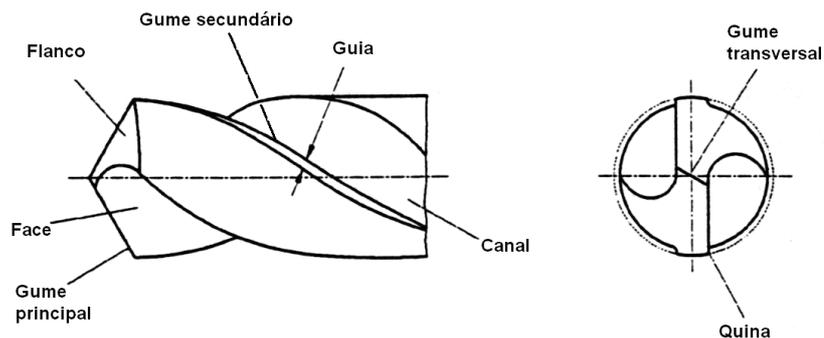


Figura 9 – Principais denominações da geometria de uma broca helicoidal (KÖNIG, 1997).

$\alpha$  = ângulo de incidência

$\beta$  = ângulo de cunha

$\gamma$  = ângulo de saída

$\varepsilon$  = ângulo de quina

$\sigma$  = ângulo de ponta

$\psi$  = ângulo do gume transversal

$r_\varepsilon$  = raio de quina

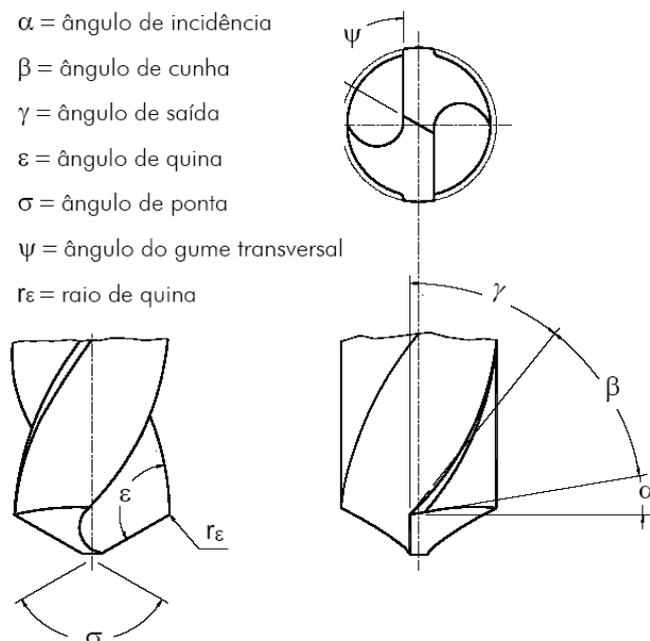


Figura 10 – Geometria da ponta da broca helicoidal (STEMMER, 2001).

Para a usinagem de polímeros termoplásticos, as ferramentas devem ser mantidas bem afiadas e é preciso empregar um eficiente sistema para a remoção de cavacos. O cavaco na usinagem de polímeros termoplásticos é do tipo fita contínua, devido às características de ductilidade e tenacidade do material. Estes podem ser removidos com jatos de ar, óleo solúvel e/ou exaustão, de outra forma, o polímero na parede do furo irá entrar em ponto de fusão e obstruir o furo. Isto se aplica especialmente em furos profundos. Com a obstrução do furo, a broca ficará presa, podendo entrar em colapso total (PLASTICSMAG, 2007; VICK, 2007).

Grande parte das brocas helicoidais são fabricadas com diâmetro de núcleo com dimensão crescente na direção da haste, Figura 11.

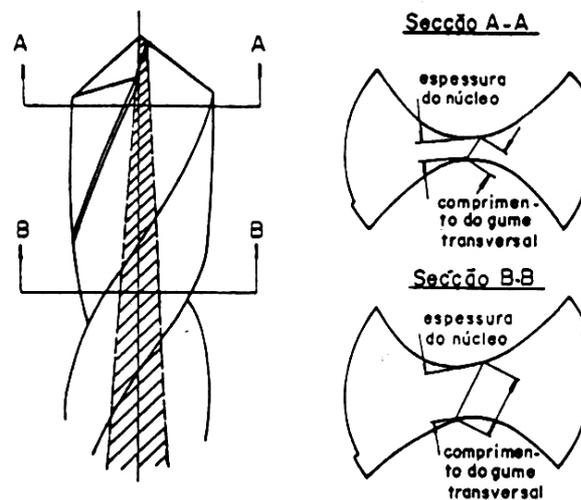


Figura 11 – Aumento da espessura do núcleo (VILLARROEL, 1991).

A geometria é o que dá forma a ferramenta e os parâmetros de corte fornecem informações ou grandezas para o movimento da ferramenta e são apresentados a seguir.

### 3.2.4 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte são grandezas no processo de furação que, por meio de ajustes prévios, geram a retirada de cavaco, bem como determinam o desempenho da ferramenta, consumo de energia e qualidade do produto. Dentre esses parâmetros pode-se destacar:

**a) Velocidade de Avanço ( $v_f$ )**

É o deslocamento do eixo da ferramenta no sentido axial, e normalmente expressa em milímetros por minuto ou milímetros por rotação. Para uma determinada combinação entre material usinado e o material da ferramenta, o avanço é limitado pela resistência mecânica, qual pode fletir ou até mesmo quebrar a broca, ou pelas características da máquina.

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}] \quad (3.1)$$

Em que:  $f$  = avanço da ferramenta [mm];  
 $n$  = número de rotações da ferramenta [rpm].

**b) Espessura de usinagem ( $h$ ):** é proporcional ao avanço e é medida perpendicularmente ao gume (Figura 12).

$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

Em que:  $\sigma$  = ângulo da ponta da broca [graus];  
 $f$  = avanço da ferramenta [mm].

**c) Profundidade de corte ( $a_p$ ):** equivalente à metade do diâmetro da ferramenta (Figura 12).

**d) Largura de usinagem ( $b$ ):** correspondente ao comprimento de cada gume principal para o caso de furação em cheio (Figura 12).

$$b = \frac{D}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

Em que:  $D$  = diâmetro da broca [mm];  
 $\sigma$  = ângulo da ponta da broca [graus].

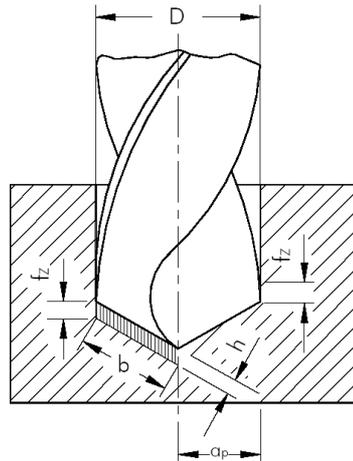


Figura 12 – Largura e profundidade de corte na furação (STEMMER, 2001).

### e) Velocidade de corte ( $v_c$ )

Considerando-se um ponto de referência no gume principal da broca, a velocidade de corte é a velocidade em um determinado instante deste ponto, segundo a direção e sentido de avanço. Deste modo, a velocidade de corte é sempre referida ao diâmetro externo da broca (STEMMER, 2005; ANDRADE, 2005).

Assim esses parâmetros são importantes e algumas recomendações para se obter um bom rendimento no processo de furação e a qualidade necessária da superfície dos furos são expostas: o polimento das brocas deve ser previsto para se evitar o aumento do atrito com o material; evitar a utilização de brocas que já tenham sido utilizadas para furar metais, visto que há uma tendência de encravamento; a retirada frequente da broca do furo auxilia para eliminar acúmulos de cavaco (PLASTICSMAG, 2007; USP, 2007; VICK, 2007).

Os parâmetros de corte bem definidos não só levam para uma melhor qualidade da peça usinada, como reduzem o desgaste da ferramenta. Assim, na próxima seção é discorrido sobre esse assunto.

### 3.2.5 Desgaste da ferramenta e critérios de fim-de-vida

A vida da ferramenta é um dos principais critérios de usinabilidade e pode-se definir como sendo o tempo efetivo de trabalho da ferramenta, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente

estabelecido. Existem diversas formas de identificar o fim-de-vida de uma ferramenta, entre elas a qualidade da superfície da peça usinada, o aumento da força de corte, da potência consumida, do torque, da força de avanço, ruídos considerados anormais, vibrações excessivas, sobreaquecimento do gume e outros (STEMMER, 2001; ANDRADE, 2005; MOCELLIN, 2002).

Em laboratórios, o critério mais utilizado é o desgaste, em razão da facilidade de ser quantificado. Os desgastes no flanco e na quina são usados como critérios de fim-de-vida pela sua influência na qualidade do furo, especialmente acabamento e dimensões da peça (CASTILHO, 2005).

Chambers e Bishop (1995) pesquisaram o desgaste da ferramenta depois da furação de materiais compósitos poliméricos e afirmaram que é particularmente difícil obter uma boa qualidade do furo feito com uma broca gasta, para uma montagem precisa de componentes estruturais. Lin e Chen (1996) também pesquisaram o desgaste de ferramenta, porém, quando usadas brocas de aço-rápido, eles descobriram que um aumento na velocidade de corte leva a um aumento do desgaste da ferramenta, o qual, conseqüentemente, provoca uma elevação na força de avanço, podendo prejudicar a qualidade do furo.

Lin e Chen (1996) realizaram um estudo furando um material compósito em alta velocidade e concluíram que um aumento da velocidade do corte conduz a um desgaste crescente da broca, e isso, por sua vez, provoca um aumento da força de avanço (Davim et al, 2004; ARAÚJO; ABRÃO; FARIA, 2005).

Durão et al. (2006) sinalizam que o desgaste das ferramentas é consequência da natureza abrasiva dos materiais poliméricos reforçados com fibra de vidro e da sua baixa condutividade térmica, causando um maior aquecimento da ferramenta.

O desgaste em brocas também se revela nas guias, nas quinas, no gume transversal e na superfície de saída (Figura 13). Contudo, em função dos materiais, geometria e condições de corte, pode haver um desgaste mais acentuado em algumas regiões do que em outras.

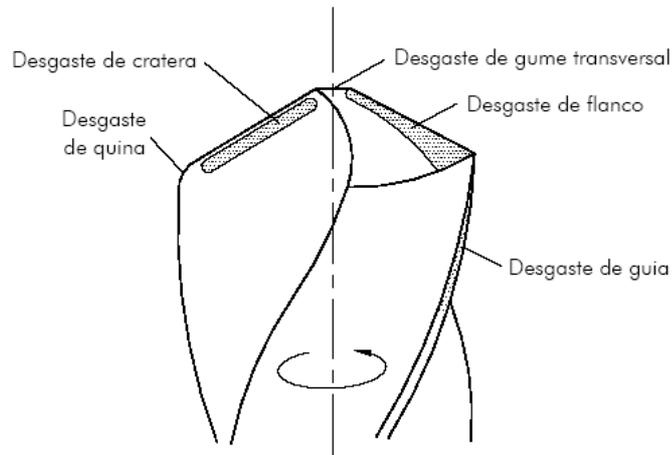


Figura 13 – Desgaste de uma broca helicoidal (CASTILHO, 2005).

Pode-se citar as seguintes principais causas de desgaste e avarias nas ferramentas:

- Abrasão;
- Adesão;
- Difusão;
- Oxidação;
- Deformação plástica.

**a)** Deformação plástica: ocorre quando a resistência da ferramenta a altas temperaturas não é mais suficiente para suportar as pressões de usinagem (STEMMER, 2001).

**b)** Abrasão: é o arrancamento de finas partículas de material, em decorrência do contato e movimento relativo, sob alta pressão e temperatura, entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras e abrasivas no material a ser usinado. A resistência à abrasão depende essencialmente da dureza e dos microconstituintes do material da ferramenta, e quanto maior a velocidade de corte, maior a intensidade do desgaste da ferramenta, e a redução da resistência da ferramenta em altas temperaturas de trabalho (STEMMER, 2001).

- c) Adesão:** este mecanismo se dá em virtude da ruptura dos microcaldeamentos na face da ferramenta. Os microcaldeamentos ocorrem por causa da alta temperatura e pressões presentes na zona de corte e da interação da superfície inferior do cavaco e da superfície da ferramenta, que por estarem livres de óxidos, caldeiam-se por adesão. A prova de que tais aderências podem se formar é o gume postiço, composto por partículas que se soldam na face da ferramenta e apresentam um elevado grau de deformação a frio, isto é, estão encruadas, duras e resistentes (STEMMER, 2001; CASTILHO, 2005).
- d) Difusão:** a difusão ocorre a temperaturas elevadas quando a ferramenta e o material possuem elementos com afinidade química. Para ferramentas de aço carbono e aço-rápido, este tipo de desgaste acontece raramente, pois a faixa de temperatura para ocorrer a difusão é bem mais elevada que a temperatura de amolecimento da ferramenta. Diferente é a situação nos metais duros, em que o fenômeno pode ocorrer em temperaturas na faixa de 700 a 1300 °C (STEMMER, 2001; CASTILHO, 2005).
- e) Oxidação:** a oxidação se dá em altas temperaturas, quando compostos químicos são formados por reações entre a peça e a ferramenta, resultando em uma película de óxido, que pode ser causa de desgaste. A oxidação frequentemente é responsável pela deterioração do gume secundário de corte, fazendo com que piore rapidamente a qualidade da superfície das peças usinadas. A oxidação em baixas temperaturas é normalmente evitada por camadas de material oxidado. Experiências realizadas demonstram que, na usinagem com metal-duro em altas velocidades, o desgaste é menor em atmosfera neutra do que na presença do ar (STEMMER, 2001; CASTILHO, 2005).

Segundo Fernandes et al, um dos maiores problemas apresentados na usinagem de compósitos com cargas de fibra de vidro e fibra de carbono é justamente o desgaste da ferramenta. O cavaco produzido durante a usinagem de compósitos de fibra de carbono é formado por micropartículas muito abrasivas. A saída ineficiente do cavaco é uma das maiores razões da alta taxa de desgaste. Com o desgaste da ferramenta, existe um aumento da força de corte, gerando uma maior delaminação do material compósito polimérico reforçado com fibras (FERNANDES; COOK, 2006).

Após esta breve discussão sobre o desgaste e avarias nas ferramentas se discutirá a questão da qualidade dos furos, pois o estado de desgaste da broca pode ser um dos fatores importantes a ser considerados neste aspecto, assim como a geometria e as condições de corte.

### **3.3 Qualidade da superfície do furo**

Uma superfície lisa pode ser distinguida de uma rugosa de diversas maneiras. Elas são diferentes quando manuseadas e olhadas. A superfície lisa desliza facilmente através de uma superfície similar, enquanto a rugosa proporciona uma grande fricção. Porém, não pode-se basear apenas nesses métodos qualitativos de verificação de rugosidade, já que eles são muito subjetivos. Por este motivo, são necessários meios numéricos para definir o quão rugosa é uma superfície.

Nas aplicações de engenharia, a textura da superfície é relacionada com a função, particularmente quando a superfície de interesse se move em contato com outra superfície (DAGNALL, 1986). O nome designado para componentes que tenham superfícies funcionais de componentes, sejam eles mecânicos, ópticos, eletroeletrônicos, biomédicos ou de outro tipo e natureza, é superfície técnica (BET, 1999).

A qualidade dos furos pode ser crítica na vida de uniões rebitadas, para uma das finalidades que os furos são usados. Aspectos do furo como ondulações e rugosidade da parede do furo, retitude axial, conicidade e circularidade da seção podem causar um nível de tensão em rebites, originando uma fratura. A furação é particularmente uma operação delicada para laminados de materiais compósitos porque as grandes forças concentradas geradas podem levar a um dano extenso (MOHAN et al, 2007; SONBATY; KHASHABA; MACHLY, 2004).

Na Figura 14, é esquematizada uma ampliação parcial, simplificada e esquemática de uma seção de um corpo técnico. Nesta figura, é possível distinguir duas regiões, sendo que a primeira, denominada de superfície, apresenta a textura do componente, e a segunda, denominada de integridade da superfície, que é uma camada logo abaixo da primeira.

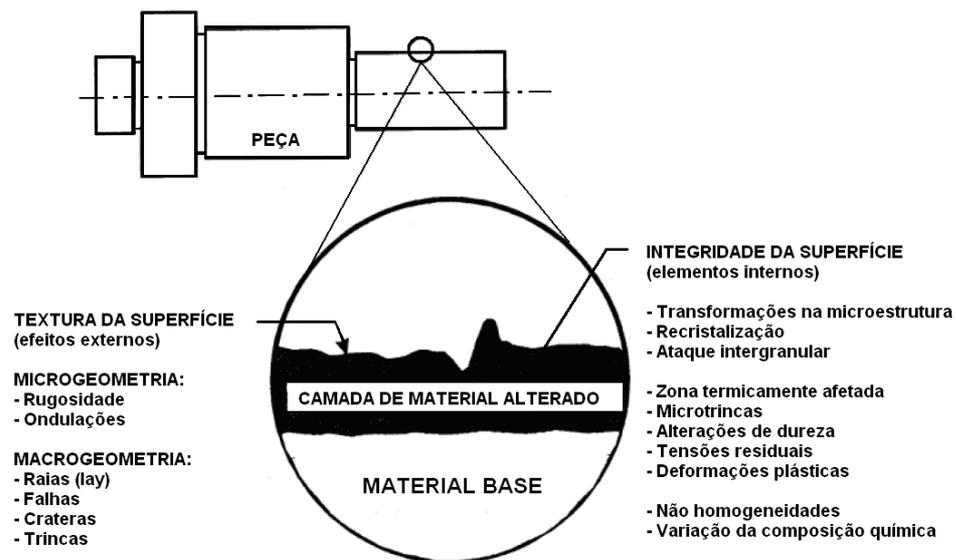


Figura 14 – Seção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores (BET, 1999).

O foco deste trabalho é a análise das propriedades da superfície do furo em função das grandezas de corte, como será abordado a seguir:

#### a) Qualidade da superfície na furação:

- **Rugosidade:** consiste nas irregularidades mais finas que geralmente resultam da ação inerente ao processo de produção. Na fabricação de peças, não é possível produzir superfícies ideais. As superfícies de uma peça são, se observadas ao microscópio, dotadas de regiões com maiores ou menores planicidades, que são definidas como sendo rugosidades da peça, mesmo que essas superfícies, num aspecto macroscópico, pareçam perfeitamente lisas (KÖNIG; KLOCKE, 1997).
- **Rebarbas:** rebarbas significam arestas ou pedaços de material proeminentes, indesejáveis nas peças. No processo de furação, as rebarbas podem surgir na borda do furo, tanto na entrada quanto na saída. A forma e a dimensão da rebarba dependem principalmente das condições da ferramenta, da velocidade de corte e avanço utilizados. Diferentemente dos metais, em que a rebarba na entrada do furo é formada pelo escoamento plástico do material e na saída do furo formada pela conformação do material devido às altas taxas de compressão no centro do furo, as rebarbas nos materiais compósitos são

originadas pela delaminação do compósito, juntamente com corte ineficiente das fibras ou das partículas, ficando pedaços salientes na peça usinada.

- Quebra da borda do furo (lascamento): é ocasionada pelo choque mecânico em virtude do corte não contínuo ou quando o material apresenta trincas ou defeitos. As trincas são causadas por tensão de compressão na área de contato entre o material usinado e a broca. As trincas iniciadas na superfície se propagam inclinadas à superfície do material, resultando em lascamentos.
- Marcas na parede do furo: normalmente as marcas na parede do furo são provenientes da quina e da guia da ferramenta, neste caso a broca.
- Integridade da superfície: na usinagem, é inevitável que o processo provoque alterações na superfície usinada. Uma ferramenta muito afiada que trabalha em materiais dúcteis provoca uma pressão suficiente para romper as ligações atômicas ou moleculares, causando um grande número de deslocamentos, sem produzir grandes deformações plásticas a distâncias da ordem de alguns micrometros da região de corte. Quando se tem uma ferramenta não afiada, geralmente acontece um processo de recalque, com uma deformação plástica mais profunda. A integridade da superfície vai além do que pode ser observado na superfície do material, abrangendo transformações na micro-estrutura, zona termicamente afetada, microtrincas, tensões residuais e deformações plásticas. Na Figura 15 representa-se um diagrama ilustrando a classificação dos principais elementos que definem a integridade da superfície.

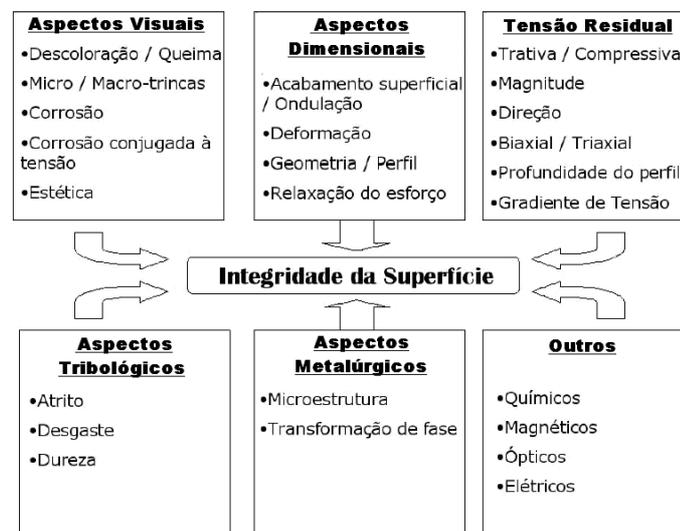


Figura 15 – Representação esquemática dos fatores que definem a integridade da superfície de um produto acabado (ALVAREZ, 2006).

É consenso que a altura da rugosidade é o fator mais importante da textura da superfície. O parâmetro mais utilizado para a verificação da rugosidade é a rugosidade média  $R_a$ , que também é o conceito mais antigo de rugosidade ainda em uso. A rugosidade média  $R_a$  é o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade da linha média dentro do comprimento de medição " $l_m$ ". Sua disseminação pode ser atribuída à maior facilidade de obtenção, usando aparelhos analógicos simples. Matematicamente é expressa como:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (3.4)$$

A representação gráfica desta operação numérica é ilustrada na Figura 16.

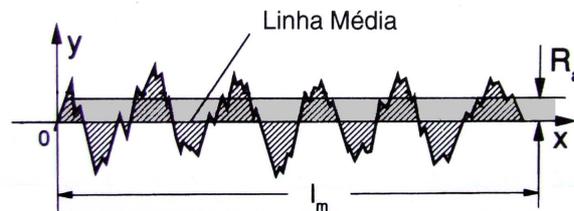


Figura 16 - Ilustração do parâmetro de rugosidade  $R_a$  em função da distância pela altura e profundidade de picos e vales, respectivamente.

O parâmetro  $R_z$  é calculado pela média das distâncias pico-a-vale de cinco comprimentos de amostragem, sendo assim, mais sensível a picos ou vales locais. É utilizado para o monitoramento de processos de fabricação, sobretudo em superfícies de apoio, deslizamento e de ajustes mecânicos. Matematicamente é expresso como:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (3.5)$$

A representação gráfica desta operação numérica é ilustrada na Figura 17.

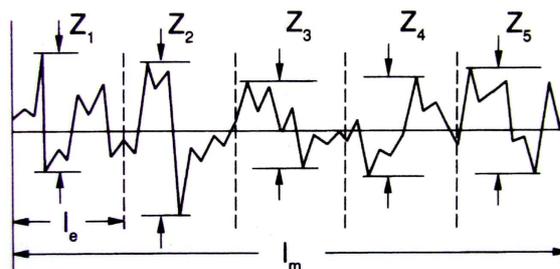


Figura 17 - Ilustração do parâmetro de rugosidade  $R_z$ , evidenciando o comprimento de medição unitário " $l_e$ " dentro do comprimento de medição " $l_m$ ".

As recomendações para se obter um bom rendimento e qualidade da superfície de um plástico termofixo podem seguir as mesmas para materiais termoplásticos. Por fim, os autores concluem que brocas com geometria para a usinagem de metal não são adequadas na usinagem de materiais compósitos poliméricos e os danos causados por tais brocas são frequentemente observados em estruturas de aeronaves (DURÃO et al, 2006; ABRÃO et al, 2007).

Após apresentadas as informações mais relevantes sobre a qualidade no processo de furação, com foco em materiais compósitos, na próxima seção é dissertado a respeito das generalidades específicas na furação de materiais compósitos que afetam diretamente a qualidade do furo.

### **3.4 Furação de materiais compósitos**

A usinagem de materiais compósitos surge da necessidade de se efetuar montagens de diversas peças num conjunto para formar um produto final ou da necessidade de se cumprir tolerâncias apertadas, que não possam ser obtidas pelos meios tradicionais de fabricação destes materiais. Então, a usinagem necessita de uma precisão específica para assegurar a estabilidade dimensional e obter uma melhor produtividade do componente. A furação é uma operação essencial para a montagem de estruturas de automóveis e aviões. A vida da união pode ser criticamente afetada pela qualidade dos furos. Por exemplo, mais de 100.000 furos são feitos para a montagem de um pequeno avião; em um grande avião de passageiros, milhões de furos são feitos, a maioria para rebites, porcas e parafusos. Quase 50% do custo de fuselagem são derivados da montagem. A usinagem de plástico reforçado com fibra de vidro é bastante diferente de metais e resulta em muitos efeitos indesejáveis, como um rápido desgaste da ferramenta, rugosidade elevada da superfície acabada e defeitos de integridade causados por trincas de delaminação (SONBATY; KHASHABA; MACHLY, 2004; DURÃO et al, 2006; MOHAN et al, 2007).

A Figura 18 revela que fatores como parâmetros de corte e geometria/material da ferramenta devem ser selecionados cuidadosamente objetivando o melhor desempenho da operação de furação, como, por exemplo, melhor qualidade do furo, que representa um mínimo dano para o componente usinado e uma superfície satisfatória.

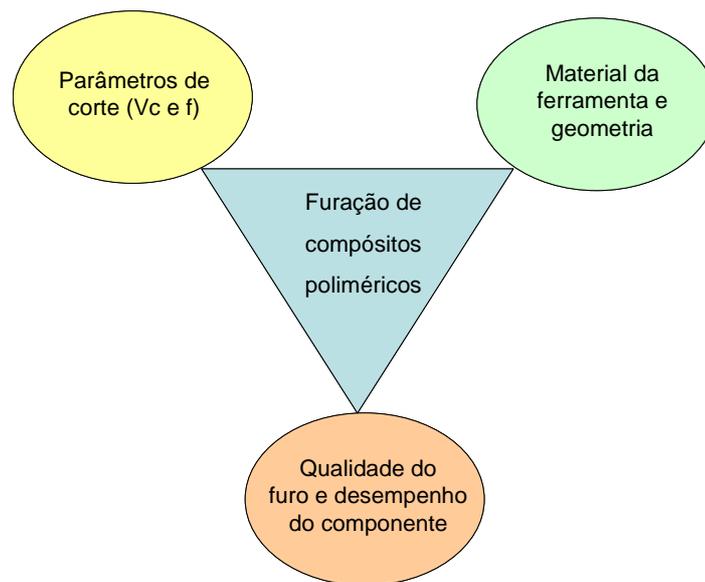


Figura18 – Principais aspectos a serem considerados na furação de plásticos reforçados com fibra (ABRÃO et al, 2007).

Araújo et al. (2005) estudaram o comportamento de um compósito polimérico reforçado com fibra de vidro durante a operação de furação, variando os parâmetros velocidade de corte e avanço. Todos os furos foram realizados com uma broca de aço-rápido comum. Para a realização dos furos, foram utilizadas três velocidades de corte (30, 60 e 90 m/min) e três avanços (0,1 – 0,5 e 1 mm). É interessante ressaltar ainda que, após a realização dos testes, a broca de aço-rápido não apresentou sinais de desgaste. Após os testes, a rugosidade  $R_a$  da parede dos furos foi medida. Notou-se a elevação da rugosidade com o aumento do avanço, devido aos sulcos produzidos pela broca na parede do furo. Um aumento do avanço é claramente acompanhado por um aumento crescente no valor da rugosidade. Em sua pesquisa, os autores concluem que a qualidade do furo é inversamente proporcional à velocidade de corte e de avanço, sendo este último o mais influente.

Mohan et al. (2007) avaliaram os parâmetros de furação e os parâmetros da amostra, que foram a velocidade, avanço, diâmetros da broca e espessura do compósito. O principal objetivo do estudo foi determinar os fatores e combinações de fatores que influenciam na delaminação, usando o método Taguchi e metodologia de superfície de resposta e para alcançar a eficiência de usinagem, condições que resultariam na delaminação mínima. As brocas de metal-duro usadas no experimento foram de 3, 6, 10 e 12 mm de diâmetro. Mohan (2007) concluiu que o avanço,

velocidade de corte e espessura do material são vistos como os maiores contribuidores para o efeito de delaminação. Segundo o autor, o uso de uma alta velocidade de corte (50 m/min) e baixo avanço (50 mm/min) favorece para mínima delaminação na entrada e saída do furo, um melhor acabamento da superfície e vida da ferramenta. Os resultados experimentais indicam que a espessura da amostra, o avanço e a velocidade de corte são considerados os fatores mais significantes para a delaminação.

Mohan et al. (2005), em outra pesquisa, avaliaram a influência do avanço e diâmetro da broca na força de avanço e torque durante a furação. A furação foi realizada em laminados de plástico reforçado com fibra de vidro, com uma fresadora CNC. Os parâmetros de usinagem como diâmetro da broca, velocidade de avanço e corte foram observadas em relação a trincas, rebarbas e lascamentos. A escolha da velocidade constante foi baseada em outros trabalhos, onde o efeito da velocidade de corte foi menos significativa para o resultado. Entre o torque e os parâmetros de corte como velocidade de avanço e diâmetro da broca existe uma relação não linear. Os autores concluem que a força de avanço e torque, resultado da relação empírica, mostram uma boa aceitação com os dados experimentais na faixa de avanço entre 0,1 – 0,5 mm.

Durão et al. (2006) analisaram com raio X os resultados obtidos mediante o uso de diversas geometrias de broca helicoidal, bi-diametral e *Dagger* com ângulo de ponta de 118°, 118° e 30°, respectivamente, e uma broca com ponta *W* em furação de placas carbono/epóxi. Todas as brocas usadas nos ensaios são de metal-duro com um diâmetro de 6 mm. Para os autores, a geometria das brocas é um fator importante na obtenção de furos em laminados, de qualidade aceitável. A figura 19 mostra uma radiografia dos furos realizados com diferentes brocas.



Figura 19 – Radiografia de peças furadas com: a) broca helicoidal; b) broca *Dagger*; c) broca com ponta em *W* (DURÃO et al. 2006).

Como resultados mais expressivos, salientaram que a broca com ponta em *W* parece ser uma boa opção para este tipo de laminado, no entanto deverá ser adotada uma estratégia de avanço variável, para evitar o descolamento na última camada, que agrava a diâmetro delaminado. E que a broca *Dagger* permitiu que a

furação fosse realizada com forças axiais mais baixas, porém necessita de uma operação complementar de acabamento com alargador ou outra ferramenta, até mesmo pela rebarba que fica nas peças, e que tem de ser retirada por questões de acabamento superficial e estéticas, que não podem deixar de ser consideradas.

Sonbaty, Khashaba e Machly (2004) investigaram a influência de alguns parâmetros na força de avanço, torque e rugosidade no processo de furação de materiais compósitos. Esses parâmetros incluem velocidade de corte, avanço, diâmetro da broca e volume de fibra. O material compósito foi confeccionado com orientação randômica de fibra de vidro reforçado com epóxi, com vários valores de carga. Os resultados indicaram que o ponto de início do ciclo de torque é atrasado em alguns segundos (dependendo do valor de avanço) em relação à força de avanço. Depois de alcançado o valor máximo da força de avanço, tal valor diminui gradualmente conforme a completa entrada da broca e cai para zero com a saída da broca do laminado. Em contraste, o torque foi gradualmente aumentado até o final do ciclo e repentinamente pula para um valor de pico 10 vezes maior que o inicial. A velocidade de corte tem efeito insignificante na força de avanço e na rugosidade.

Abrão et al. (2007) apresentaram uma pesquisa de literatura sobre a usinagem de materiais compósitos, mais especificamente na furação de plástico reforçados com fibra de vidro e carbono. Aspectos como materiais e geometria de ferramentas, parâmetros de usinagem e suas influências na força de avanço e torque foram pesquisados. Citaram em seu trabalho os materiais de ferramentas mais empregados conforme Figura 20.

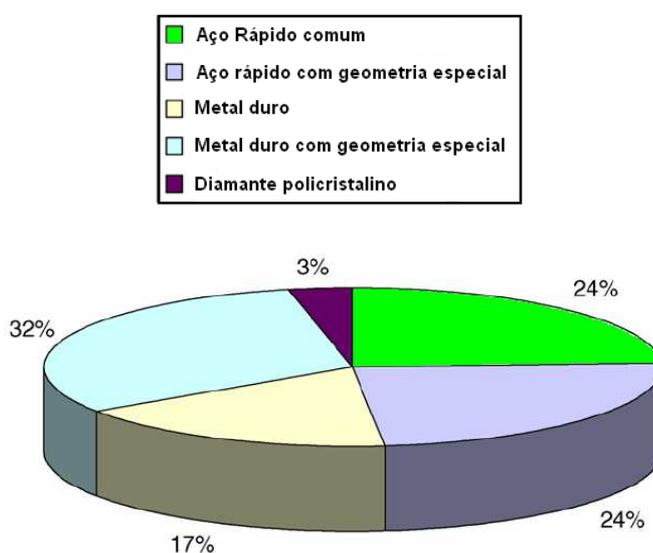


Figura 20 – Materiais de ferramentas usados na furação de materiais compósitos (ABRÃO et al, 2007).

As seguintes conclusões podem ser extraídas com observações para a furação de materiais compósitos poliméricos: **(a)** este processo produtivo é voltado para duas principais aplicações: produção de componentes para a indústria de transportes (sobretudo aeronáutica, mas também naval e automotiva) e componentes para a indústria eletroeletrônica (mais especificamente placas de circuito impresso), **(b)** grande esforço tem sido feito para um melhor entendimento do fenômeno vinculado ao mecanismo de corte. Até que o material seja referência, os compósitos reforçados com fibra de vidro e fibra de carbono vêm sendo igualmente pesquisados, porém, a resina epóxi é preferida como material da matriz. Brocas convencionais de aço-rápido são usadas na mesma medida que as de metal-duro, contudo, parece haver uma concordância entre os autores da necessidade de desenvolver ferramentas com geometrias especiais para alcançar um melhor desempenho. **(c)** os principais fatores usados para avaliar o desempenho do processo são, sem dúvida, o dano causado na entrada ou saída e a rugosidade produzida na parede do furo. Apesar do fato de que esse dano seja frequentemente mensurado em condição da delaminação, técnicas empregadas para medir o efeito dos parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço sobre este dano discorda consideravelmente: enquanto um grupo de pesquisadores tende a medir o dano diretamente (utilizando parâmetros, assim como largura do dano, área delaminada ou fator de delaminação), um segundo grupo de autores mede o dano indiretamente através da força de avanço, torque ou potência. **(d)** outro ponto de concordância entre autores é a necessidade de desenvolver dispositivos e/ou procedimentos adequados para possibilitar a redução da área danificada sem a necessidade de um suporte, o qual deixa a operação de furação demorada e custosa.

Durão et al. (2006) estudaram a furação de três tipos de materiais obtidos a partir de *pré-preg*, por moldagem manual e por RTM (*Resin Transfer Moulding*), com o objetivo de obter furos com boa qualidade, isto é, sem delaminação ou outros defeitos típicos. Todas as peças foram furadas com brocas HSS (aço-rápido) de 6mm de diâmetro e 120° de ângulo de ponta, sendo utilizados diferentes parâmetros de corte e, em alguns casos, o arrefecimento por líquido lubrificante. Durante a furação, foram monitoradas a força de avanço e o torque. A avaliação dos furos foi realizada através da medição da rugosidade da parede do furo e da radiografia. Como resultado final a utilização de uma pré-furação na peça a um diâmetro 0,6d

permite uma redução das forças axiais durante a furação final, o que favorece a obtenção de furos sem delaminação.

Westrupp (2008) realizou estudos no mesmo material utilizado no presente trabalho, porém em ensaios de torneamento. Em sua pesquisa concluiu que o compósito com 20% de carga metálica, avanço de 0,2 mm e  $v_c$  de 400 m/min proporciona o melhor desempenho para o uso em moldes de injeção.

Os estudos realizados na furação de materiais compósitos poliméricos se concentram em resinas termofixa e fibras de vidro e carbono. Isto não quer dizer que somente tais materiais são importantes, visto que sempre estão desenvolvendo novos materiais e com novas composições. Portanto, estes novos materiais também devem ser estudados.

Visto os principais direcionamentos nas pesquisas de vários autores referentes aos parâmetros de corte na usinagem de materiais compósitos, a seguir é feita uma releitura atentando para a qualidade do furo em materiais compósitos.

### 3.4.1 Qualidade nos materiais compósitos

Araújo, Abrão e Faria (2005) dividem os defeitos causados pela operação de furação nos materiais compósitos em: danos à entrada do furo, defeitos de circularidade e danos ocasionados pela temperatura na parede do furo e delaminação na saída do furo (Figura 21).



Figura 21 – Efeito de delaminação na furação de material compósito com carga de fibras (ARAÚJO; ABRÃO; FARIA, 2005).

Para Abrão et al. (2007), referindo-se à qualidade do componente usinado, os principais defeitos relatados são a delaminação da superfície, arrancamento da fibra/resina (Figura 22) e rugosidade inadequada na parede do furo.

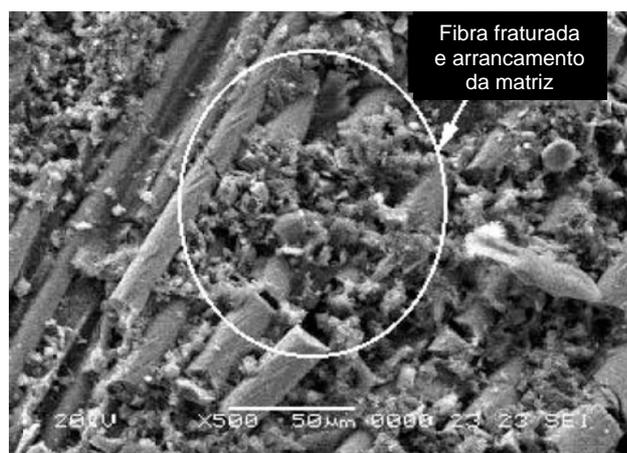


Figura 22 – Imagem feita por um microscópio eletrônico por varredura mostrando o arranque e quebra das fibras de um material compósito após a usinagem (PALANIKUMAR, 2006).

Lachaud et al. (2001) classificaram os danos da furação de materiais compósitos poliméricos em quatro categorias: delaminação na entrada do furo, defeitos geométricos, danos relacionados à temperatura e delaminação na saída da broca.

Na pesquisa realizada por El-Sonbaty et al. (2004), os resultados indicam que a velocidade de corte e o avanço têm um efeito insignificante na rugosidade. Também percebe-se que, com o aumento da velocidade de corte, melhora-se a qualidade da superfície. O referido comportamento é devido à diminuição da força de avanço. Outro fator que melhorou a rugosidade foi o aumento da quantidade de carga de fibra de vidro. Deve-se isto à melhora da condutividade térmica, visto que para a fibra de vidro e resina epóxi são 1,04 e 0,21 W/m °C, respectivamente.

O maior dano é certamente a delaminação, que pode ocorrer tanto na entrada como na saída da peça a ser trabalhada. A delaminação na saída é mais extensa e considerada mais grave. Em estudos recentes, tem-se observado que a extensão da delaminação está ligada à força de avanço, propriedades do material e velocidade (MOHAN et al, 2007).

Khashaba (2003) acrescenta que, em decorrência do fato de a furação ser tipicamente uma operação final, pois alargamento é raramente usado em materiais poliméricos, a delaminação é responsável pela rejeição de aproximadamente 60% dos componentes produzidos pela indústria aeroespacial. A qualidade dos furos na superfície da parede, levando em consideração a rugosidade, por exemplo, pode causar elevada tensão no rebite, conduzindo à sua falha.

Segundo Durão et al. (2006), a delaminação pode ocorrer na zona de entrada da broca na peça, por efeito de descascamento ou por efeito de punção da ponta da broca sobre as camadas inferiores da peça, abaixo da ponta da broca. As tensões térmicas que se desenvolvem durante a furação, ao provocarem um certo amaciamento da matriz, também podem facilitar a ocorrência de delaminação.

Araújo, Abrão e Faria (2005) salientaram que o defeito de circularidade está vinculado ao ângulo formado pela direção das fibras de vidro 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 a forças alternadas de torção/compressão, deixando uma forma elíptica no furo.

Outro problema comum são os danos causados pela temperatura, em geral, provenientes do atrito entre as fibras e os gumes secundários da broca. Este atrito pode acarretar danos na parede do furo, aumentando assim a probabilidade de rasgarem fibras devido à ação mecânica dos gumes secundários. Em casos nos quais a furação com baixa velocidade de avanço e alta velocidade de corte leva ao aumento de temperatura gerada, tem-se ainda a contribuição do baixo coeficiente de condução térmica e baixa temperatura de transição dos plásticos. O acúmulo de calor ao redor do gume destrói a estabilidade da matriz e produz uma superfície crespada e rugosa (SONBATY; KHASHABA; MACHLY, 2004).

Piquet et al (2000) investigaram os efeitos da geometria da ferramenta na qualidade da furação em lâminas de carbono/epóxi. Seus estudos mostraram que, utilizando uma broca convencional helicoidal, para se obter bons resultados, é necessário fazer um pré-furo a fim de neutralizar o gume principal.

Sabendo que o torque e a força de avanço também afetam na qualidade do furo, na próxima seção é discorrido mais profundamente sobre este assunto.

### **3.4.2 Torque e força de avanço nos materiais compósitos**

A relação entre os parâmetros de usinagem e força de avanço, torque e força de cisalhamento, na furação de materiais compósitos poliméricos, é objeto de várias pesquisas devido ao fato que eles afetam a qualidade do furo.

Davim et al. (2004) estudaram o comportamento de duas brocas de metal-duro com geometrias diferentes na usinagem de PRFV. Os resultados apontam que

a força de avanço aumenta com a velocidade de avanço, todavia, baixos valores foram observados quando usada a broca *Brad & Spur*.

O trabalho experimental conduzido por Ogawa et al. (1997) envolveu furação de PRFV com uma broca de metal-duro com 1 milímetro de diâmetro. Os autores concluíram que a força de avanço é drasticamente reduzida quando o furo é pré-furado com diâmetro de 0,4 mm ou maior.

Langella, Nele e Maio (2005) criaram um modelo para prever a força de avanço e torque na furação de materiais compósitos que permite uma aproximação para definir a geometria e os parâmetros de corte.

Segundo Sonbaty et al. (2004), o aumento da velocidade de corte e de avanço irá reduzir o tempo de usinagem, e conseqüentemente, aumentar a produtividade. Por outro lado, muitos defeitos foram verificados em razão do aumento da força de avanço, torque e temperatura de corte na usinagem de fibra de vidro/epóxi. Tais efeitos incluem delaminação na entrada e na saída da broca, quebra da matriz, queima da matriz na borda do furo, descolamento entre a fibra e a matriz. Em seus estudos, utilizaram uma broca de 8 a 13 milímetros de diâmetro e velocidade de corte média de 35 m/min e velocidade de avanço de 0,05 até 0,23 mm, os resultados sugerem que o ponto de início do ciclo de torque é atrasado em alguns segundos (dependendo do valor de avanço) em relação à força de avanço. Neste momento, é consumada a penetração do gume. Depois de alcançado o valor máximo da força de corte, este valor diminui gradualmente conforme a completa entrada da broca e cai para zero com a saída da broca do laminado. Perceberam também que existe uma queda gradual na força de avanço durante a entrada total da broca (após o valor de pico), talvez devido ao amolecimento da matriz pelo calor gerado no processo de furação. Depois de alcançado o valor máximo da força de avanço, este valor diminui gradualmente conforme a completa entrada da broca e cai para zero com a saída da broca do laminado. Em contraste, o torque é gradualmente aumentado até o final do ciclo e de repente pula para um valor de pico 10 vezes maior. Tal comportamento é decorrente de fibras não cortadas na última camada. Então um alto torque é necessário para superar o atrito entre a borda e as fibras não cortadas no fim do ciclo de furação.

Durão et. al (2006) utilizaram uma broca de aço-rápido com 6 mm de diâmetro e 120° de ângulo de ponta, nos ensaios de furação de fibra de vidro/epóxi. Perceberam que a evolução da força axial ao longo da furação

segue uma curva típica. Há uma subida inicial do valor da força, que corresponde à entrada da ponta da broca na peça. Correspondendo à entrada do maior diâmetro da broca na peça, o valor da força sobe de modo apreciável, mantendo-se razoavelmente estável, enquanto toda a broca se encontra em contacto com a peça, o que acontece durante um curto período de tempo. Segue-se um decréscimo rápido da força, à medida que a broca deixa de estar em contacto com a peça, isto é, quando a atravessa completamente. Neste estágio, a força reduz-se a zero.

O momento torçor ou torque (ver Figura 23), segue uma evolução mais suave, cujo aumento se deve à resistência das fibras ao corte e à existência de atrito ferramenta/peça. Conforme se pode verificar na figura, mesmo após o corte estar completo, ou seja, a broca ter saído do canal do furo, existe um torque residual, devido ao atrito ferramenta/peça.

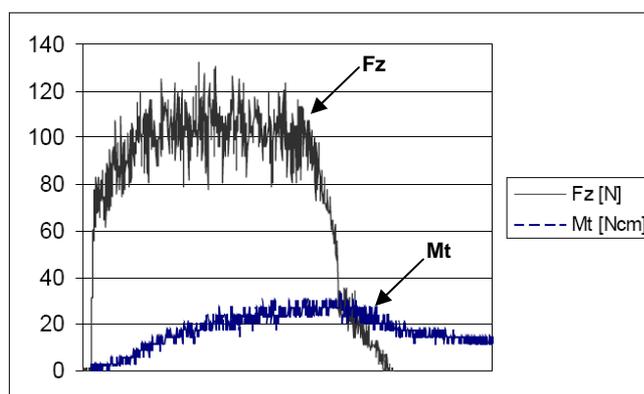


Figura 23 – Curvas típicas de força de avanço (curva superior) e torque (curva inferior) (DURÃO et al. (2006).

A força axial máxima é atingida rapidamente, decrescendo à proporção que a ponta da broca deixa de estar em contato com a peça. O momento torçor mantém-se mais estável ao longo do processo de furação, já que corresponde ao esforço necessário para vencer a força de atrito que é gerada entre a broca e as paredes do furo. Este binário continua existindo mesmo depois da fase de finalização, pois existe atrito entre a broca e a peça até a retirada da broca.

No trabalho de Durão et. al (2006), são mostrados os valores médios obtidos para a força axial e o torque (Tabela 1), na realização de 4 furos em condições idênticas para cada situação em resina epóxi reforçada com fibra de vidro, porém utilizando brocas com diferentes geometrias, mas com igual diâmetro ( $\varnothing = 6$  mm).

Tabela 1 – Forças de avanço e torque durante a furação de resina epóxi reforçada com fibra de vidro (DURÃO et al. (2006).

Descrição	Força axial [N]	Torque [Nm]
Helicoidal	113,8	0,373
Helicoidal com pré-furo 1,1 mm	83,7	0,355
Ponta em W	124,2	0,258
<i>Dagger</i>	76,1	0,730
Bi-diametral	71,3	0,284

Durão (2006) concluiu que a furação com pré-furo reduz a força de avanço, e a única broca que alcançou valores de força de avanço da mesma ordem de grandeza foi a *Dagger*, cuja geometria muito particular possibilita a realização de furos com forças axiais mais baixas, se bem que à custa de um esforço por atrito mais elevado. Os valores do torque são sempre baixos, e não se verificaram variações significativas entre os vários ensaios.

### 3.5 Considerações finais

As recentes pesquisas têm mostrado que para a usinagem de materiais compósitos, seja reforçado com fibras de vidro/carbono ou partículas de alumínio, existe uma tendência para o uso de brocas de metal-duro e principalmente com geometrias especiais.

A utilização de metal-duro nas ferramentas é necessária devido à natureza abrasiva das cargas aplicadas na matriz epoxídica, além do que, o uso de diamante para a usinagem de materiais compósitos torna-se caro.

Porém, o maior desafio dos pesquisadores é encontrar a melhor geometria para a usinagem de materiais compósitos. Muito tem se estudado e realizado diferentes experimentos com diversas geometrias e tipos de brocas, buscando a melhor qualidade do furo, ao longo de toda a parede e em particular as suas características na entrada e saída.

O presente trabalho vem contribuir com um estudo de mais um tipo de geometria de broca, fabricado especialmente para materiais compósitos, e será apresentado nos próximos capítulos.

Entretanto, vale destacar que foram encontrados poucos trabalhos que apresentassem estudos de usinagem de material compósito com carga metálica de pó de ferro. Assim, no próximo capítulo é apresentado o material compósito que será ensaiado, bem como, os métodos e equipamentos utilizados.

## 4 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo tem-se a metodologia aplicada no presente trabalho, como foi realizada e os equipamentos utilizados. A pesquisa é um conjunto de ações efetuadas para responder perguntas que o pesquisador faz a respeito do seu objeto de estudo. Isto, para encontrar a solução de um problema.

Em um primeiro momento, é descrito o corpo de prova, justificada a geometria escolhida, reveladas a sua composição e propriedades. Em seguida, são exibidos os meios de medição usados neste trabalho, com suas características principais e onde foram aplicados.

Também são apresentadas, neste capítulo, a máquina-ferramenta utilizada, as ferramentas de corte e, por fim, as velocidades de corte e de avanço.

Por fim, é descrito o método de fabricação dos corpos de prova, mostrando os pontos mais importantes durante o vazamento.

### 4.1 Corpos de prova

Inicialmente, propõe-se a concepção e a construção de um molde para confeccionar o corpo de prova, que será de vidro, com o objetivo de aproveitar a qualidade de baixa rugosidade da sua superfície. Este molde será retangular, com dimensões internas de 135 mm de comprimento, 113 mm de largura e 25 mm de altura. Assim, irá proporcionar um corpo de prova com dimensões externas nominais muito próximas das dimensões internas do molde. Isto, porque o coeficiente de retração da resina epóxi é pequeno, quando curada em condições de tempo e de temperatura controladas.

Tais dimensões foram escolhidas em função do tamanho da placa de fixação do dinamômetro, pois caso fosse com tamanho superior, as medidas de torque e força de avanço não seriam fidedignas. Outro fator importante é a maximização da quantidade de furos produzidos em relação à quantidade de material moldado. Deste modo, foi possível realizar um total de 120 furos por corpo de prova, com 8 milímetros de diâmetro cada furo. O espaçamento entre os furos foi de 3 milímetros para proporcionar um estudo detalhado dos lascamentos, quando houvesse, conforme Figura 24.

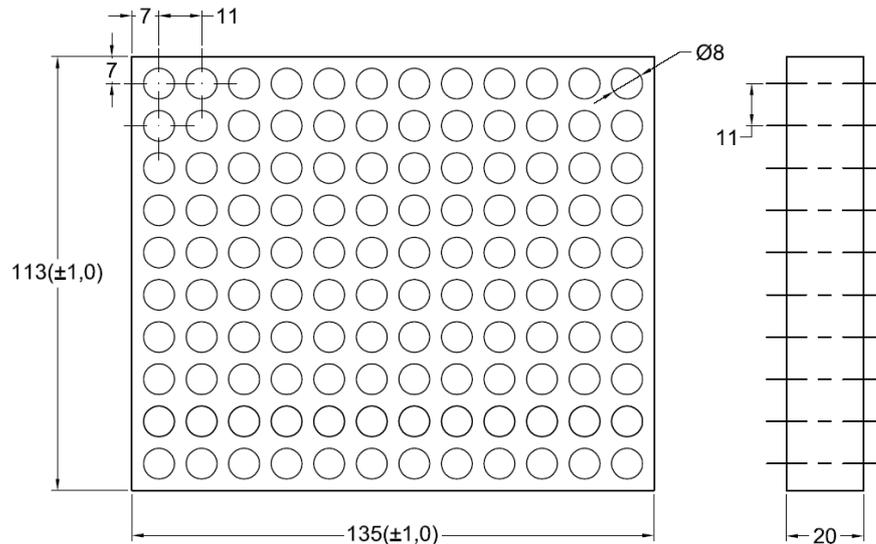


Figura 24 – Dimensões em milímetros do corpo de prova.

Outro motivo em se deixar um espaço de 3 mm entre cada furo é para minimizar a influência de deformação e aquecimento entre os furos.

#### 4.1.1 Materiais do corpo de prova

Os materiais escolhidos para a realização do presente trabalho baseiam-se na pesquisa de Jesus (2005), que desenvolveu um compósito de resina epóxi com carga de pó de ferro para ser utilizado como molde de injeção de materiais poliméricos. Nesse trabalho, ficou comprovado que a utilização de tal material compósito, como molde de injeção, é possível. Diante dos dados levantados na referida pesquisa sobre as características dos componentes e também em forma de material compósito, decidiu-se usar rigorosamente os mesmos materiais e métodos de fabricação do trabalho do autor supracitado.

Mesmo tendo conhecimento de que, utilizando as mesmas composições, porém em diferentes corridas, podem-se obter resultados diferenciados, não foram feitos novos ensaios mecânicos destes corpos de prova. Isto se deve ao fator tempo e custo, mas principalmente pela limitação de matéria-prima. Assim, foi escolhido um material já pesquisado e estudado. Desta maneira, os cuidados necessários foram tomados (proporções de componentes, temperatura, tempo de cura, etc.) para que o material produzido no presente trabalho tenha paridade com o material produzido na pesquisa de Jesus (2005).

Para a preparação das formulações do corpo de prova, foi usada a resina epóxi TCR 550 e o endurecedor XR 435, da empresa DOW CHEMICAL COMPANY,

fornecidos pela CENTRAL FIBER GLASS. Na Tabela 2, pode-se observar as propriedades mecânicas da resina sem carga.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da resina sem carga (JESUS, 2005).

Material	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (Shore D)
TCR 550	59	2,8	76

Na Tabela 3, encontram-se os valores médios das propriedades mecânicas da resina com carga de pó de ferro.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da resina com carga de pó de ferro (JESUS, 2005).

Formulações (Pó de ferro)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (Shore D)
10%	47,0	4,4	84
20%	35,7	6,3	82
30%	35,2	6,1	85

Para carga particulada, foi utilizado o pó de ferro HD177, fornecido pela BELGO BRASILEIRA. A escolha foi influenciada pela à boa condutividade térmica do material, permitindo trabalhar no comportamento do compósito, no que concerne às características térmicas e mecânicas, variando a quantidade de carga metálica adicionada. Na Figura 25, pode ser visto um gráfico que mostra a curva da frequência da distribuição do diâmetro médio das partículas de ferro. Esta análise da distribuição das partículas foi realizada por Jesus (2005). Levando em consideração que os corpos de prova foram confeccionados com o mesmo material, tal análise fica estendida para o presente trabalho.

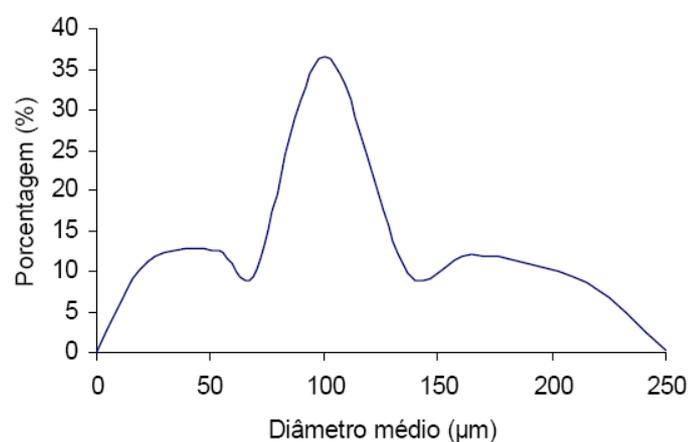


Figura 25 – Distribuição por frequência de tamanho das partículas de ferro usadas nos corpos de prova (JESUS, 2005).

Percebe-se que a maior parte das partículas (35%) estão concentradas com um diâmetro médio de 100  $\mu\text{m}$ , o que é bom para a qualidade da superfície em partes que serão usinadas. Isto, porque quanto maior o tamanho da partícula, maior será a cavidade na superfície da parede do furo, caso a partícula de ferro seja arrancada da matriz durante a usinagem.

## 4.2 Meios de medição

Neste tópico, são apresentados os equipamentos usados para a realização do trabalho e os equipamentos para medir e analisar os corpos de prova.

### 4.2.1 Análise de desgaste da ferramenta, rebarbas e lascamentos nos furos

O estereoscópio óptico (Figura 26), para a medição das amostras, é da marca Zeiss, modelo STEMI SV8, e possui uma câmera CCD Leica, onde se pode fotografar as superfícies analisadas, com um aumento de 7 a 70 vezes. Este equipamento encontra-se no Departamento da Engenharia Mecânica.

O referido equipamento foi utilizado para obter as imagens ampliadas na entrada e saída do furo a fim de analisar a ocorrência de lascamentos e rebarbas.



Figura 26 – Estereoscópio com câmera CCD.

Também foi utilizado para a análise do desgaste da ferramenta, determinado pelo desgaste de flanco máximo ( $V_{B\text{max}}$ ).

#### 4.2.2 Análise de rugosidade na parede do furo

Para a medição dos parâmetros de textura, valeu-se de um rugosímetro da marca Mahr, modelo Perthometer S2 (Figura 27), com faixa de medição/resolução de  $\pm 25\mu/0,8\text{nm}$  -  $\pm 250\mu/8\text{nm}$  -  $\pm 2500\mu/80\text{nm}$  e comprimento de medição de 25 mm. Foram utilizadas a sonda mecânica da marca Perthen, modelo RHT 6-50, e a ponta do estilete com raio de 5  $\mu\text{m}$  e ângulo de 90°. Os parâmetros de rugosidade  $R_a$  (rugosidade média) e  $R_z$  (profundidade média de rugosidade) foram medidos na parede do furo, após o corte do corpo de prova.



Figura 27 – Rugosímetro de bancada.

Os valores da rugosidade representam a média de três medidas realizadas no meio da parede do furo, em paralelo ao eixo do furo. Nas medições, foi utilizado um *cut-off* de 2,500mmx5, resultando em um comprimento de medição total de 17,5 mm com o propósito de atender as especificações para medição.

#### 4.2.3 Análise da textura e microestrutura na parede do furo

Para a análise da microestrutura do material compósito usinado, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Este microscópio encontra-se no LABMAT-UFSC, fabricado pela Philips, modelo XL 30 (Figura 28). Como característica deste equipamento, as amostras devem ser condutoras, e para isso foram metalizadas com uma fina camada de ouro.



Figura 28 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) - UFSC

#### 4.2.4 Medições da força de corte e da força de avanço

O ensaio expressa a situação do processo de furação em cheio onde se deseja a medição da força de avanço e do momento. Para este ensaio, tem-se o processo real de corte, ao longo da parcela cortante do gume principal, juntamente com o efeito da parcela de atrito das guias com a parede do furo (ZEILMANN, 2003). Na figura 29, é mostrado um esquema de ligação da plataforma piezelétrica no computador que fará a aquisição dos dados gerados. A plataforma é dotada de dois canais, um para a aquisição do torque e outro para a aquisição da força de avanço. Cada canal possui amplificador de sinal independente para evitar interferências entre canais.

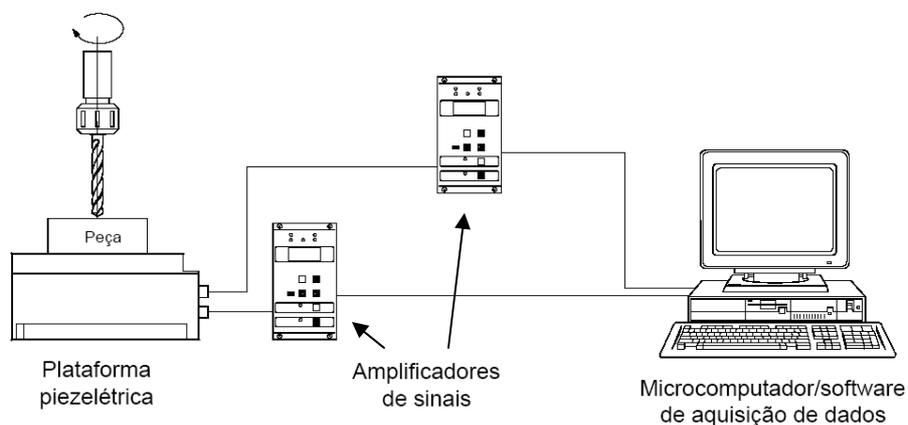


Figura 29 – Equipamentos para ensaio de força [45].

### 4.3 Máquina-ferramenta

Os ensaios foram efetuados em uma máquina fresadora CNC de três eixos, instalada no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) – UFSC, fabricada pela Indústria Romi S.A., modelo Polaris F400. A potência instalada da máquina é de 15kW, rotação máxima da árvore principal de 6000 rpm e avanço máximo de 30 m/min. O curso dos eixos são: X = 710 mm, Y = 420 mm, Z = 600 mm. A máquina-ferramenta é mostrada na Figura 30.



Figura 30 – Fresadora utilizada nos ensaios.

### 4.4 Ferramentas de corte – brocas de metal-duro e aço-rápido

Dois tipos de brocas foram usados no presente trabalho, uma de metal-duro com geometria especial e a outra de aço-rápido convencional. No entanto, a broca de aço-rápido foi utilizada somente como comparação, ou seja, para se conhecer as vantagens da broca de metal-duro.

A broca de metal-duro (Figura 31) foi especialmente projetada para materiais compostos pela Dormer Tools S.A. e patenteada no Reino Unido, sendo a patente requerida mundialmente. Ela foi projetada para uso em compostos de matriz polimérica com ou sem carga. Segundo o referido fabricante, trabalha igualmente bem em polímero reforçada com fibra de carbono, tal como aquelas usadas na indústria aeroespacial, e polímero reforçada com fibra de vidro, utilizada na indústria automobilística, esportiva e militar.



Figura 31 – Broca com geometria especial de metal-duro para materiais compósitos, diâmetro de 8,0 milímetros.

A geometria da ponta das brocas (Figura 32) para materiais compósitos foi desenvolvida especificamente para reduzir o impacto durante o corte nesses materiais. O flanco possui três ângulos de saída, reduzindo assim o gume transversal. O gume principal possui dois ângulos, favorecendo o corte das fibras ou partículas do compósito, auxiliado pelo ângulo de cunha que é menor que uma broca convencional. O desenho especial da ponta da broca tem como finalidade:

- Diminuir a pressão em materiais compostos;
- Reduzir o esforço e o torque, os quais melhoram a eficiência do corte – isso, por sua vez, pode reduzir significativamente o lascamento e a delaminação na saída do furo;
- Baixar a temperatura gerada na área de corte.

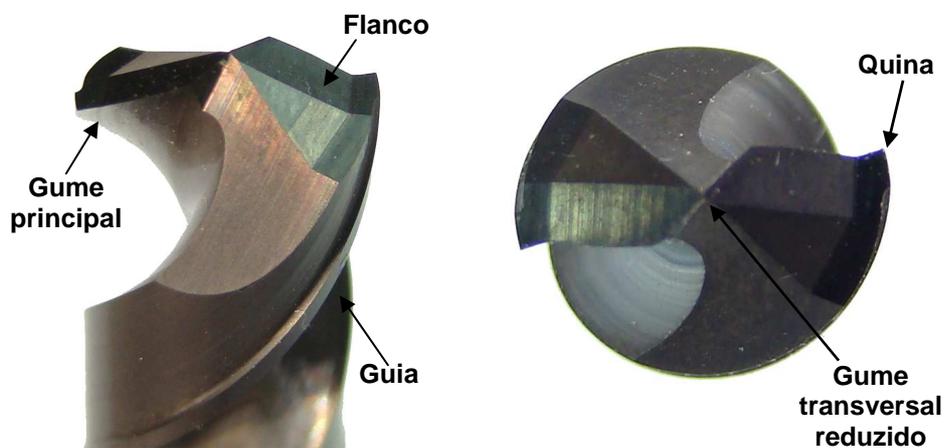


Figura 32 – Geometria da ponta da broca de metal-duro.

A broca é fabricada com metal-duro micro (menos que  $0,6 \mu\text{m}$ ), com tolerância do diâmetro de corte m7 e tolerância do diâmetro da haste h6. Como dito anteriormente, a geometria da ferramenta é especial e o diâmetro utilizado nos ensaios é de 8,0 mm. Foi usada como código interno da Dormer a nomenclatura R106. A classe de metal-duro desta broca é H10F, que, de acordo com a própria fabricante, a define como uma classe de microgrãos de metal-duro sem cobertura.

Recomendada para superligas resistentes ao calor e ligas de titânio com velocidades de corte muito baixas. A grande resistência a choques térmicos e desgaste tipo entalhe a tornam indicada para cortes longos ou interrompidos.

A título de comparação, foram feitos alguns testes preliminares com uma broca de aço-rápido convencional, comprada no comércio varejista. O objetivo é comparar os dois casos, levados ao extremo. De um lado, uma broca de alta tecnologia com geometria especialmente desenvolvida para usinar material compósito, e outro, uma broca comum, com geometria para furar aço, que pode ser vista na Figura 33.



Figura 33 – Broca de aço-rápido convencional usada nos ensaios, diâmetro de 8,0 milímetros.

Essa comparação se faz necessária, para se conhecer com precisão as vantagens proporcionadas pela broca de metal-duro com geometria especial, especificamente, na furação de materiais compósitos com carga metálica. A broca de aço-rápido comum tem um diâmetro de 8 milímetros, não possui geometria especial ou qualquer tipo de revestimento. Sendo comprada no comércio não especializado, o fabricante ou origem da broca não foram levados em consideração, já que se busca uma comparação extremada. A geometria da ponta da broca pode ser visualizada na Figura 34, e não possui afiação especial ou redução do gume transversal.

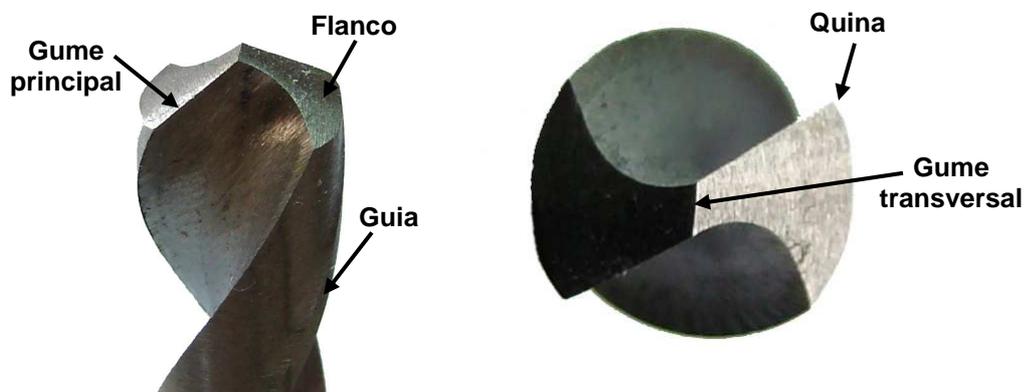


Figura 34 – Geometria da ponta da broca de aço-rápido.

Alguns ângulos da ponta desta broca são: ângulo do gume transversal com 145°, ângulo da ponta de 118° e ângulo de quina de 120°.

Após a apresentação dos materiais e equipamentos usados no trabalho, na próxima seção é explanado sobre os pré-ensaios de furação realizados com as brocas supracitadas.

#### **4.5 Pré-ensaios de furação**

Com o objetivo inicial de se escolher os melhores parâmetros de corte para realizar a pesquisa, foram feitos pré-ensaios com a broca de aço-rápido helicoidal e a broca de metal-duro usinando resina epóxi pura.

Para o avanço, ficou definido o valor de 0,3 mm, que é um avanço médio encontrado nos estudos de furação de materiais compósitos já citados no presente trabalho na fundamentação teórica. Isto ocorre devido à falta de referências para a usinagem de materiais compósitos com as cargas propostas neste trabalho. Todavia, também foram testados mais dois avanços de 0,1 e 0,6 mm, sendo que, na primeiro, não houve grande diferenciação na qualidade do furo em relação ao avanço escolhido (0,3 mm). No segundo caso, com um avanço duas vezes maior que o escolhido, a ferramenta teve uma grande vibração.

Para a velocidade de corte, os pré-ensaios foram iniciados com 25 m/min, seguindo com intervalos de 25 em 25 m/min até 125 m/min, onde a máquina ferramenta apresentou vibrações. Assim, ficou decidido utilizar uma velocidade de corte média, ou seja, 50 e 100 m/min.

Os pré-ensaios mostraram que a resina epóxi pura, quando usinada com as brocas de aço-rápido geravam grandes lascas tanto na entrada quanto na saída do furo, mesmo variando a velocidade de corte.

##### **4.5.1 Parâmetros de corte Utilizados**

Desta forma, para a realização dos ensaios, foram usadas duas velocidades de corte e um avanço, sendo as velocidades de corte 50 e 100 m/min e o avanço de 0,3 mm. Em cada velocidade de corte, foi utilizada uma broca diferente, totalizando 6 brocas de metal-duro e uma de aço-rápido comum, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre material, velocidade de corte e broca utilizada.

	0% Fe	10% Fe	30% Fe
Broca 1*	50 m/min		
Broca 2*	100 m/min		
Broca 3*		50 m/min	
Broca 4*		100 m/min	
Broca 5*			50 m/min
Broca 6*			100 m/min
Broca HSS**	50 m/min		

\*Broca de metal-duro, \*\*Broca de aço-rápido

Os parâmetros de corte, aplicados neste trabalho, foram escolhidos principalmente em função da qualidade do furo produzido. Outro fator importante que rege tal escolha foi a quantidade reduzida de brocas e, sobretudo o custo unitário das ferramentas. Por este motivo, escolheu-se uma única velocidade de avanço, que, como já dito anteriormente, é a mais utilizada em furação de materiais compósitos, e os pré-ensaios comprovaram esta tendência.

#### 4.6 Características do processo de fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram preparados em molde de vidro plano cortado de tal modo que formassem um paralelepípedo, com as faces laterais perpendiculares à base. A resina epóxi foi misturada com uma porcentagem de 45% de endurecedor. Segundo Jesus (2005), tal formulação apresenta a maior temperatura de transição vítrea (127°), o que indicaria uma resistência térmica mais elevada, uma vez que o molde está sujeito a temperaturas elevadas durante o processo de injeção de termoplásticos. O autor ainda lembra que não foi utilizada uma formulação com maior quantidade de endurecedor, pois tornaria o material mais rígido e frágil.

Com base na densidade da resina, endurecedor e pó de ferro, os pesos foram calculados previamente para formar a composição de 0%, 10% e 30% de pó de ferro. Após a pesagem dos componentes com uma balança de precisão (LABMAT-UFSC), estes foram misturados a vácuo (Figura 35), para evitar o aparecimento de bolhas na resina. Em princípio, faz-se vácuo por cinco minutos até chegar a -720 mmHg, então inicia-se a mistura em baixa rotação, para evitar o surgimento de

bolhas, auxiliado por um agitador mecânico (Fisatom – modelo 713A) por mais vinte minutos.



Figura 35 – Misturador especial a vácuo com manômetro.

Desta forma, a resina já está pronta para ser vazada nos moldes, que é feito com muito cuidado para não gerar bolhas (Figura 36). Contudo, antes do vazamento, é aplicado um desmoldante no molde. Após a etapa de preparação e vazamento, é feita a cura da resina por 24 horas à temperatura ambiente, mais 4 horas a 80°C e mais 4 horas a 100°C, conforme trabalhos já realizados no CIMJECT-UFSC.

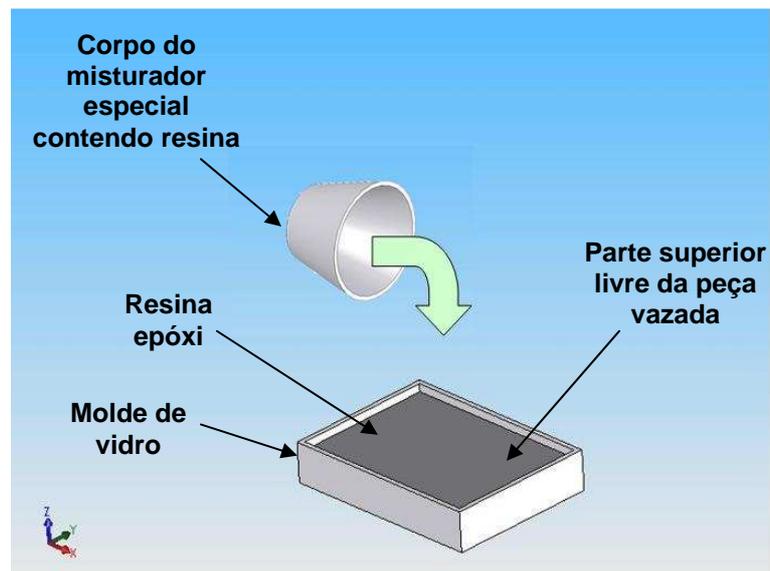


Figura 36 – Vazamento da resina epóxi no molde de vidro.

Por fim, o corpo de prova foi desmoldado e faceada a parte superior livre da peça vazada, para controle dimensional e para evitar que houvesse um menisco na superfície da resina moldada.

Em todos os ensaios, a saída da broca está no lado em que os corpos de prova foram faceados. Na parte inferior da peça vazada, que não foi faceado, é a entrada da broca no corpo de prova. Tal lado não foi faceado, pois se valeu das qualidades do vidro no que diz respeito à baixa rugosidade e planicidade que foram transferidas para a face do corpo de prova durante o vazamento da resina epóxi.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em relação à fabricação dos corpos de prova em resina epóxi com e sem carga de pó de ferro e em relação aos ensaios de furação. Inicialmente, é mostrado esse material cortado, com o objetivo de conhecer as características internas dos corpos de prova, após os ensaios de furação. Posteriormente aos ensaios de furação, é feita uma avaliação da qualidade do furo nesses corpos de prova. Para cada composição de resina epóxi com e sem carga, é avaliada a qualidade do furo, e segue na seguinte ordem:

- a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo, utilizando um microscópio eletrônico de varredura. Assim, é exibida, com maior exatidão, a superfície da parede do furo;
- b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo;
- c) Análise dos cavacos, produzidos durante a usinagem. Esta análise é importante para entender o comportamento do corte do material;
- d) Determinação das rebarbas e lascamentos na borda do furo, ou seja, é determinada, quantitativamente, a abrangência das rebarbas e lascamentos na borda do furo;
- e) Análise da rugosidade na parede do furo para todos os ensaios, em função de dois parâmetros de rugosidade, que são:  $R_a$  e  $R_z$ . Os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$  são comumente usados na indústria, tanto pela rápida obtenção, como pela fácil interpretação dos dados gerados pelo rugosímetro.

Em seguida, são efetuadas as análises da força de avanço e do torque, em que se mostram as curvas geradas na aquisição de dados pelo dinamômetro piezelétrico. Por fim, tem-se uma avaliação do desgaste das ferramentas, mostrando a influência abrasiva que o material compósito possui sobre o metal-duro.

## 5.1 Caracterização do corpo de prova

É de suma importância conhecer as características do corpo de prova antes de qualquer avaliação pós-usinagem. Com esse intuito, foi realizado um corte vertical e outro horizontal no meio do corpo de prova para verificar o comportamento da carga e da resina após a cura. Este procedimento é necessário, visto que podem surgir bolhas na resina ou decantação da carga metálica. Para facilitar a visualização, foi usado um recurso do microscópio eletrônico de varredura, chamado de contraste BSE (elétrons retroespalhados).

### 5.1.1 Corte vertical do corpo de prova

O corte vertical tem como objetivo verificar a sedimentação da carga metálica e a presença de vazios, se houver, ao longo do plano vertical do corpo de prova. Este corte é feito no meio do corpo de prova (Figura 37), e a área analisada está situada entre furos.

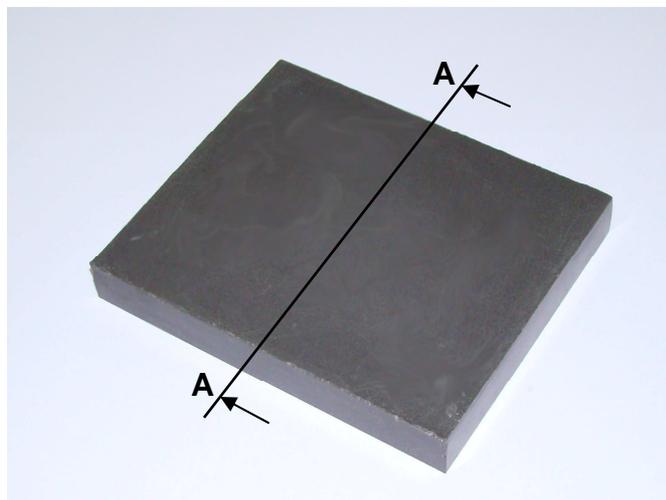


Figura 37 – Corte vertical A-A do corpo de prova com carga de pó de ferro.

- **Corpo de prova de resina epóxi sem carga metálica**

O corte da amostra foi feito no centro do corpo de prova entre dois furos, com o propósito de verificar se existem vazios no material. Depois de cortada, a amostra foi polida e examinada minuciosamente no microscópio eletrônico de varredura por toda

sua extensão e pode ser vista a parte superior da amostra, ou seja, a entrada do furo, na Figura 38.

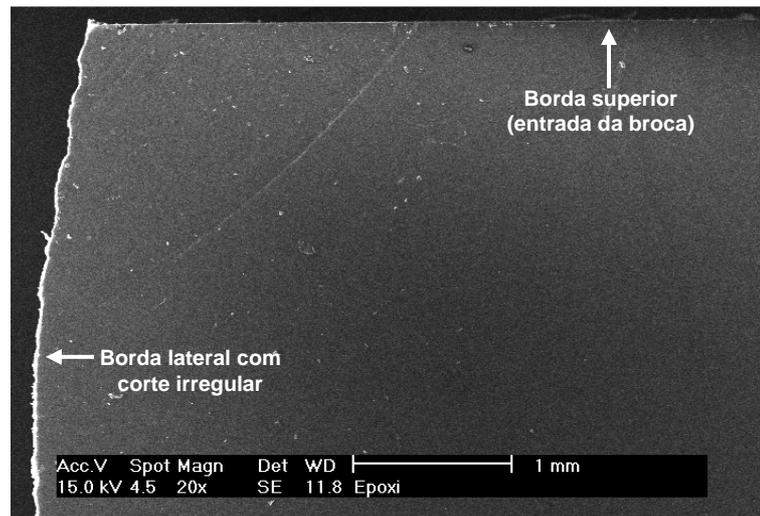


Figura 38 – Análise da amostra da superfície da resina epóxi sem carga metálica, retirada do centro do corpo de prova em um corte vertical .

A amostra não apresenta sinal de vazios, inclusões, ou qualquer outra anomalia que pudesse vir a ocorrer e a influenciar a sua usinagem.

- **Corpo de prova de resina epóxi com 10% de carga metálica**

Tal corte foi realizado no meio do corpo de prova, entre dois furos. Na Figura 39, é mostrada a parte superior do corpo de prova, no sentido que foi fabricado. Este lado corresponde à saída da broca no material durante os ensaios de furação.

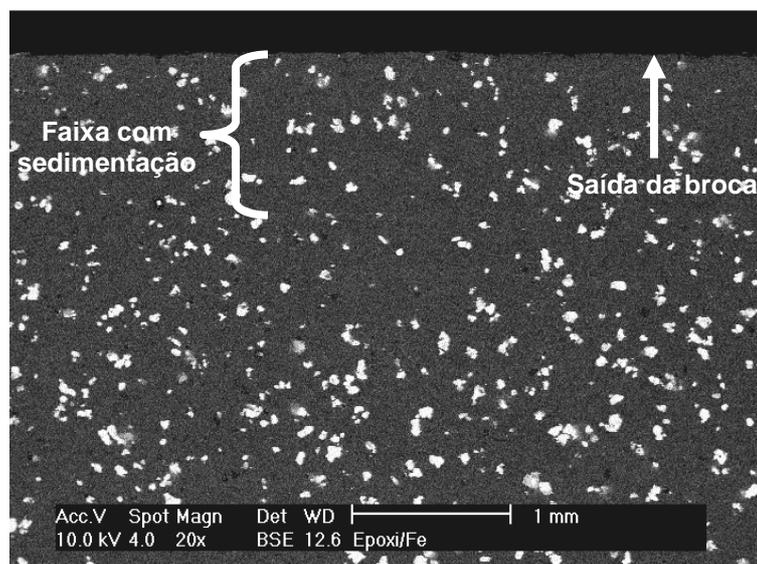


Figura 39 – Amostra do corpo de prova com sedimentação da carga metálica com detalhe na parte que corresponde à entrada da broca no material.

Pode ser notado que ocorreu uma pequena sedimentação da carga durante o processo de cura da resina epóxi. A princípio, assume-se que tal sedimentação não influencia diretamente nos ensaios de usinagem, pois a faixa sedimentada é pequena ( $< 1$  mm), representando menos que 5 % na espessura total. Tal faixa possui uma sedimentação de 18% da carga metálica em relação à área que não foi afetada pela sedimentação.

Na Figura 40, é vista uma sedimentação mais acentuada da carga metálica em uma faixa de aproximadamente 950  $\mu$ m na parte inferior do corpo de prova. Esta parte inferior corresponde à entrada da broca no material nos ensaios de furação. Existe a perspectiva de que a referida sedimentação possa comprometer a usinagem e a qualidade dos furos, fatos estes que serão analisados nas seções seguintes. A faixa com sedimentação corresponde a um aumento de 27% na quantidade de partículas de ferro em relação ao resto do corpo de prova. Assim, admite-se que a distribuição presente não comprometerá a furação do material.

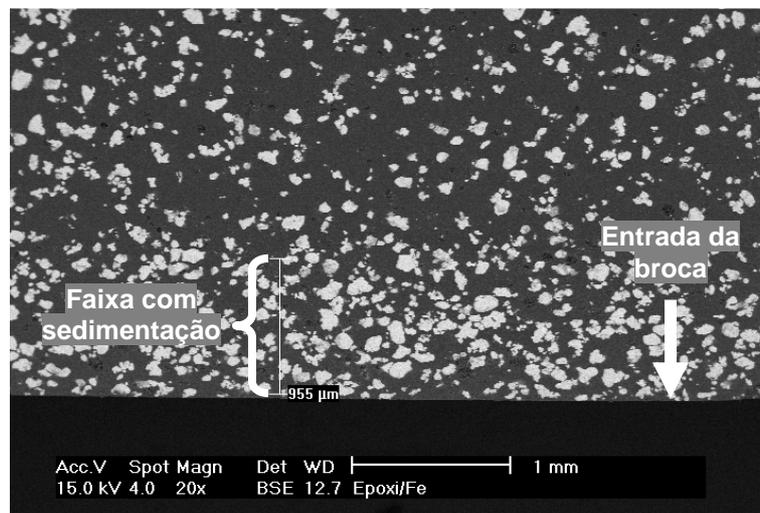


Figura 40 – Amostra do corpo de prova com sedimentação da carga metálica detalhando a parte que corresponde à entrada da broca no material.

- **Corpo de prova de resina epóxi com 30% de carga metálica**

O corte vertical entre os furos mostra principalmente a sedimentação da carga, se houver. Observando a Figura 41, é possível perceber que a carga está muito bem distribuída e que não possui nenhum sinal significativo de sedimentação, ao contrário do que ocorreu com o corpo de prova com 10 % de carga metálica.

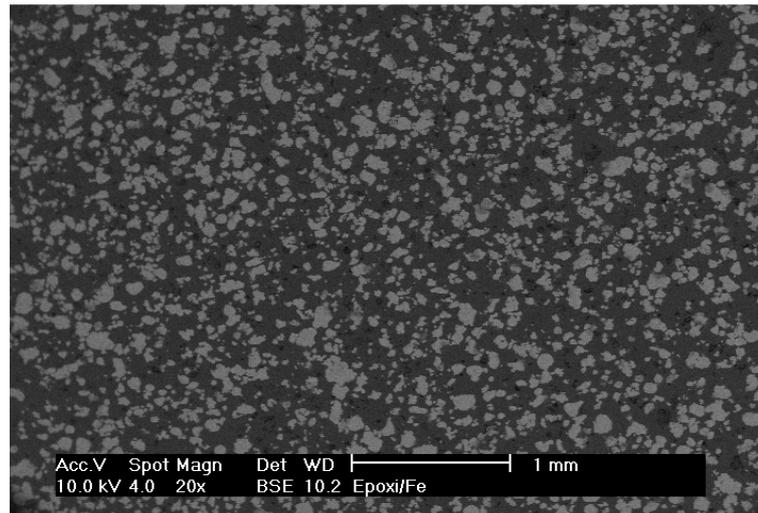


Figura 41 – Distribuição da carga metálica na resina epóxi para o corpo de prova com 30% de carga metálica.

### 5.1.2 Corte horizontal do corpo de prova

O corte horizontal tem como objetivo mostrar a distribuição da carga metálica e a presença de vazios, se houver, na seção média no plano horizontal do corpo de prova. Sabendo que a sedimentação se dá na vertical por efeito da força gravitacional, o corte horizontal torna-se um parâmetro para verificar a distribuição da carga metálica, em relação a aglomerados ou dispersões das partículas de ferro, pois a força gravitacional age em um só sentido e direção, ou seja, vertical. Este corte é feito no centro da espessura da parede do corpo de prova, como exibido na figura 42.

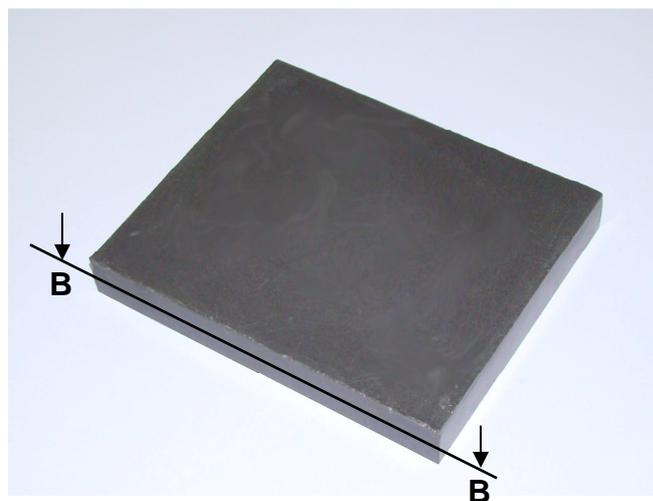


Figura 42 – Corte horizontal B-B do corpo de prova no centro da espessura da parede.

O corte horizontal não foi feito na resina epóxi pura, pois, como a resina não possui carga e é translúcida, todas as análises foram realizadas com o corte vertical, visto que isto não influenciaria no resultado.

- **Corpo de prova de resina epóxi com 10% de carga metálica**

Este corte tem como objetivo mostrar a distribuição da carga metálica na resina epóxi no plano na seção média do corpo de prova. A amostra foi retirada do centro do corpo de prova. É possível ver, na Figura 43, uma distribuição relativamente uniforme da carga metálica, com diferentes tamanhos de partículas na resina epóxi. A carga metálica são as partículas mais claras. Não se percebe a presença de vazios.

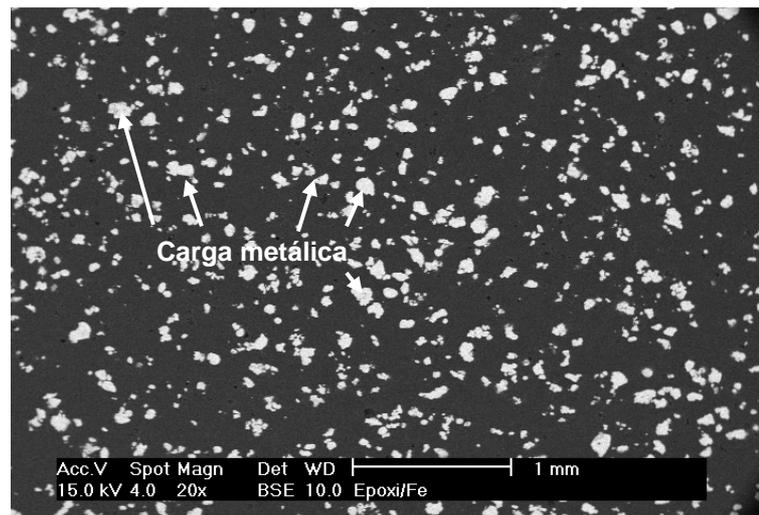


Figura 43 – Distribuição da carga metálica – partículas de ferro – em um corte horizontal no centro da espessura do corpo de prova de resina epóxi com 10% de carga metálica (MEV – BSE)

- **Corpo de prova de resina epóxi com 30% de carga metálica**

Depois de efetuado corte horizontal do corpo de prova com 30% de carga metálica, é possível analisar a distribuição das partículas na resina epóxi, formando o material compósito. Na Figura 44, observa-se uma boa distribuição da carga metálica, sem grandes aglomerados ou espaços vazios.

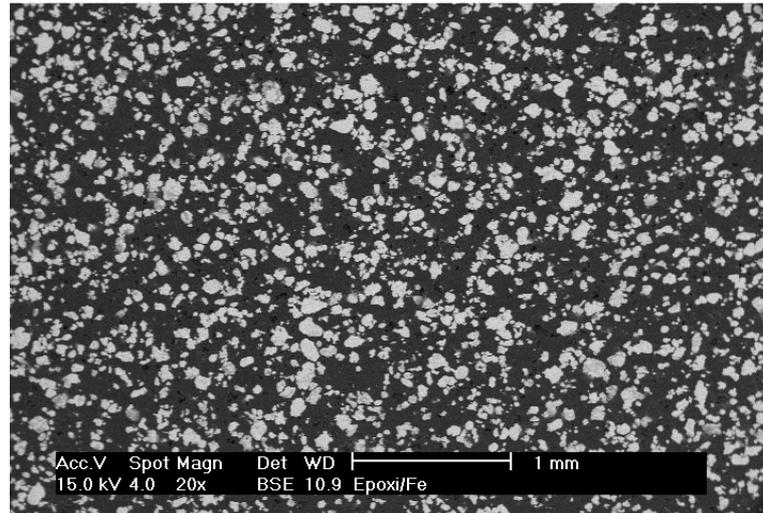


Figura 44 – Distribuição da carga metálica na resina epóxi no copo de prova com 30% de carga metálica.

Através destas micrografias, também pode-se analisar a distribuição da carga metálica na matriz polimérica. Como visto em todas as figuras, principalmente as com aumento de 20 vezes, tanto no topo, quanto no meio e na base, as partículas estavam bem distribuídas. Esta preocupação existe por conta da sedimentação da carga metálica que poderia ocorrer durante o processo de vazamento e cura da resina epóxi, onde se deve ter grande atenção. É de suma importância respeitar o tempo de mistura de vinte e cinco minutos antes do vazamento, pois com um tempo menor ocorrerá sedimentação da carga metálica. Tal fato foi constatado nesta seção, em que a resina com 10% de carga metálica foi vazada com um tempo de mistura de vinte minutos e houve sedimentação da carga metálica. A resina com 30% de carga metálica foi vazada depois de vinte e cinco minutos de mistura e não ocorreu sedimentação, mesmo com uma quantidade maior de carga. Quanto mais perto do ponto de gel – que é o ponto que a resina começa a solidificar – a resina for vazada, melhores serão os resultados, uma vez que não haverá tempo suficiente para a carga ser sedimentada. A espessura da peça também é um fator importante a ser considerado nesta questão, pois quanto maior o volume de resina a ser curado, maior é a reação exotérmica, conseqüentemente, maior a temperatura gerada dentro do corpo de prova. Um aumento exagerado da temperatura pode gerar bolhas e vazios. O surgimento de bolhas e vazios, durante a preparação, não foi observado nos corpos de prova. Isto leva a crer que o modo de preparo e o vazamento estão corretos.

Em princípio, assume-se também que as heterogeneidades constatadas não afetarão substancialmente os resultados da usinagem dos materiais em questão. Por outro lado, cabe registrar que um estudo mais específico acerca desta questão da sedimentação das partículas e seus efeitos sobre a usinagem poderá revelar resultados importantes, no que tange à utilização e usinagem desses compósitos.

### 5.1.3 Análise da integridade da superfície na parede do furo

Um dos principais fatores a ser avaliado é a qualidade da superfície usinada. Entretanto, uma outra avaliação torna-se de grande importância na análise do furo usinado: a integridade da superfície e sub-superfície. O processo de usinagem resulta em solicitações térmicas e mecânicas, que podem alterar o estado da superfície e da sub-superfície do material usinado. Deste modo, uma análise da condição da superfície usinada é realizada.

Por meio de um corte vertical no corpo de prova, foi possível verificar a integridade da sub-superfície na parede do furo (Figura 45), que poderia ser afetada pelo aquecimento gerado em função do atrito entre a broca e o corpo de prova durante a furação. Nos corpos de prova, foi realizada uma avaliação por microscopia eletrônica de varredura, entre a borda do furo e a parede do furo.

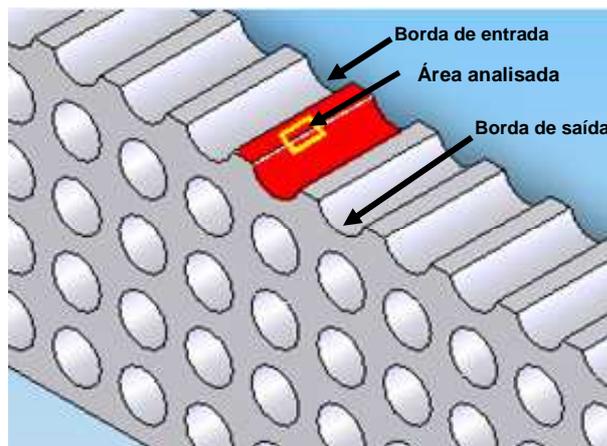


Figura 45 – Corte do corpo de prova para analisar a integridade da superfície do furo.

Outros problemas que poderiam ser identificados são: queima, microtrincas, distorções microestruturais e tensões residuais. Em condições críticas de corte, a

espessura da camada afetada é maior, em contrapartida, em condições de corte mais suaves, a camada afetada é menor.

- Corpo de prova com 10% de carga metálica

Na Figura 46, tem-se uma amostra que caracteriza a parede do furo e a sua região de transição para a superfície que se encontra em torno do furo. A região de maior interesse está situada entre as linhas vermelhas, ou seja, região 1. Tal região representa um limiar entre a parede do furo e a borda do furo (ver Figura 45). Se houvesse alguma alteração na sub-superfície do furo, estaria evidenciado nesta área. Como a região 1 não apresenta diferenças significativas em relação à região 2, que possui uma profundidade consideravelmente grande em relação à superfície da parede do furo para se atingida termicamente ou por solicitações mecânicas, pode-se considerar que a integridade da superfície não foi afetada durante o processo de furação.

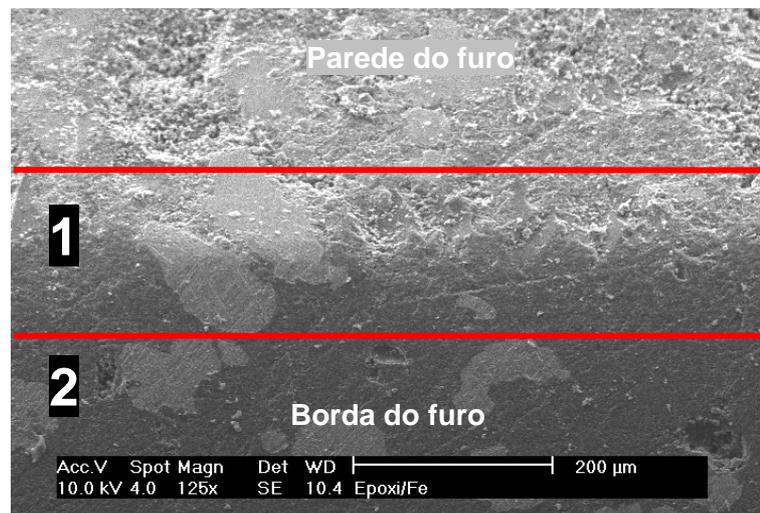


Figura 46 – Amostra do corpo de prova com 10% de carga metálica. A integridade da superfície não foi afetada durante a furação.

Portanto, conclui-se que não foi afetada a integridade da sub-superfície da parede do furo.

- Corpo de prova com 30% de carga metálica

O caso do corpo de prova com 30% de carga metálica é muito semelhante ao caso anterior. Na Figura 47, é exibida a superfície do corpo de prova. A área de

interesse é a número 1, pois é a região que poderia ser afetada pela temperatura ou solicitações mecânicas. Visto que a região 1 não apresenta grandes diferenças em relação à região 2, significa que não foi afetada com grande intensidade. Observando ainda a região 1, é possível notar na parte direita da micrografia as partículas bem ancoradas na matriz.

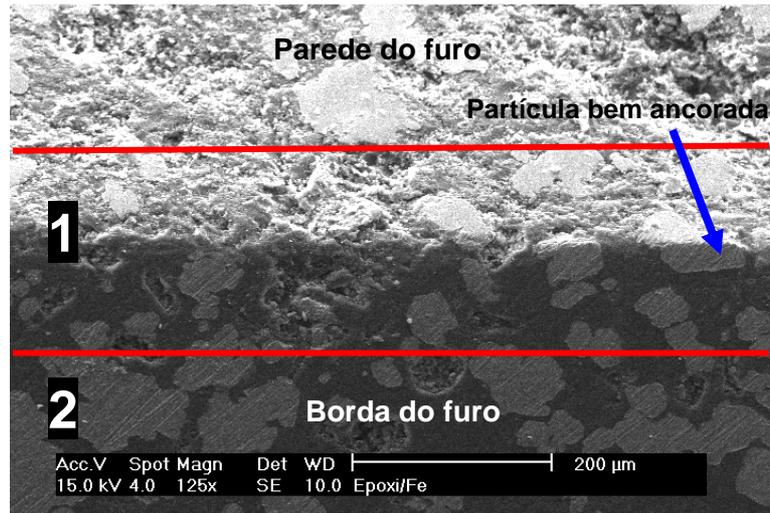


Figura 47 – Amostra do corpo de prova com 30% de carga metálica. A integridade da superfície não foi afetada durante a furação.

Assim, após a análise dos corpos de prova, foi verificado que a sub-superfície da parede do furo não foi afetada de forma significativa, durante a usinagem do furo. Uma vez realizadas a caracterização e a apresentação do material que será estudado, passa-se, na sequência, a avaliar os corpos de prova, referente à qualidade do furo.

## 5.2 Avaliação da qualidade do furo

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos nos ensaios de furação seguindo uma ordem crescente na quantidade de carga metálica adicionada na resina epóxi. Para todos os casos, a sequência de apresentação é definida por:

### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Uma sondagem com um microscópio eletrônico de varredura foi realizada na superfície da parede do furo do corpo de prova, para os três tipos de materiais (0%

de ferro, 10% de ferro e 30% de ferro), com o objetivo de examinar a microestrutura do material nas diferentes velocidades de corte. Abaixo, segue a Figura 48 explicando o corte feito no corpo de prova e a região do furo em que foi realizada a sondagem.

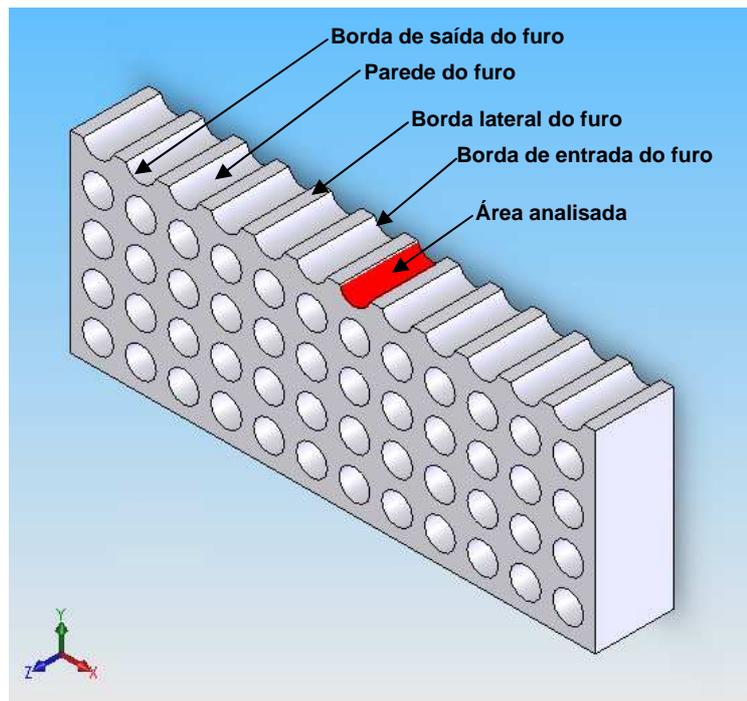


Figura 48 – Corte do corpo de prova mostrando a área da sondagem (em vermelho).

A qualidade do furo será analisada em função da presença de irregularidades, como lascamentos e rebarbas nas bordas da entrada e da saída do furo, bem como em relação às características da textura ao longo do furo. A nomenclatura borda de entrada e borda de saída do furo está associada ao sentido da entrada da broca nos ensaios, ou seja, a borda de entrada do furo está localizada na face de entrada da broca nos ensaios e a borda de saída do furo está localizada na face da saída da broca nos ensaios.

#### **b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo**

O perfil de rugosidade é obtido por um instrumento de avaliação, no caso o rugosímetro, após filtragem. É o perfil representado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação da parede do furo.

### **c) Análise do Cavaco**

Nesta parte do trabalho, serão analisados os cavacos provenientes da usinagem da resina epóxi e dos materiais compósitos. O material foi recolhido cuidadosamente após os três primeiros e três últimos furos realizados para cada composição e velocidade de corte. Isto foi feito com o objetivo de buscar uma homogeneidade das amostras.

### **d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo**

Para os materiais poliméricos reforçados com fibras, grande parte dos problemas de lascamentos e rebarbas estão localizadas na saída do furo. Neste trabalho, no qual são utilizadas cargas particuladas que tendem a possuir um formato esférico, será analisado o comportamento nas bordas da entrada e saída do furo. Neste item especificamente, é feita a determinação das rebarbas e lascamentos na borda do furo, ou seja, é determinada quantitativamente a abrangência das rebarbas e lascamentos.

### **e) Análise da rugosidade na parede do furo para todos os ensaios**

Neste item será mostrado o resultado para todos os ensaios, resumido em duas tabelas, uma para o parâmetro  $R_a$  e outra para o parâmetro  $R_z$ . A medição dos parâmetros de rugosidade possibilita quantificar as características geométricas de uma superfície. No presente trabalho, mediram-se os parâmetros  $R_a$  e  $R_z$ , no meio da parede do furo e paralelamente ao eixo do furo. Os resultados representam a média de três medidas. O maior desvio padrão encontrado nas médias foi 0,4, assim, os valores medidos não foram muito discrepantes.

Analisando os resultados do Gráfico 49, pode-se afirmar que o aumento da rugosidade está diretamente relacionado com o aumento da velocidade de corte, visto que o avanço não é alterado (0,3 mm), como já explicado na seção pré-ensaios.

Os testes realizados com a broca de aço-rápido não estão aqui expressados. Isto, porque os valores de rugosidade eram superiores ao que o rugosímetro é capaz de medir.

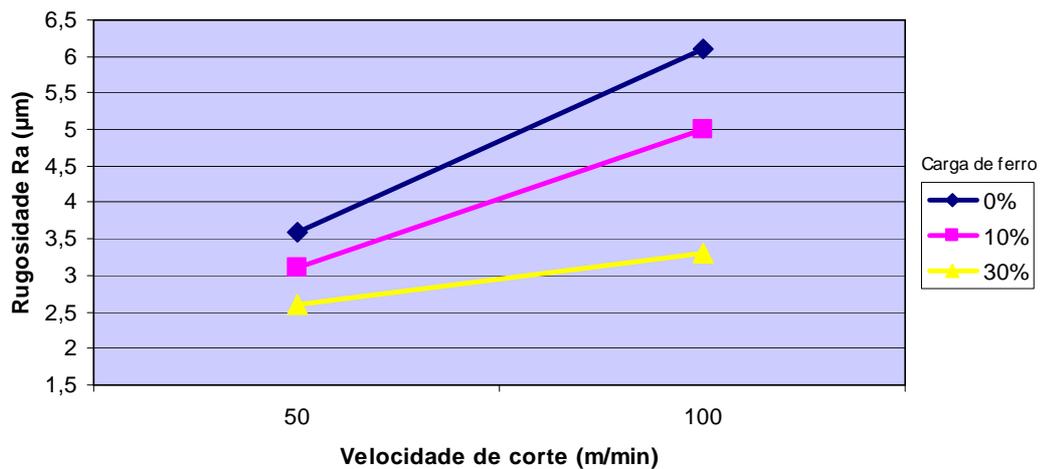


Gráfico 49 – Gráfico mostrando os valores de rugosidade  $R_a$ , para as velocidades de corte de 50 e 100  $\text{m/min}$  para todas as composições de resinas epóxi.

No Gráfico 50 é apresentado o comportamento da rugosidade  $R_z$ .

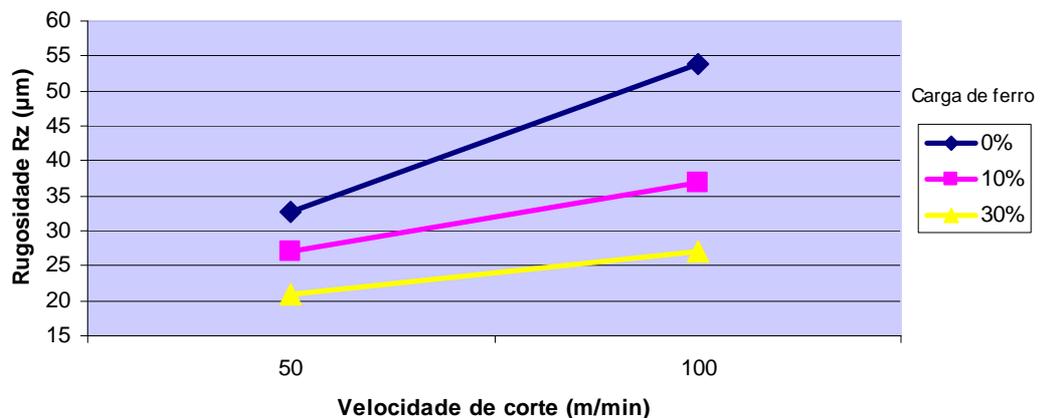


Gráfico 50 – Gráfico mostrando os valores de rugosidade  $R_z$ , para as velocidades de corte de 50 e 100  $\text{m/min}$  para todas as composições de resinas epóxi.

Percebe-se que, para o parâmetro  $R_z$ , o aumento da quantidade de carga provoca uma redução na rugosidade. Este comportamento foi constatado em outros trabalhos (DURÃO et al., 2006; ARAÚJO; ABRÃO; FARIA, 2005). Após estudo, chegou-se à conclusão de que isto ocorre devido à melhora da condutividade térmica do material compósito, já que, para a resina epóxi sem carga, com 10% de carga e com 30% de carga são 0,157 - 0,218 - 0,368  $\text{W/mK}$ , respectivamente (JESUS, 2005).

Segundo Sonbaty et al. (2004) e Araújo, Abrão e Faria, (2005) a condutividade térmica da resina sem carga é menor, o que gera o acúmulo de calor ao redor do gume, destrói a estabilidade da matriz e produz uma superfície crespa e rugosa.

Após exibidos os resultados de rugosidade para todos os materiais, cada material será avaliado independentemente nas próximas seções.

### 5.2.1 Resina epóxi sem carga metálica e $v_c$ de 50 m/min

#### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 51 e 52, tem-se a textura da resina epóxi sem adição de carga de pó de ferro, com uma velocidade de corte de 50 m/min. Observando as Figuras 51 e 52, pode-se verificar o aparecimento de pequenas cavidades em torno de 200  $\mu\text{m}$ , também com uma característica de material frágil.

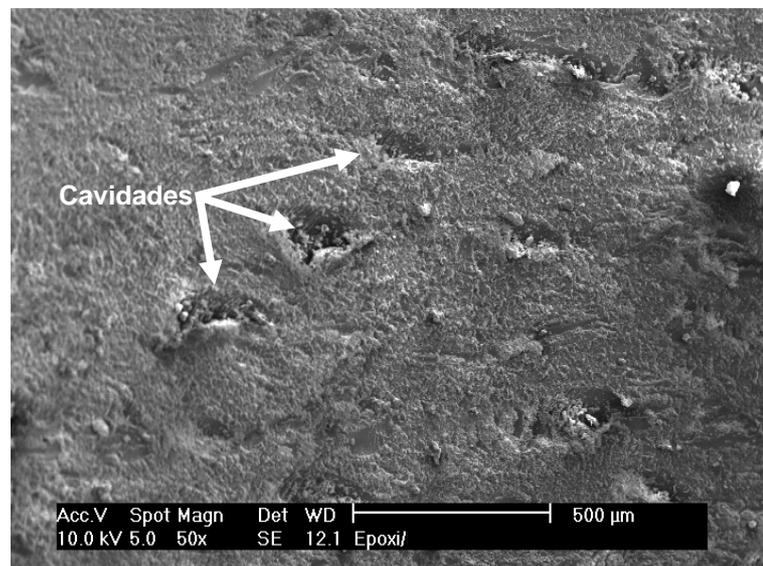


Figura 51 - Micrografia da resina epóxi na metade do furo com aumento de 50x.  
Resina sem carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

A Figura 52, que é uma ampliação da figura anterior, mostra a cavidade formada na parede do furo, durante o processo de furação. Tais cavidades tendem a elevar a rugosidade da superfície. O processo de formação das cavidades se dá por arrancamento frágil, devido à presença de microtrincas, que surgem devido à ação mecânica e térmica da ferramenta sobre esta

superfície. A formação das cavidades é um detalhe importante e deve ser estudado mais profundamente.

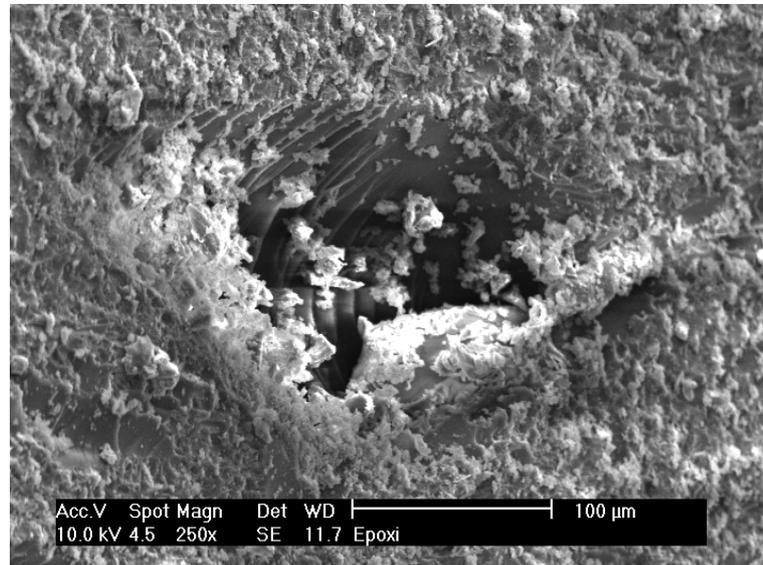


Figura 52 - Microestrutura da resina epóxi na metade do furo com aumento de 250x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Isto representa uma diminuição da qualidade do furo, com uma possível diminuição da resistência da peça.

### b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

A Figura 53 mostra o perfil de rugosidade da superfície da parede do furo após o ensaio de furação com velocidade de corte de 50 m/min. Mesmo possuindo um valor de  $R_a$  relativamente baixo, o perfil apresenta dois grandes vales de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ . Provavelmente são duas cavidades do tipo já vistas na figura anterior.



Figura 53 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 0% de carga metálica e  $v_c$  de 50 m/min.

### c) Análise do Cavaco

Segundo Rahman et al. (1999), os cavacos formados pela usinagem de polímeros termofixos são do tipo interrompido na forma de pó ou arrancado. Isto indica que o mecanismo de formação do cavaco é um processo de fratura de material, chamada de fratura frágil, diferentemente dos polímeros termoplásticos. Basicamente, os termofixos são mais frágeis e possuem menos capacidade de deformação plástica e, desta forma, os cavacos tendem a fraturar mais cedo. O cavaco formado pela usinagem da resina epóxi sem carga e velocidade de corte de 50 m/min pode ser visto na Figura 54.



Figura 54 – Cavaco da resina sem carga e  $v_c$  de 50 m/min.

É um cavaco que se assemelha a um material termoplástico, porém, em razão das lascas geradas no processo de corte, denuncia um material termofixo frágil. Talvez possa a vir ocorrer essa característica de cavaco de termoplástico em virtude da geometria especial da ferramenta com um gume bem afiado, conseguindo cortar a resina epóxi sem ocasionar muitos danos.

### d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

Na Figura 55, é possível ver lascamentos na entrada do furo provenientes de uma matriz frágil. Os lascamentos são prejudiciais para a qualidade do furo, comprometendo a função e a utilização da peça. Os lascamentos são resultado de trincas que ocorrem pela distribuição das forças durante o processo de usinagem. No início da penetração da broca no material composto, os gumes principais chocam-se com o material estacionário, no caso o corpo de prova,

formando micro- trincas que se propagam superficialmente, ocasionando os lascamentos.

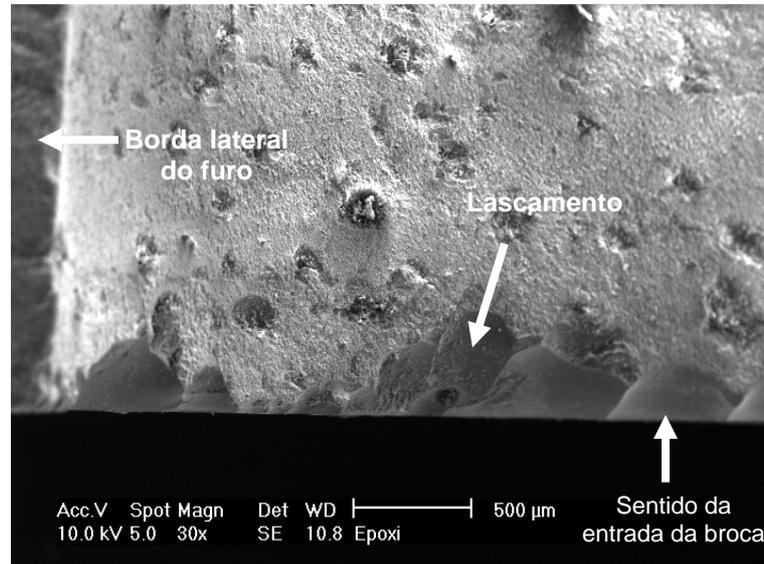


Figura 55 - Micrografia da resina epóxi na entrada do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Analisando a Figura 56a, com uma vista superior na entrada do furo, pode-se observar grandes lascamentos na ordem de 345  $\mu\text{m}$ , o que mostra o comportamento frágil da matriz epóxi. Na saída do furo (Figura 56b), é vista a borda sem lascamentos, todavia com uma aresta levemente chanfrada com comprimento menor que 25  $\mu\text{m}$ . Tal aresta pode ter sido formada por microlascamentos, devido às forças de corte envolvidas no processo de furação.

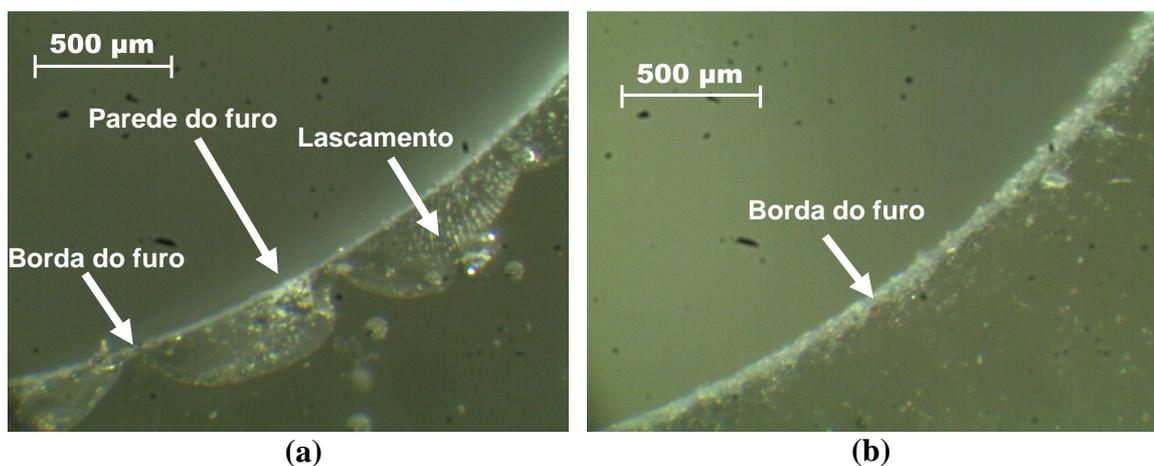


Figura 56 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro,  $v_c$  50 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

## 5.2.2 Resina epóxi sem carga metálica e $v_c$ de 100 m/min

### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 57 e 58, verifica-se a textura da resina epóxi sem adição de carga de pó de ferro, com uma velocidade de corte de 100 m/min. Na Figura 57, o corte se dá por um misto entre cisalhamento e arrancamento frágil, formando uma superfície crespada. O detalhe é mostrado na Figura 58. Com um aumento de 250 vezes pode ser visto no meio da superfície empastada, a existência de um cisalhamento da resina epóxi com características de material frágil, assim como a quebra de um material vítreo.

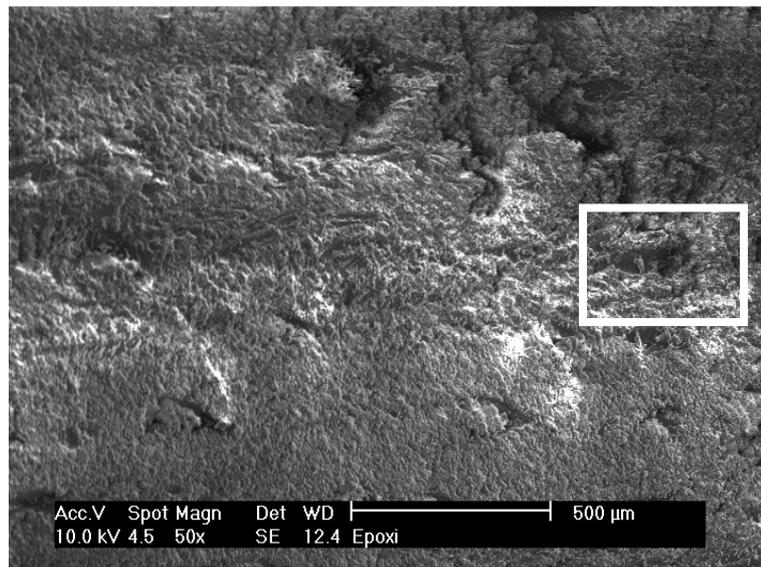


Figura 57 - Micrografia da resina epóxi na mediatriz do furo com aumento de 50x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

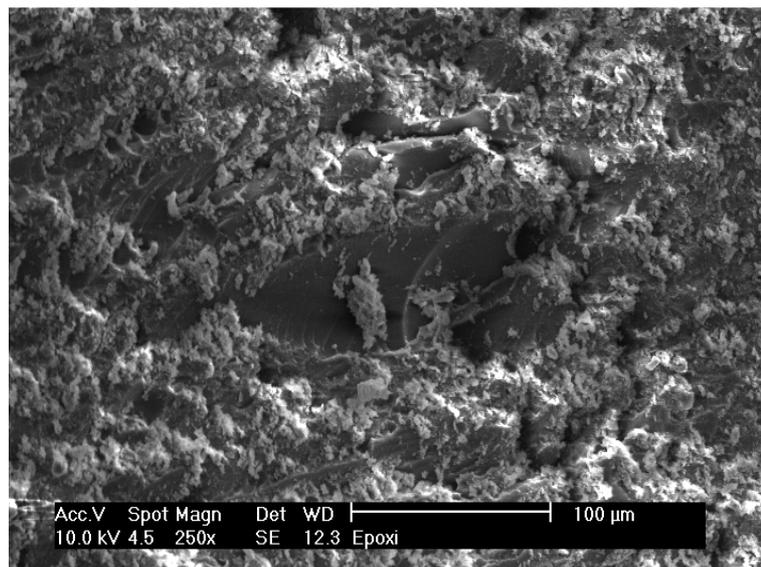


Figura 58 - Microestrutura da resina epóxi na metade do furo com aumento de 250x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

### b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

Na Figura 59, pode-se ver o perfil de rugosidade quando usada velocidade de corte de 100 m/min e resina sem carga metálica. Como resultado, tem-se uma superfície com vales bastante profundos, conseqüentemente, com uma rugosidade  $R_a$  (6,2  $\mu\text{m}$ ) mais elevada que o caso anterior.



Figura 59 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 0% de carga metálica e  $v_c$  de 100 m/min.

### c) Análise do Cavaco

Para o caso da resina epóxi sem carga e velocidade de corte de 100 m/min, existe uma acentuada característica de arrancamento, e não mais de corte. Tal característica fica evidente quando analisado o cavaco e encontram-se várias lascas de material em forma de partículas com tamanho de até 400  $\mu\text{m}$ , como visualizado na Figura 60.

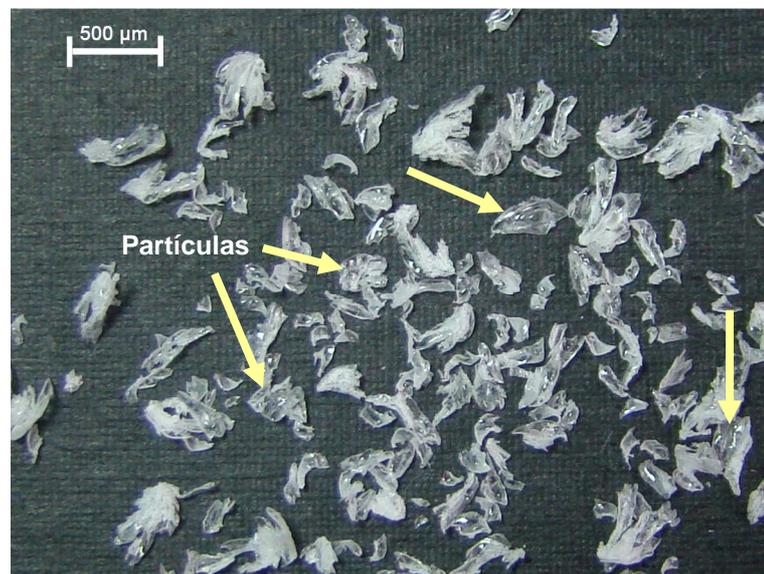


Figura 60 – Cavaco da resina sem carga e  $v_c$  de 100 m/min.

#### d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

É constatado, na Figura 61, um aumento no tamanho dos lascamentos na entrada do furo. Tais lascamentos são de grandes proporções, chegando a 460  $\mu\text{m}$ . Com a velocidade de corte menor, a largura é de 345  $\mu\text{m}$ , o que compromete a utilização da peça ou componente.

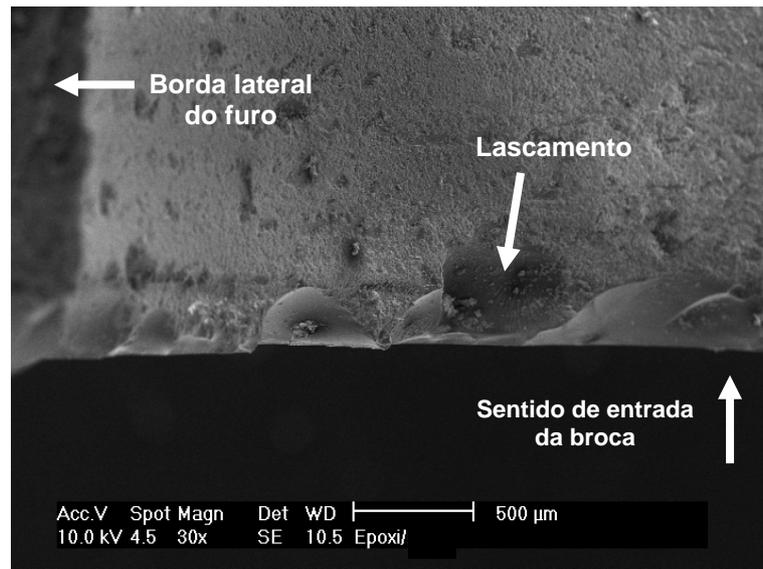


Figura 61 - Micrografia da resina epóxi na entrada do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

Conforme a Figura 62, já não é possível ver a formação das pequenas cavidades, como na velocidade de corte menor, porém apareceram algumas partículas dispersas na parede do furo, provavelmente, microcavacos. Referente à borda de saída da broca, pode-se perceber que não existem lascamentos ou rebarbas, formando uma aresta bem definida.

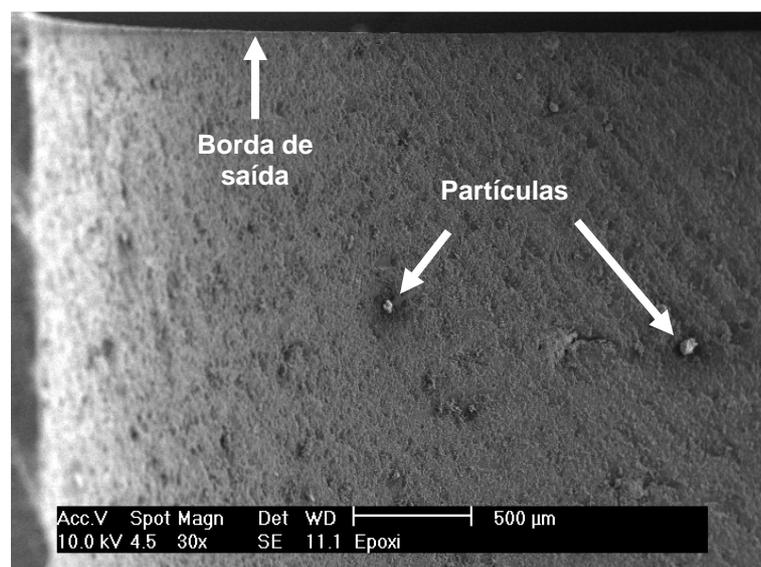


Figura 62 - Micrografia da resina epóxi na saída do furo com aumento de 30x. Resina sem carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

A Figura 63a e 63b exibe uma vista superior na entrada do furo. Houve lascamentos ainda maiores na entrada do furo, com comprimento de 460  $\mu\text{m}$ , comparados com velocidade de corte mais baixa. Contudo, na saída do furo (Figura 63b), teve menos microtrincas na aresta da borda, que não possui micro- lascamentos ou pó de resina.

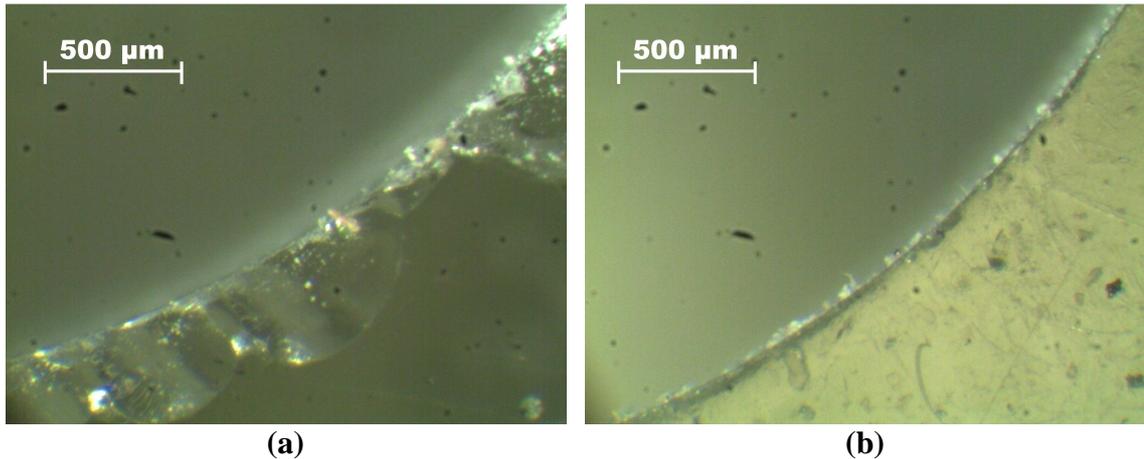


Figura 63 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro,  $v_c$  100 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

### 5.2.3 Resina epóxi sem carga metálica (usando broca de aço-rápido)

#### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Para efeito comparativo, também foi realizado um ensaio usando uma broca de aço-rápido comum, ou seja, sem nenhuma preparação especial referente à geometria ou revestimento. Na figura 64, é vista uma ampliação na metade do furo, mostrando cavidades com tamanho de até 900  $\mu\text{m}$  de largura na parede. Dois fatores são predominantes na textura da parede do furo, o primeiro é o tamanho das cavidades e o segundo é a grande quantidade de cavidades presentes na parede. Tais fatores elevam a rugosidade da superfície, prejudicando a qualidade.

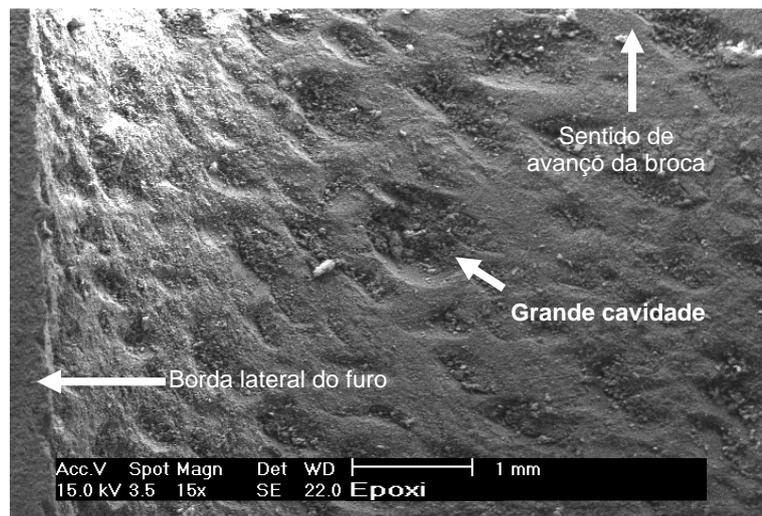


Figura 64 – Micrografia do meio do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min

A Figura 65 mostra o interior de uma cavidade no centro do furo com ampliação de 100 vezes. Nesta figura, pode-se ver claramente um fino pó de resina. É possível ver também que, abaixo do pó, existe uma superfície plana e lisa, que é uma característica de quebra ou trinca de um material frágil.

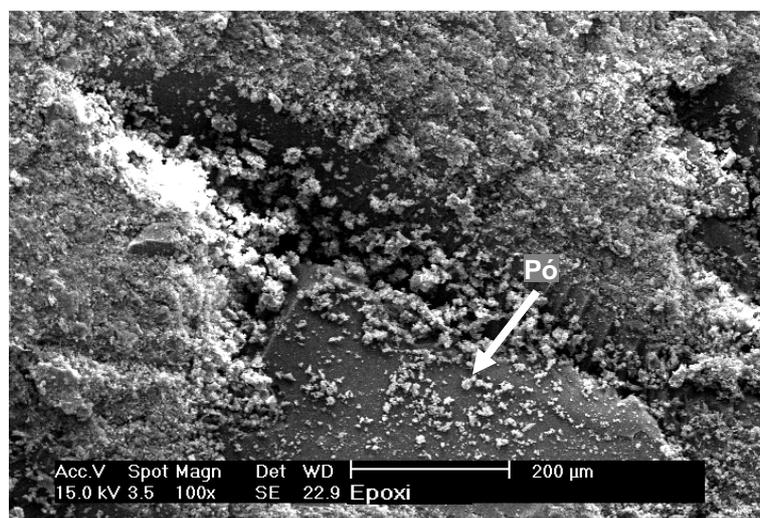


Figura 65 – Ampliação da cavidade da Figura 64.

Comparando os ensaios realizados com a broca de metal-duro e geometria especial com a broca de aço-rápido convencional, fica bastante evidente que a broca de aço-rápido convencional teve um desempenho muito inferior no quesito qualidade, tanto nas bordas de entrada e de saída quanto na parede do furo.

## b) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

A Figura 66 destaca a borda de entrada do furo. Pode ser observado que existem vários lascamentos e com grandes dimensões, chegando até 620  $\mu\text{m}$  de altura, como o indicado pela seta na figura.

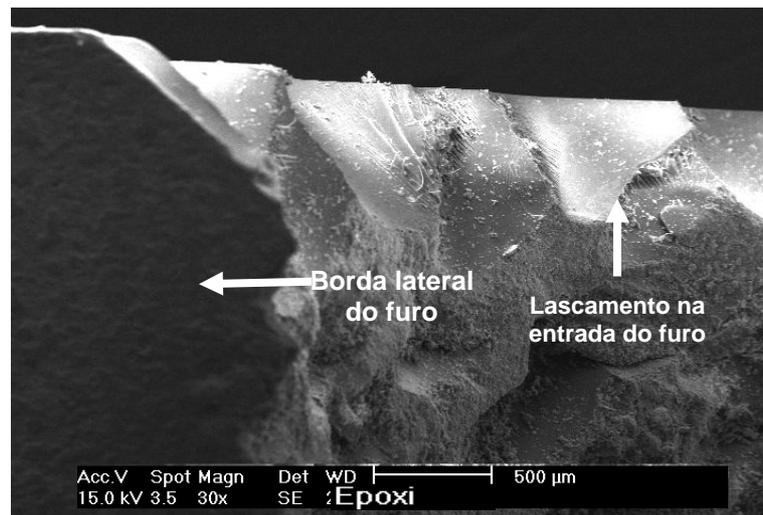


Figura 66 – Micrografia da entrada do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min.

A Figura 67 exibe a borda de saída do furo, que está bastante danificada. Devido à natureza frágil da matriz epóxi, e a broca sem uma geometria apropriada para materiais compósitos, a borda de saída do furo ficou quase que totalmente danificada. Ocorreram grandes lascamentos, e uma lasca ou fragmento ainda estava presente durante a análise microscópica, pois continuava presa na matriz polimérica, visto na mesma figura.

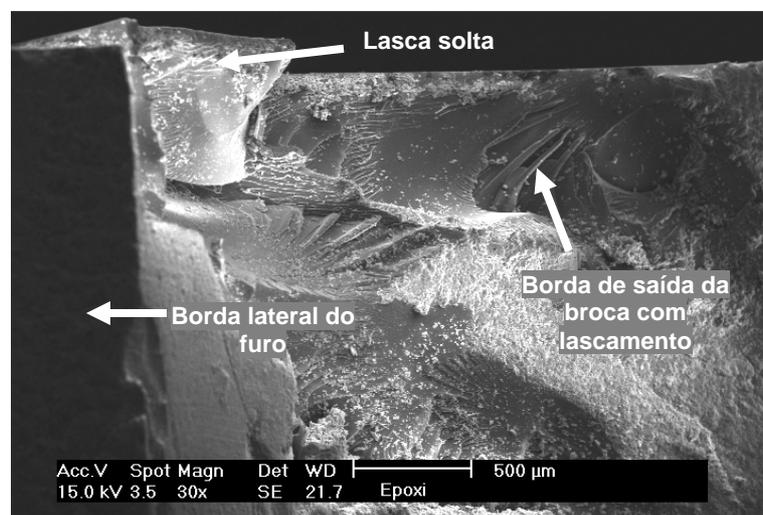


Figura 67 – Micrografia da saída do furo, na resina epóxi sem carga, quando usada uma broca de aço-rápido convencional com velocidade de corte de 50 m/min

A Figura 68 mostra uma vista superior da entrada do furo. Na Figura 68a, podem ser visualizados grandes lascamentos na entrada do furo, da ordem de 880  $\mu\text{m}$ . O mesmo ocorre na saída do furo (Figura 68b), com grandes lascamentos. É importante salientar que, quando usada a broca com geometria especial, não eram presenciados lascamentos na saída do furo.

Nos casos em que foram usadas resinas epóxi sem carga metálica, não houve aparecimento de rebarbas, uma vez que a borda do furo na entrada foi arrancada quase em sua totalidade.



Figura 68 – Resina epóxi com 0% de carga de pó de ferro,  $v_c$  50 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

#### 5.2.4 Resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min

##### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 69 e 70, observa-se a textura da parede do furo na resina epóxi com adição de carga de pó de ferro com 10%, com uma velocidade de corte de 50 m/min. Tanto na Figura 69, quanto na Figura 70, nota-se que as partículas da carga estão bem ancoradas na matriz de epóxi. Esta condição é favorável para um menor arrancamento das partículas de ferro durante a furação. Por outro lado, também é possível constatar a ação da broca sobre essas partículas de elevada ductilidade. Tal ação se manifesta na forma de deformação plástica e presença de ranhuras na superfície usinada dessas partículas que são resultantes da textura da superfície da ferramenta, particularmente das quinas e das guias da broca.

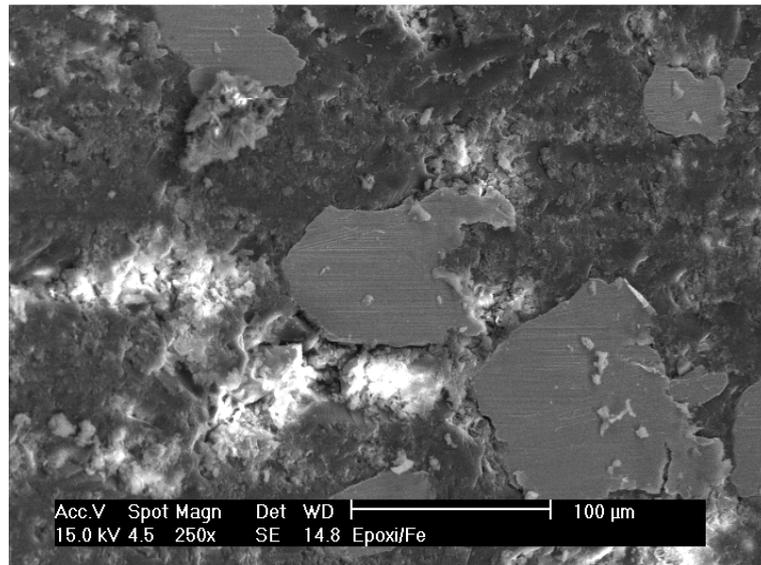


Figura 69 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Por fim, a Figura 70, em uma escala ampliada em 500 vezes, mostra as ranhuras na carga de ferro, provenientes da textura das guias e quinas da broca. Isto ocorre em função de um corte dúctil com escoamento plástico nas partículas do ferro, no canal do furo. Com esta ampliação, tem-se a falsa impressão que a ferramenta não entra em contato com a matriz polimérica, mas somente com as partículas de ferro. Assim, supõe-se que as partículas de ferro dilatam-se pelo atrito causado pelas quinas e guias da broca, ficando proeminentes na parede do furo, expostas à ação da ferramenta. A parte mais clara da figura revela que existem diferentes níveis ou planos.

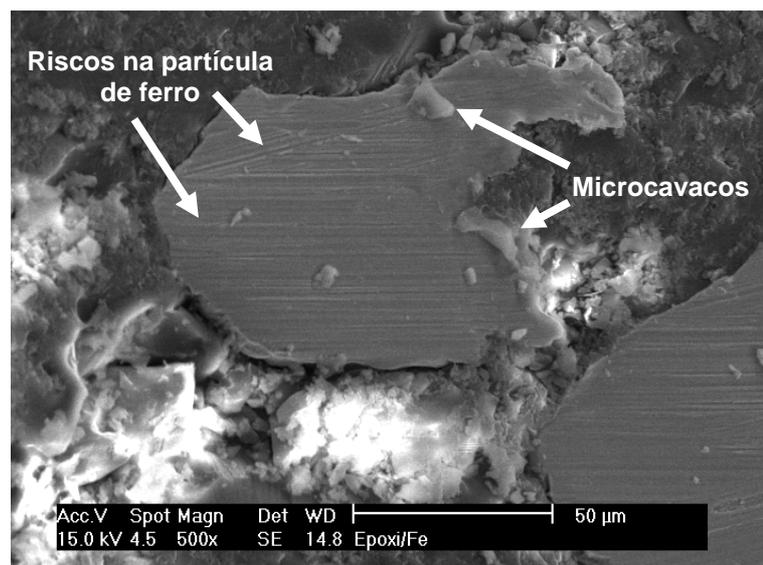


Figura 70 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 500x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Ainda na Figura 70, é possível ver microcavacos sobre a superfície da partícula de ferro. Dependendo da utilização da peça que foi fabricada, esses micro-

cavacos podem ser considerados como sujidades. Caso passe pelo furo água ou óleo, os microcavacos podem se desprender e contaminar o meio lubri-refrigerante, ocasionando desgaste nos equipamentos, no conjunto que a peça está montada. Se o furo for somente para fixação, dificilmente haverá algum problema devido a esses microcavacos.

### b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

A Figura 71 mostra o perfil de rugosidade para o caso da resina epóxi com 10% de carga e velocidade de corte de 50 m/min. Tal perfil não apresenta grandes variações ou vales profundos.

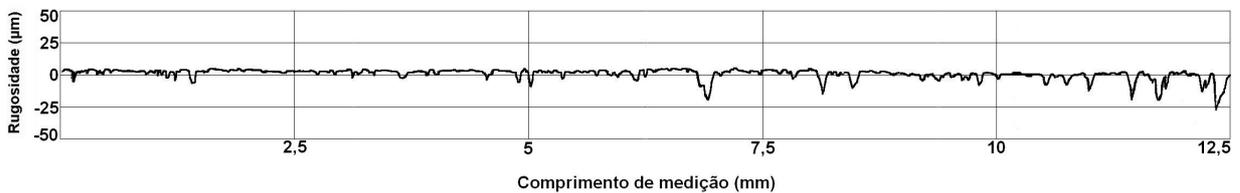


Figura 71 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 10% de carga metálica e  $v_c$  de 50 m/min.

### c) Análise do Cavaco

Os cavacos gerados na usinagem da resina epóxi com 10% de carga metálica e velocidade de corte de 50 m/min são mostrados na Figura 72. Estes são cavacos com um comprimento maior que em relação à resina sem carga. Isto revela um corte mais uniforme pelo gume da ferramenta, devido ao aumento da ductilidade do material compósito.



Figura 72 – Cavaco da resina com 10% de carga e  $v_c$  de 50 m/min.

#### d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

Comparando a entrada do furo (Figura 73) com a saída (Figura 74), percebe-se que na saída há menos lascamentos na borda do furo, assim como ocorreu com a resina epóxi sem carga. Isto ocorre pela distribuição das forças durante o processo de usinagem. No início da penetração da broca no material compósito, os gumes principais chocam-se com o material estacionário, no caso o corpo de prova, formando microtrincas que se propagam superficialmente, ocasionando lascamentos.

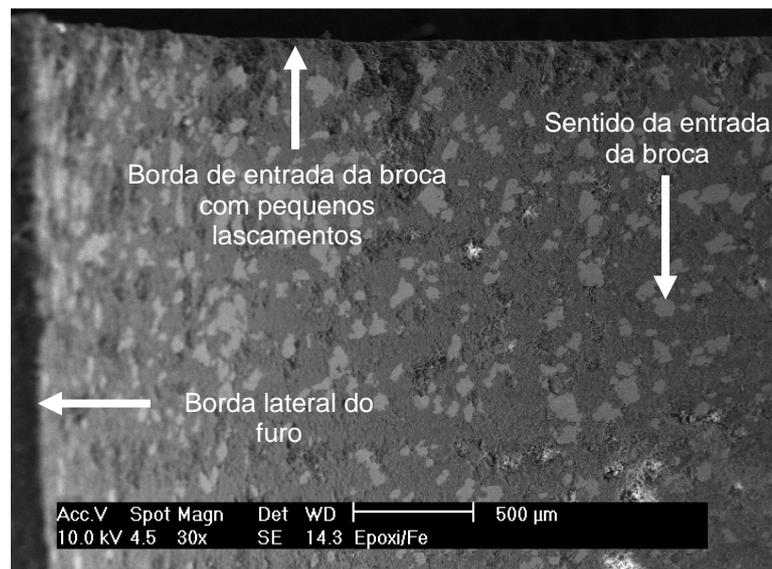


Figura 73 - Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

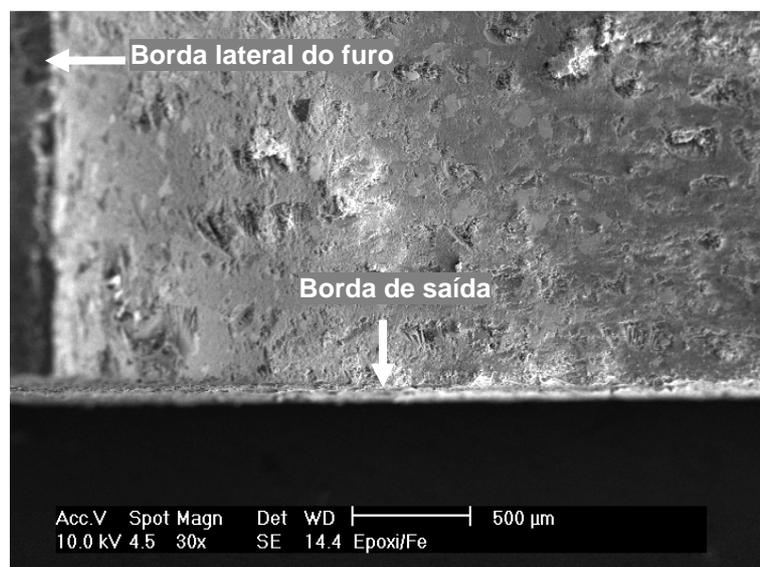


Figura 74 - Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

De acordo com a Figura 75a, a borda do furo apresentou pequenos lascamentos, praticamente formando um pequeno chanfro em todo perímetro do furo, com aproximadamente 95  $\mu\text{m}$  de largura total. O mesmo não acontece na saída do furo, que mostra uma borda muito bem definida (Figura 75b). Em nenhum dos dois casos houve a formação de rebarba.

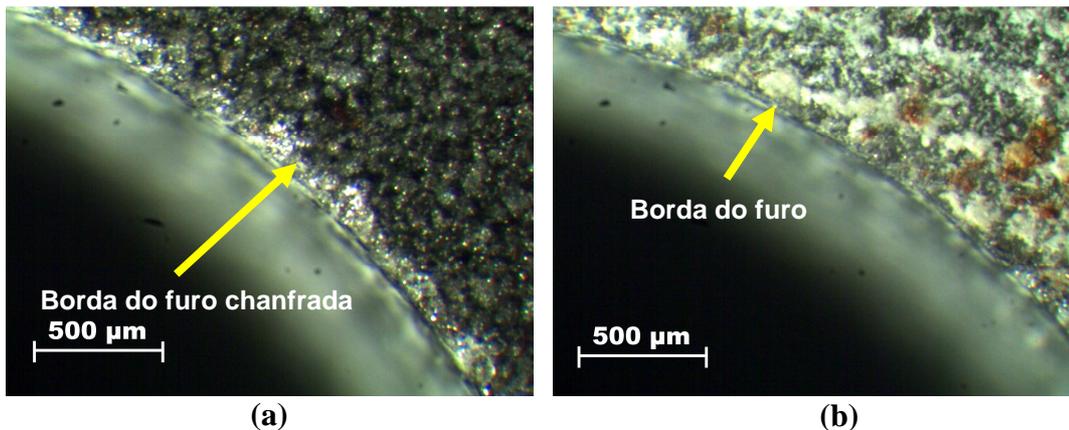


Figura 75 – Resina epóxi com 10% de carga de pó de ferro,  $v_c$  50 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

### 5.2.5 Resina epóxi com 10% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min

#### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 76 a 78, tem-se a microestrutura da resina epóxi com adição de carga de pó de ferro em 10%, com uma velocidade de corte de 100 m/min. Na Figura 76, pode-se observar o surgimento de cavidades na parede do furo, com o aumento da velocidade de corte. Talvez isto aconteça porque os gumes da broca não conseguem cortar de uma forma dúctil a matriz polimérica, que é de uma natureza mais frágil, arrancando material, formando as cavidades. Outro motivo que pode ser considerado, para o surgimento de tais cavidades, é o arrancamento da carga metálica da matriz polimérica, pela falta de uma ancoragem mais rígida. Este comportamento é refletido diretamente na rugosidade do canal do furo, pois quanto mais irregularidades na superfície da parede do furo, pior a qualidade.

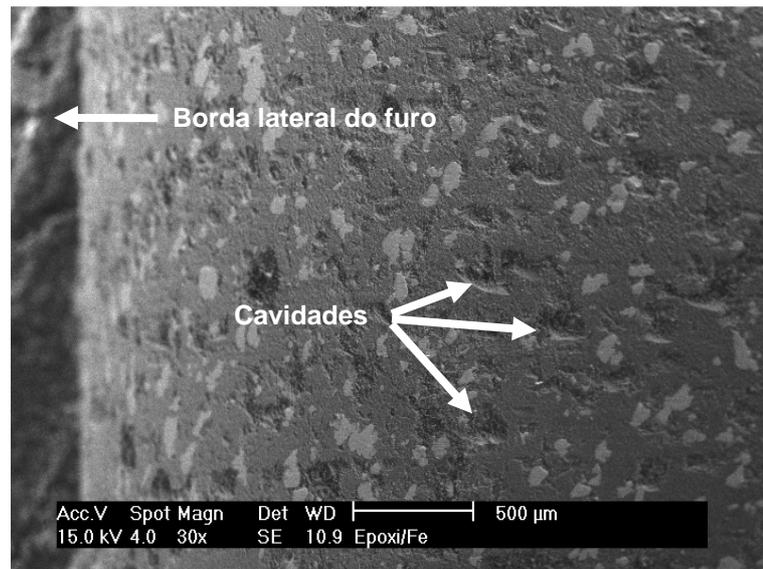


Figura 76 - Micrografia da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 30x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

Vista a Figura 77 com um aumento de 100x, é possível perceber uma cavidade originada pelo arrancamento de uma partícula de ferro pela ferramenta. Quando as partículas são arrancadas, influenciam diretamente na qualidade da superfície, tornando-a mais rugosa, o que não é desejável.

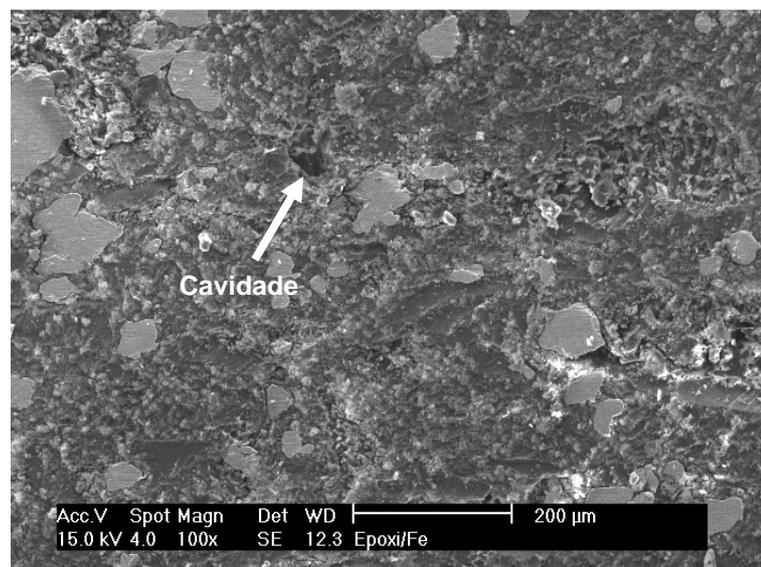


Figura 77 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 100x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

Na Figura 78, houve uma redução na profundidade dos riscos causados pela guia da ferramenta na carga de ferro, comparado com a velocidade de corte a 50

m/min. Possivelmente isto comprove que o atrito das quinas e guias da ferramenta com as partículas de ferro provoque uma dilatação das partículas de ferro, deixando-as mais expostas e, conseqüentemente, mais susceptíveis à transferência da textura da guia da broca para a superfície da partícula de ferro. Como o tempo de usinagem do furo com velocidade de corte de 100 m/min é a metade do tempo da velocidade de corte de 50 m/min, o tempo de contato entre as partículas e a ferramenta é menor, ocasionando um menor aquecimento e, como resultado, uma menor dilatação da partícula de ferro. Ainda na Figura 78, pode-se verificar que possui diferentes texturas, mas principalmente uma região com superfície lisa e outra região com uma superfície crespada. A região lisa é formada por microtrincas e, por consequência, o lascamento da matriz polimérica, que tem uma característica frágil. A superfície crespada talvez seja originada por um empastamento da resina epóxi, por não haver um corte eficiente da resina pelos gumes da broca.

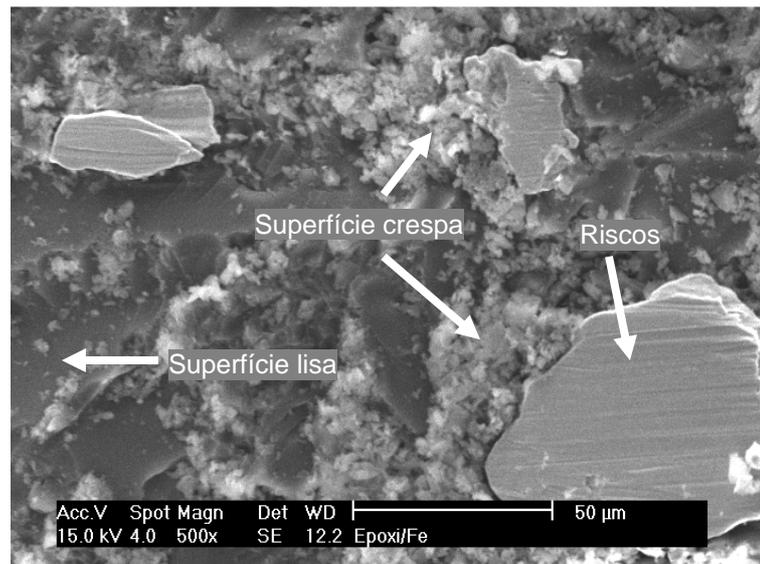


Figura 78 - Microestrutura no meio da parede do furo com aumento de 500x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

## b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

Na Figura 79 é exibido o perfil de rugosidade da parede do furo, com carga 10% de carga metálica e velocidade de corte de 100m/min. Pode-se perceber um grande número de vales com profundidade aproximada de 25 µm. Essa grande quantidade de vales fez com que o parâmetro  $R_a$  tivesse seu valor mais elevado.



Figura 79 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 10% de carga metálica e  $v_c$  de 100 m/min.

### c) Análise do Cavaco

A Figura 80 mostra o cavaco da resina epóxi com carga de 10% e velocidade de corte de 100 m/min como resultado da usinagem. O aumento da velocidade de corte pouco alterou o formato do cavaco em relação à velocidade de corte de 50 m/min. Normalmente, espera-se que, com o aumento da velocidade de corte, haja um amolecimento da matriz em virtude do aumento do calor gerado pelo atrito. Isto levaria à formação de um cavaco com maior comprimento, entretanto isto não ocorreu.

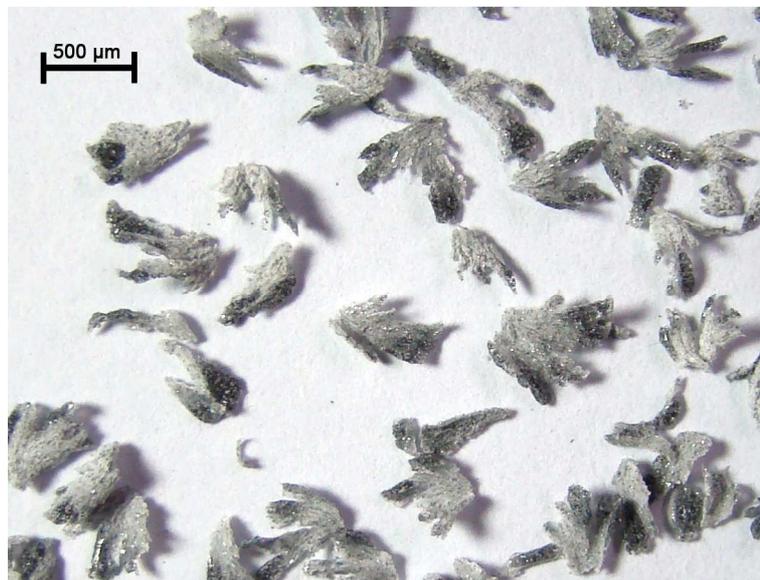


Figura 80 – Cavaco da resina com 10% de carga e  $v_c$  de 100 m/min.

### d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

Com o aumento da velocidade de corte e, conseqüentemente, o aumento da força de avanço e do torque, passam a surgir lascamentos na saída do furo que

praticamente não ocorreram com velocidade de corte a 50 m/min. Cavidades também podem ser vistas na Figura 81.

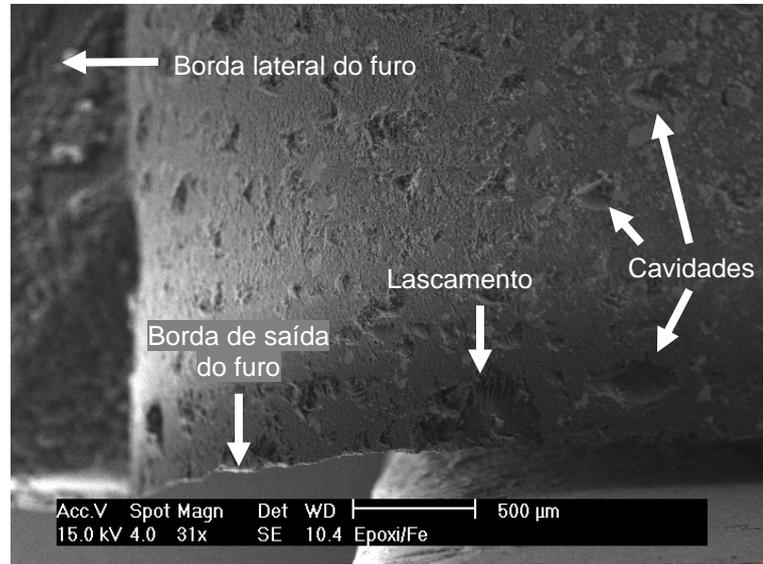


Figura 81 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 31x. Resina com 10% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

Para o mesmo material compósito com carga metálica de 10%, porém com velocidade de corte de 100 m/min (Figuras 82a e 82b), os resultados foram bem parecidos em comparação à velocidade de corte menor. Pode-se observar um aumento da parte chanfrada na borda da entrada do furo, que passou para cerca de 120  $\mu\text{m}$  de largura total. Em nenhum dos dois casos houve a formação de rebarba.

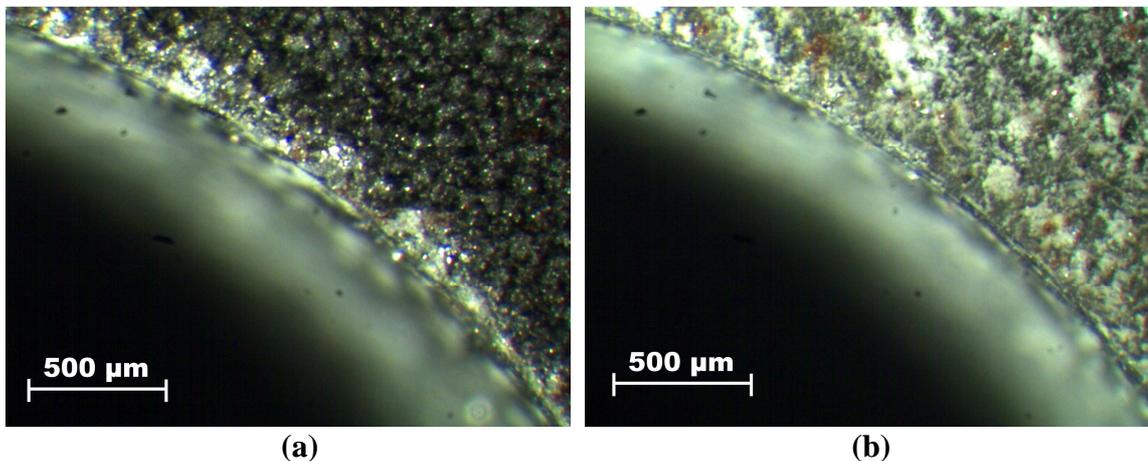


Figura 82 – Resina epóxi com 10% de carga de pó de ferro,  $v_c$  100 m/min. (a) entrada do furo, (b) saída do furo.

## 5.2.6 Resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 50 m/min

### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 83 e 84, visualiza-se a microestrutura da resina epóxi com adição de carga de pó de ferro em 30%, com uma velocidade de corte de 50 m/min. A Figura 83 exibe a superfície no centro da parede do furo. Esta figura mostra a boa ancoragem das partículas de ferro e que praticamente não houve arrancamento, porém é possível ver algumas cavidades decorrentes do arrancamento de partículas de ferro, com tamanhos variando entre 50 e 200  $\mu\text{m}$ . Outro ponto que chama a atenção é a presença de riscos mais profundos, que podem ser chamados de ranhuras. Tais ranhuras provavelmente ocorram com a fricção de partículas arrancadas, alojadas entre a guia da broca e a parede do furo.

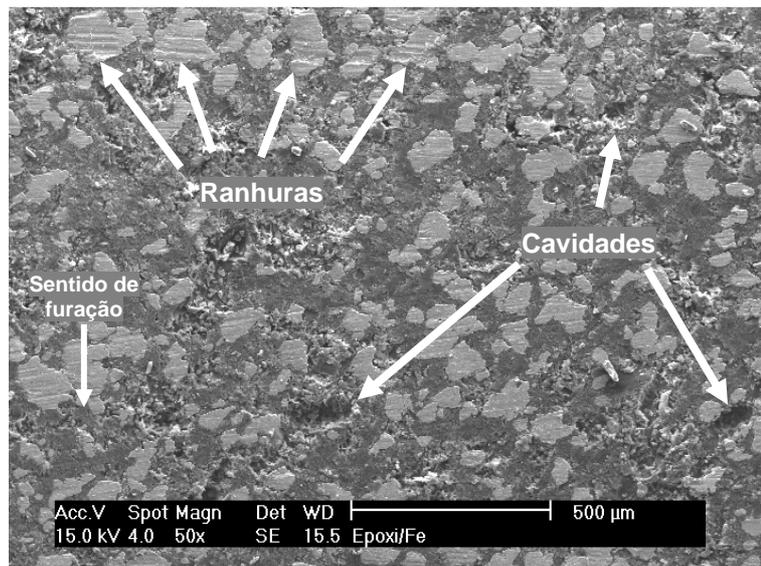


Figura 83 - Micrografia da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 50x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Na Figura 84, o que fica mais evidenciado são os riscos na carga causados pela quina e pela guia da ferramenta. Isto acontece porque a partícula metálica possui característica dúctil, copiando a textura da ferramenta. Também são visualizadas cavidades, que podem ter sido originadas pelo arrancamento de partículas de ferro.

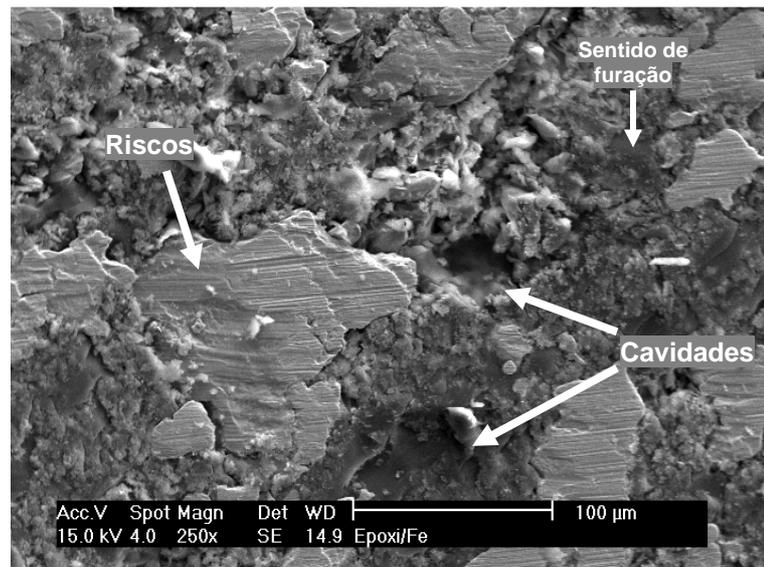


Figura 84 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

### b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

A Figura 85 mostra o perfil de rugosidade da resina epóxi com 30% de carga e velocidade de corte de 50 m/min. Este perfil é o que apresenta a menor rugosidade dentre todos os ensaios e a menor diferença entre um pico e vale ( $R_{max} = 26,9 \mu\text{m}$ ).



Figura 85 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 30% de carga metálica e  $v_c$  de 50 m/min.

### c) Análise do Cavaco

Para a usinagem da resina epóxi com 30% de carga metálica e velocidade de corte de 50 m/min (Figura 86), o formato do cavaco teve uma alteração em relação aos casos já vistos. Com o aumento da quantidade de carga metálica na matriz epóxi, os cavacos tenderam a fraturar mais cedo, o que levou à redução do seu comprimento. Segundo Westrupp (2008), com o aumento da dureza do composto, existe uma facilitação na quebra do cavaco.

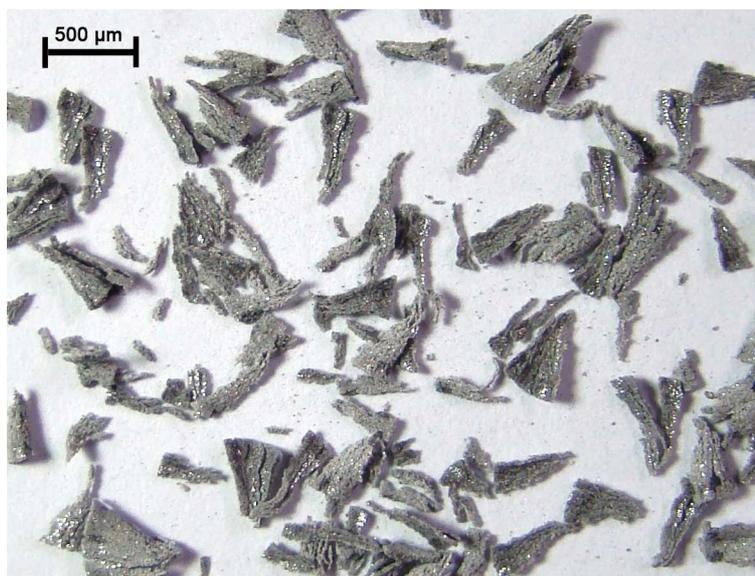


Figura 86 – Cavaco da resina com 30% de carga e  $v_c$  de 50 m/min.

#### d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo

O comportamento para esta quantidade de carga e velocidade de corte se assemelha com o material com 10% de carga de ferro e mesma velocidade de corte. Analisando as Figuras 87 e 88, pode-se notar que a parede do furo apresenta poucas cavidades e que a borda de entrada apresenta mais lascamentos que a borda de saída, assim a borda de entrada forma uma borda chanfrada.

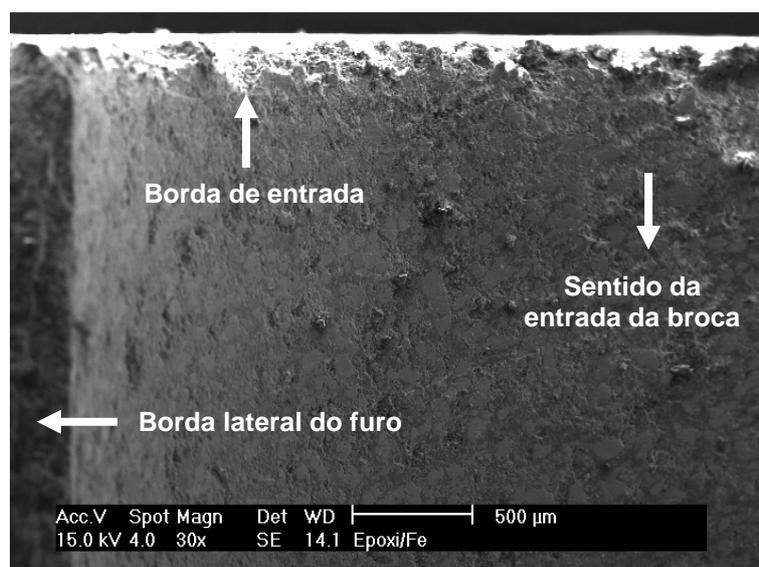


Figura 87 - Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

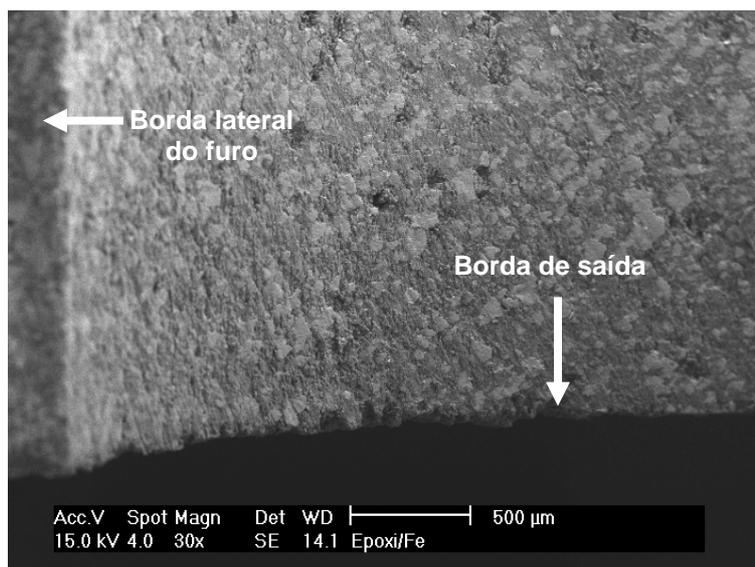


Figura 88 - Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  50 m/min.

Para o material compósito com 30% de carga metálica, foi verificada uma diminuição do chanfro na borda da entrada do furo, com largura total de 60  $\mu\text{m}$  (Figura 89a). Na saída do furo (Figura 89b), a borda manteve-se sem rebarbas, trincas ou arrancamentos.

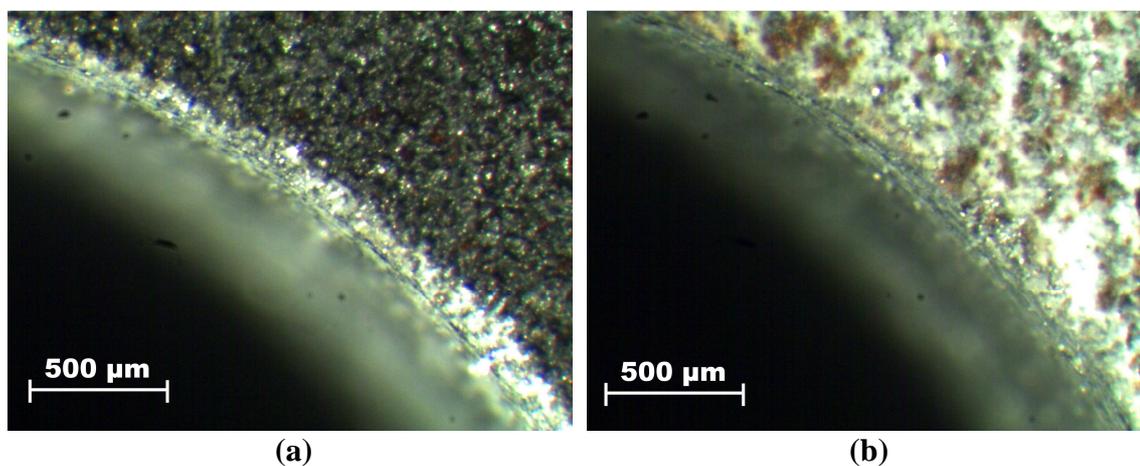


Figura 89 – Resina epóxi com 30% de carga de pó de ferro,  $v_c$  50 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

### 5.2.7 Resina epóxi com 30% de carga metálica e $v_c$ de 100 m/min

#### a) Avaliação da textura e microestrutura na parede do furo

Nas Figuras 90 e 91, observa-se a microestrutura da resina epóxi com adição de carga de pó de ferro em 30%, com uma velocidade de corte de 100 m/min. Na

Figura 90, percebe-se que houve uma redução nos riscos causados pelas guias da ferramenta nas partículas de ferro, porém ocorreu o surgimento de ranhuras. Tais ranhuras provavelmente ocorreram com a fricção de partículas arrancadas, alojadas entre a guia da broca e a parede do furo. Outro ponto a ser observado são as cavidades formadas.

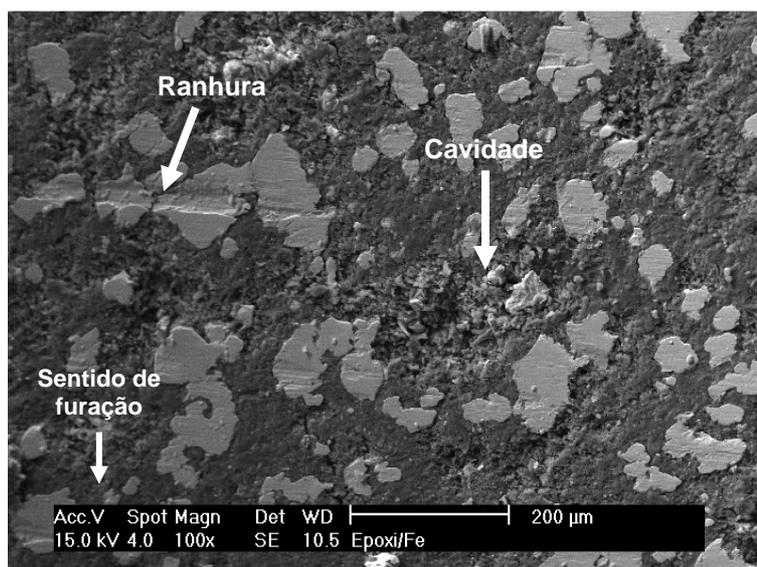


Figura 90 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 100x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

A Figura 91 exibe, no destaque, um corte com características de arrancamento frágil com microtrincas na matriz polimérica. E no mesmo destaque é possível ver uma característica de corte dúctil com escoamento plástico na partícula de ferro. Essas duas características de corte são predominantes na usinagem do referido material compósito.

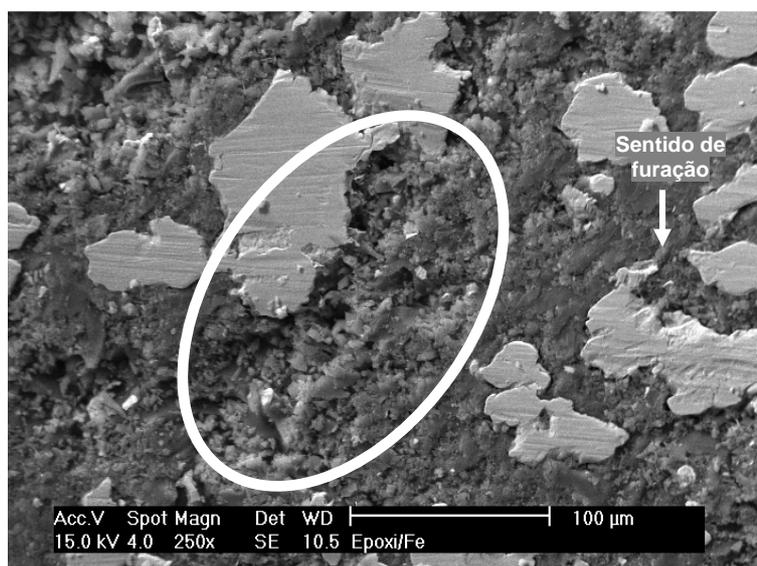


Figura 91 - Microestrutura da resina epóxi/Fe na metade do furo com aumento de 250x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

## b) Análise do perfil de rugosidade na parede do furo

O último perfil de rugosidade é exibido na Figura 92, com o ensaio e furação usando resina epóxi com 30% de carga metálica e velocidade de corte de 100 m/min. Seguindo o mesmo comportamento dos ensaios anteriores, a rugosidade para uma velocidade de corte maior, aumentou o valor do parâmetro  $R_a$ . Na figura, pode-se notar uma superfície com vários vales, porém com pouca profundidade.

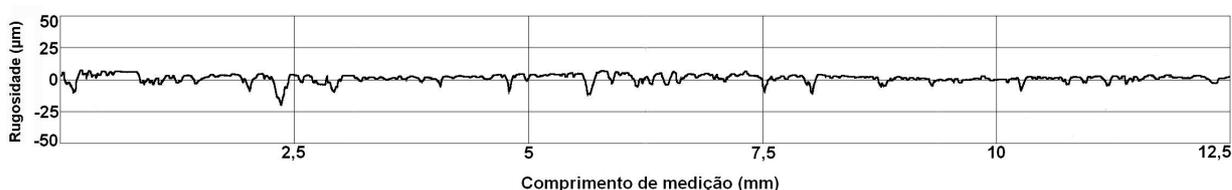


Figura 92 – Perfil de rugosidade da superfície da parede do furo, após ensaio de furação, da resina epóxi com 30% de carga metálica e  $v_c$  de 100 m/min.

De um modo geral, os perfis não apresentaram picos, mas sim, vales. Isto significa que, principalmente na resina com carga, não havia partículas soltas ou sobressalentes. É interessante ressaltar que o comprimento das amostras feitas pelo rugosímetro é relativamente grande, pois cobrem 62% do comprimento total do furo (12,5 mm). Com isso, é possível analisar melhor a parede e, conseqüentemente, obter um resultado mais preciso.

## c) Análise do Cavaco

Observando a Figura 93, que são os cavacos resultantes da usinagem da resina epóxi com 30% de carga metálica e velocidade de corte de 100 m/min, pode-se ver o surgimento de um pó metálico fino. Inicialmente, leva-se a pensar que seja o arrancamento das partículas metálicas da parede do furo, entretanto, como já visto neste trabalho no item 5.1.1, a micrografia revela que as partículas estavam bem ancoradas na parede do furo e poucos foram arrancados. Assim como, com velocidade de corte de 50 m/min, o tamanho do cavaco diminuiu em relação à resina epóxi com 10% de carga metálica. Com o

aumento da velocidade de corte para 100 m/min, o cavaco tende a fraturar mais cedo ainda, formando o pó visto na figura. Este pó metálico fino, em alguns casos, pode ser prejudicial para a máquina-ferramenta (motores e comandos), quando esta não está devidamente fechada.

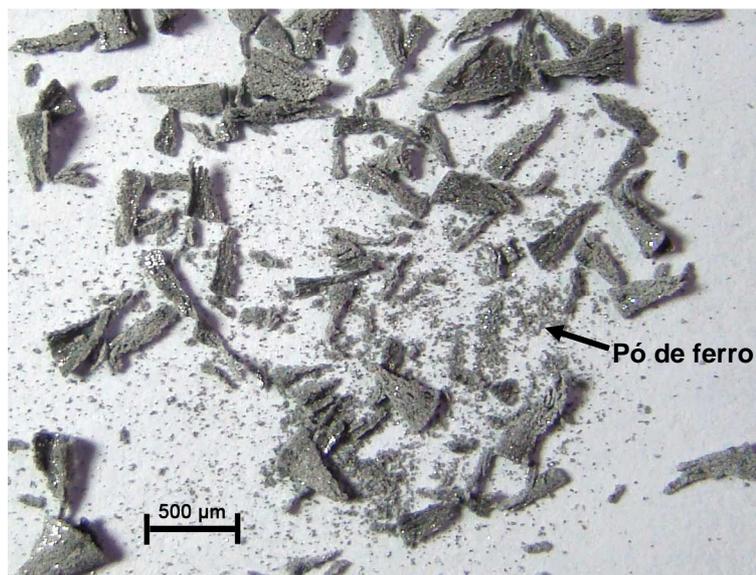


Figura 93 – Cavaco da resina com 30% de carga e  $v_c$  de 100 m/min.

Comparando os cavacos produzidos nos ensaios, constata-se que, com o aumento da quantidade de carga metálica na matriz polimérica, o comprimento dos cavacos diminuiu, quando analisado somente as resinas com carga metálica. Possivelmente isto ocorre porque os materiais compósitos com maior quantidade de carga de ferro possuem uma dureza mais elevada, vindo a facilitar a quebra do cavaco.

#### **d) Determinação dos lascamentos e rebarbas na borda do furo**

As Figuras 94 e 95 revelam que, tanto na borda de entrada, quanto na borda de saída, apresentaram chanfros. Ou seja, tiveram uma pequena quantidade de lascamentos. Mas quando se refere à parede do furo, para velocidade de corte de 100 m/min, mostrou o surgimento de um maior número de cavidades.

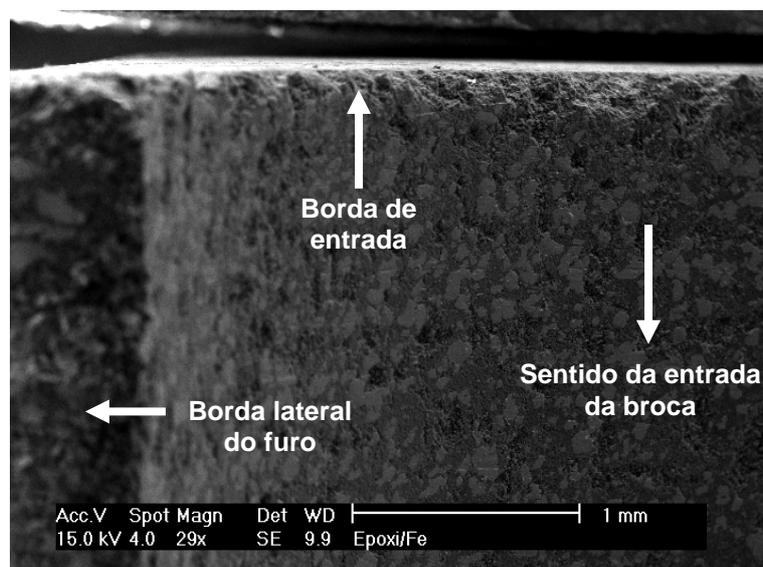


Figura 94 - Micrografia da resina epóxi/Fe na entrada do furo com aumento de 29x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

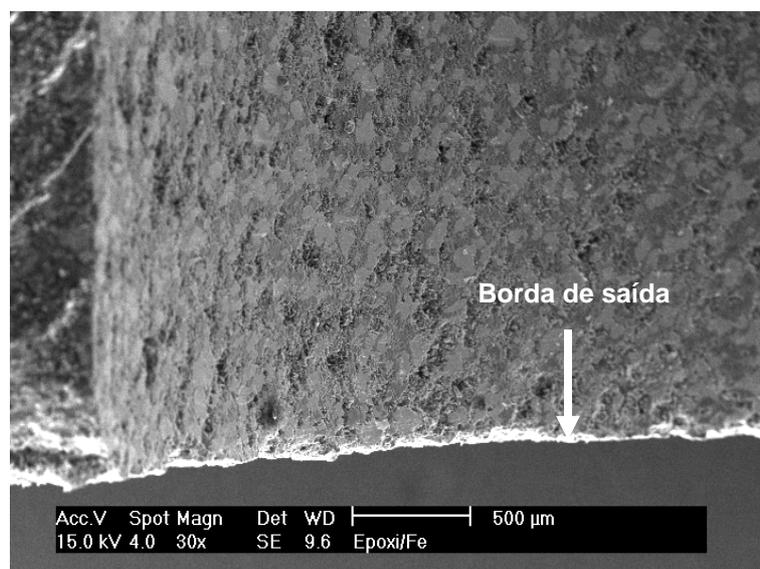


Figura 95 - Micrografia da resina epóxi/Fe na saída do furo com aumento de 30x. Resina com 30% de carga metálica e  $v_c$  100 m/min.

No material compósito com 30% de carga metálica e velocidade de corte de 100 m/min, também pode ser vista uma redução da parte chanfrada em relação ao material com 10% de carga e mesmo parâmetro de corte, ficando assim com uma borda chanfrada de 90  $\mu\text{m}$  de comprimento total (Figura 96a). Na saída do furo (Figura 96b), a qualidade da borda se manteve igualmente aos casos anteriores.

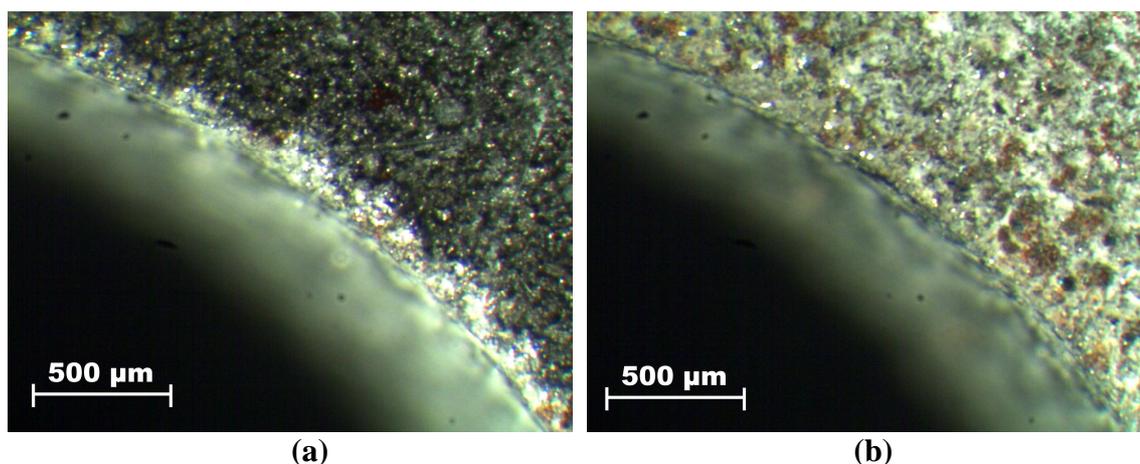


Figura 96 – Resina epóxi com 30% de carga de pó de ferro,  $v_c$  100 m/min.  
(a) entrada do furo, (b) saída do furo.

Com a adição da carga metálica, alterou-se as propriedades da resina epóxi, tornando-a menos frágil. Assim, a quantidade de lascamentos na borda do furo foi reduzida gradativamente. Como resultado, pode-se afirmar que quanto maior a quantidade de carga metálica presente no material compósito, menor o dano causado da borda do furo, ou seja, menor a largura do chanfro na borda do furo.

Geralmente, a concentração de lascamentos está na entrada do furo. Na saída do furo, que se esperava ter lascamentos, como encontrado em outros trabalhos, tal não ocorreu. Conforme aumentada a quantidade de carga no material compósito, houve um progresso na definição da borda do furo, isto é, uma redução no chanfro. Isto ocorre, como já visto anteriormente, pelo incremento nas qualidades mecânicas do material compósito, conseqüentemente nas propriedades de usinabilidade do material. Referindo-se às rebarbas, não foi constatada a sua formação, já que são mais frequentemente encontradas em materiais dúcteis.

Uma vez apresentados os resultados sobre a qualidade do furo, passa-se na sequência para a discussão dos resultados da análise da força de avanço e do torque que também influenciam na qualidade e usinabilidade do material.

### 5.3 Análise da força de avanço e do torque

Nesta parte do trabalho, será feita uma análise da velocidade de corte e da quantidade de carga no material compósito em relação à força de avanço e torque.

Abaixo, segue a Tabela 5 com um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de furação.

Tabela 5 – Força de avanço e torque para diferentes quantidades de carga na resina epóxi e diferentes velocidades de corte.

Quantidade de carga metálica	Força de avanço (N)	Torque (N.cm)	Velocidade de corte (m/min)
0%	50	10	50
0%	50	15	100
10%	60	50	50
10%	60	55	100
30%	62	63	50
30%	63	65	100

O primeiro caso a ser analisado tange ao material compósito sem carga de ferro e com velocidade de corte de 50 m/min. Segundo a Figura 97, a força de avanço inicia com um pico de aproximadamente 68 N e prossegue com uma queda até 50 N e, por fim, com um pequeno caimento linear até 45 N, chegando a zero com a saída da ferramenta no fim do furo.

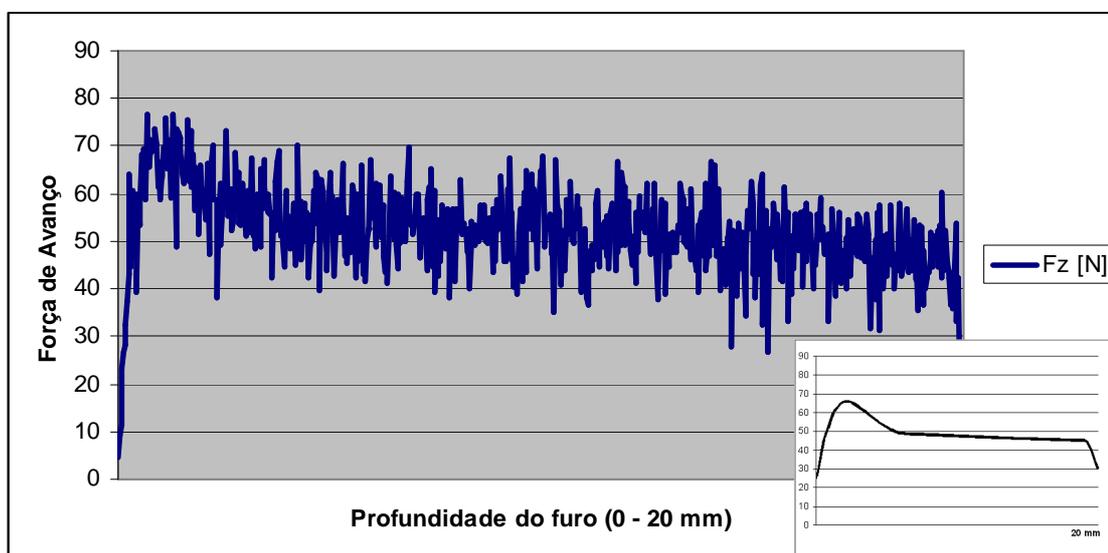


Figura 97 – Força de avanço para resina sem carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

Observando a Figura 98, o torque aumenta linearmente e de forma abrupta ao mesmo tempo em que o gume da ferramenta vai penetrando no corpo de prova. A partir de que a quina da broca penetra integralmente no material, o torque torna-se praticamente constante.

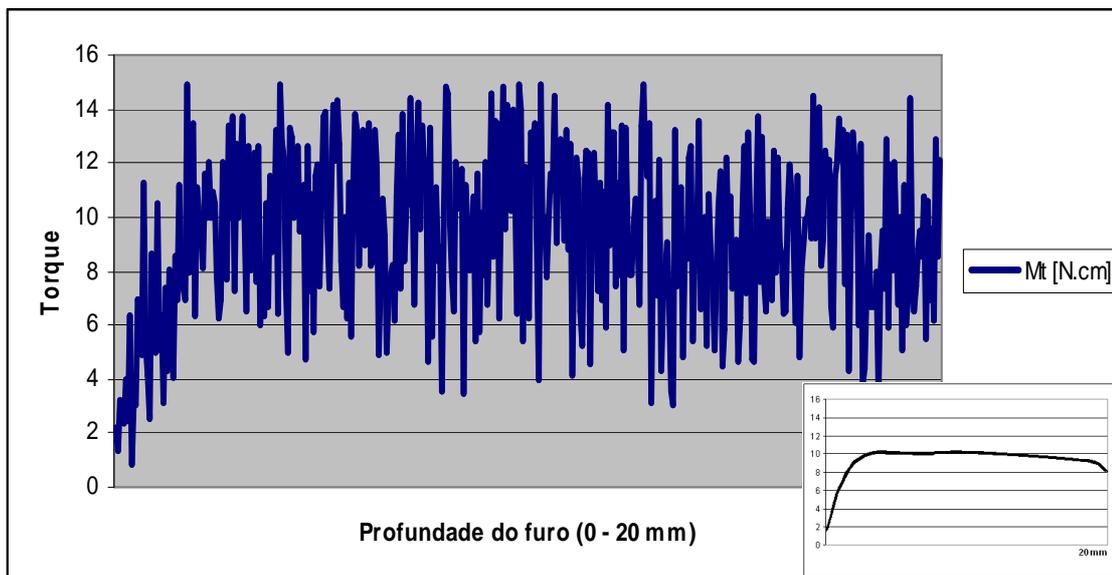


Figura 98 – Torque para resina sem carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

Na Figura 99, pode-se ver o mesmo comportamento de curva da força de avanço para o caso no qual a velocidade de corte era de 50 m/min.

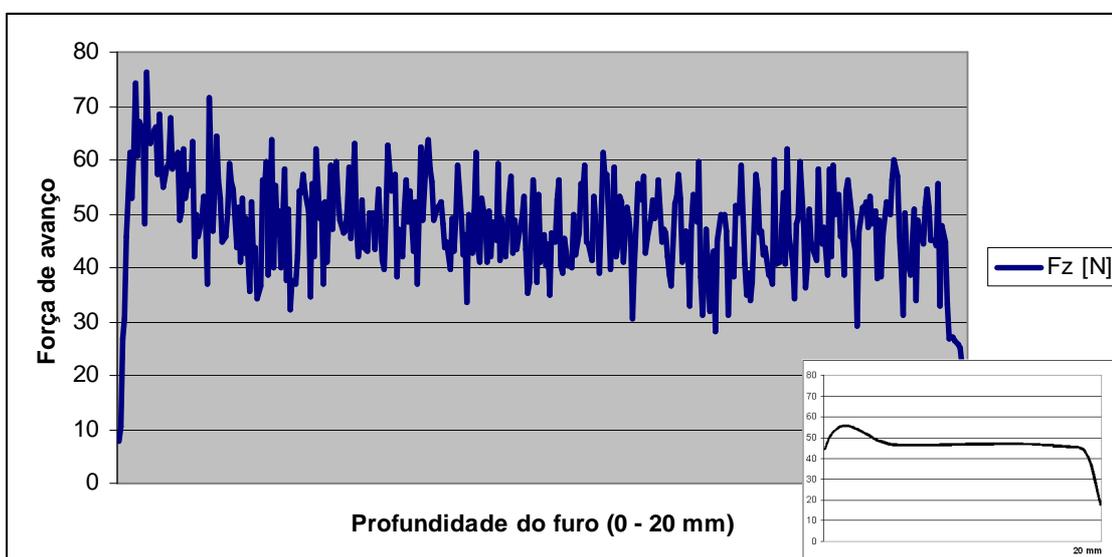


Figura 99 – Força de avanço para resina sem carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

De acordo com a Figura 100, o torque para a velocidade de corte de 100 m/min e resina sem carga apresentou um pequeno aumento em comparação à velocidade de corte de 50 m/min, talvez em virtude da vibração da máquina-ferramenta forçando as guias da broca contra a parede do furo.

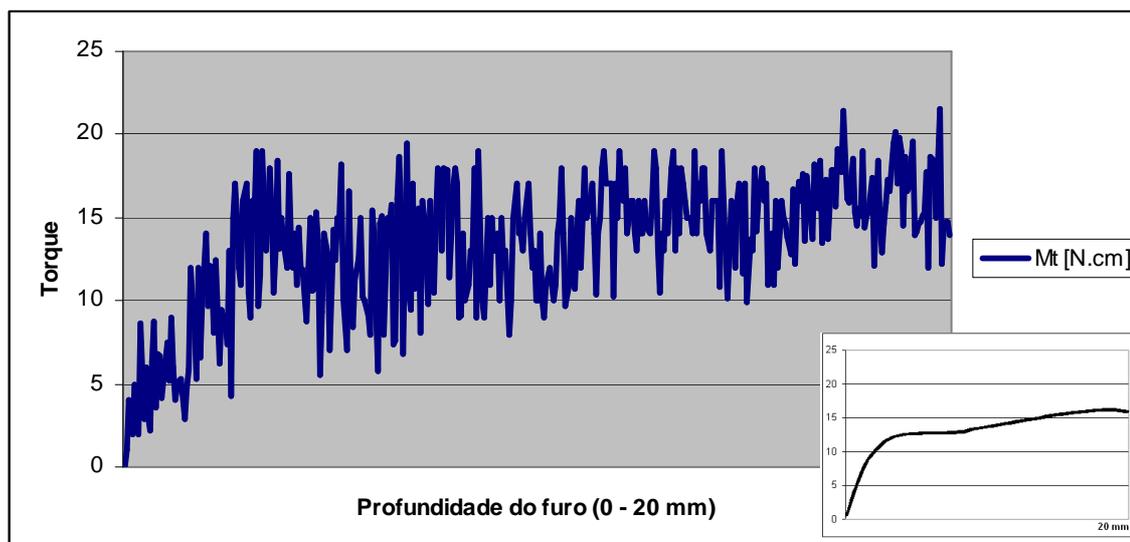


Figura 100 – Torque para resina sem carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

No caso da resina epóxi com adição de 10% de carga metálica, houve um aumento no pico de força inicial de 68 N para 85 N, porém, para o resto da curva, muito se assemelha com a resina sem carga, como mostrado na Figura 101. Provavelmente este aumento no pico inicial é atribuído ao aumento da dureza do material compósito devido à carga metálica.

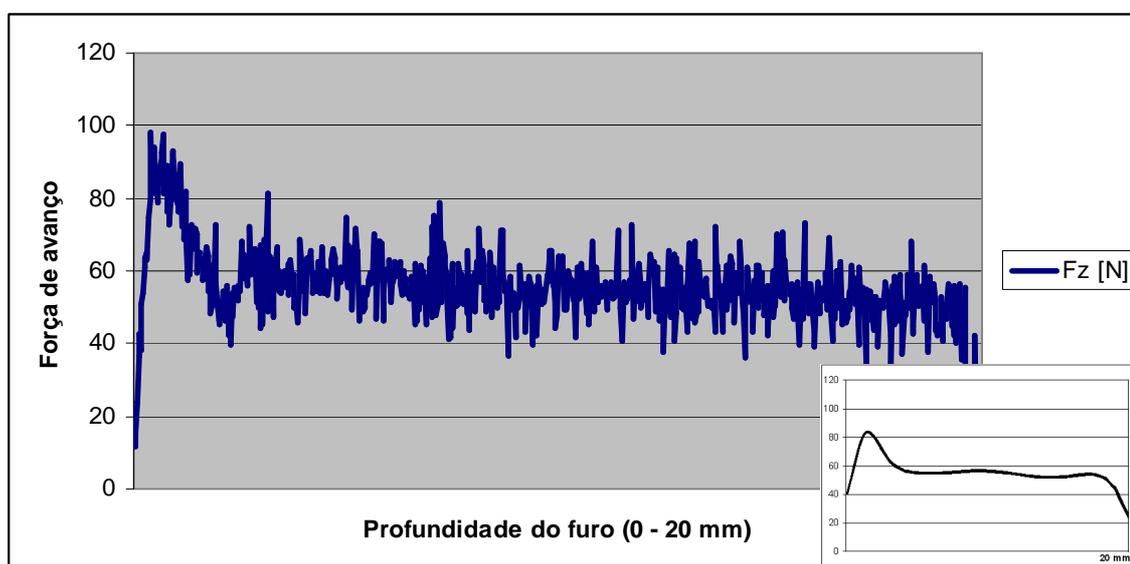


Figura 101 – Força de avanço para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

Quando adicionada carga na matriz polimérica, o comportamento do torque toma outras proporções, aumentando consideravelmente de 15 N para cerca de 50 N (Figura 102). Com a adição da carga metálica, o corte do material compósito passa a ser mais uniforme, com um comportamento menos frágil. Contribui para este

comportamento o módulo de elasticidade, que é o dobro para resina com 10% de carga em relação à resina sem carga.

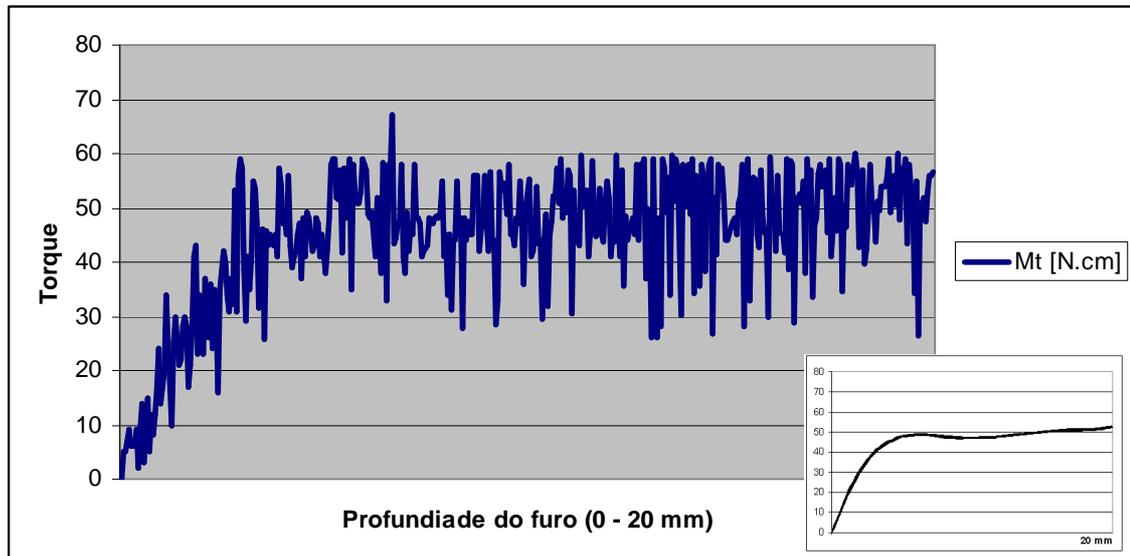


Figura 102 – Torque para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

Tratando-se da resina epóxi com 10% de carga metálica e velocidade de corte de 100 m/min, a força de avanço passa a ter um pico de 90 N (Figura 103) e estabiliza em aproximadamente 50 N. Observando a Figura 104, o torque tem um leve incremento (em torno de 5 N), em comparação à velocidade de corte de 50 m/min.

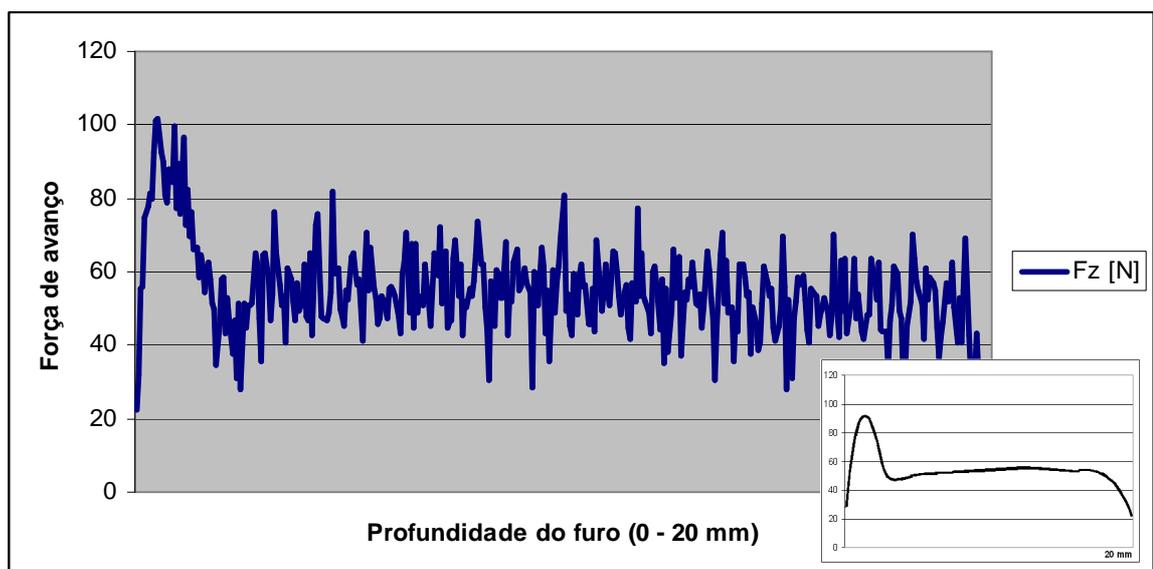


Figura 103 – Força de avanço para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

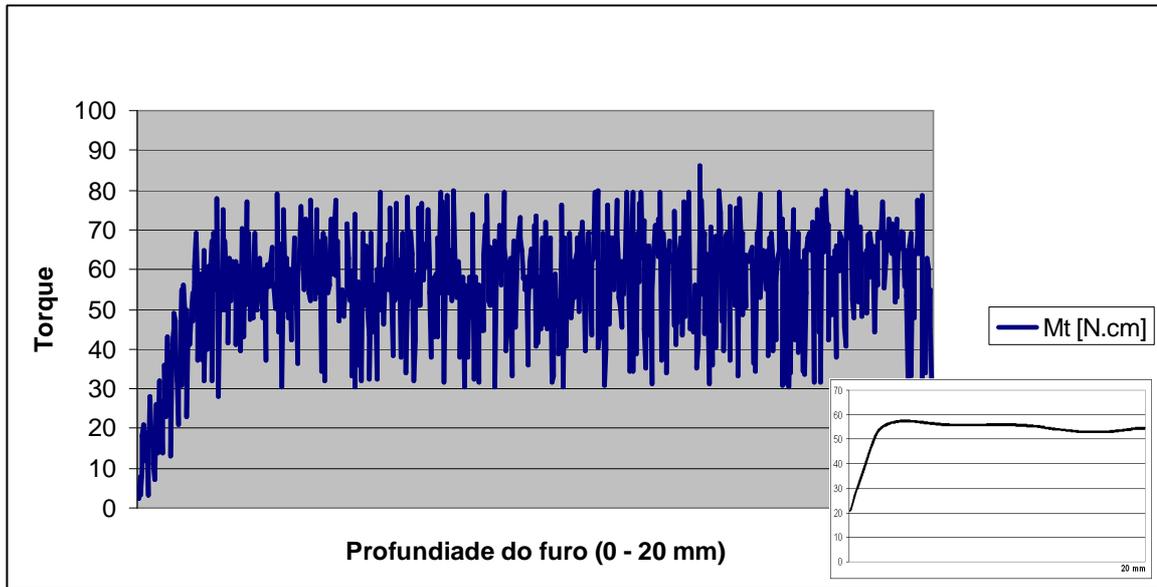


Figura 104 – Torque para resina com 10% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

Como era esperado, o pico na força de avanço para resina com 30% de carga metálica teve um incremento, chegando a 102 N (Figura 105). E o mesmo ocorre com o torque, que partiu de 60 N e finalizou com 65 N (Figura 106).

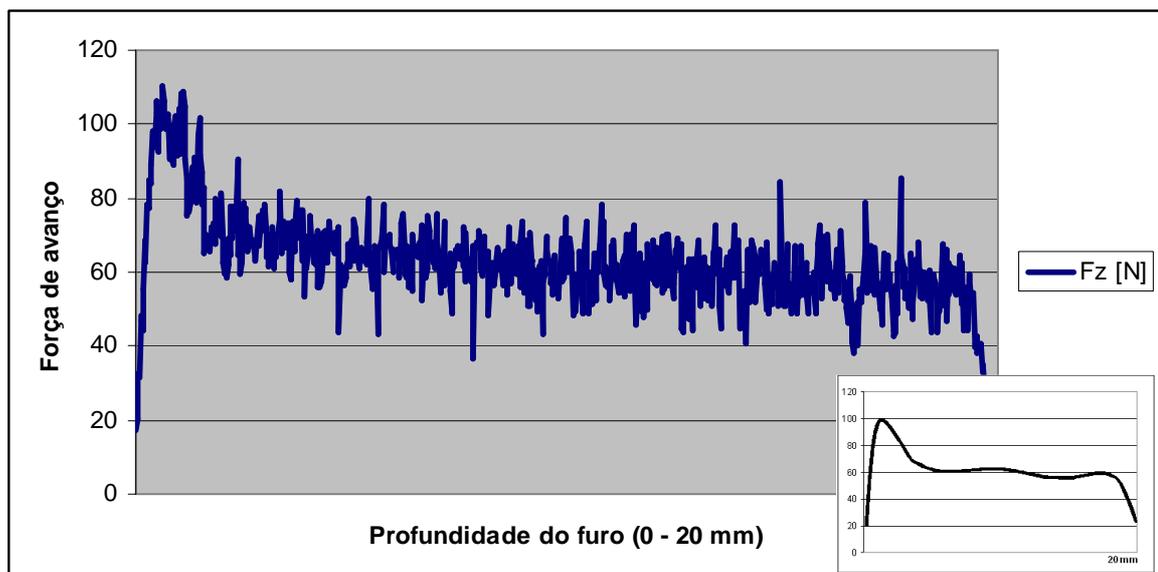


Figura 105 – Força de avanço para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

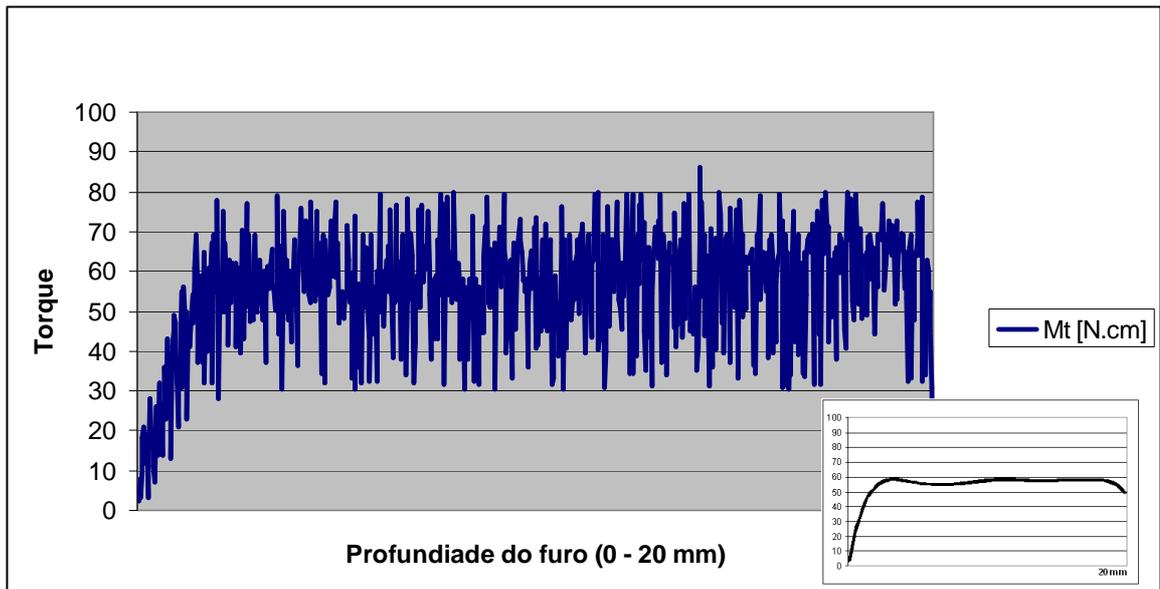


Figura 106 – Torque para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 50 m/min.

Seguindo um comportamento quase linear, em relação ao acréscimo de carga metálica e velocidade de corte com o aumento da força de avanço e torque, pode-se analisar as Figuras 107 e 108, respectivamente. Na primeira figura, mais uma vez houve um acréscimo no valor de pico, chegando a praticamente 120 N e depois estabilizando em 60 N. No caso da segunda figura, o torque se manteve praticamente o mesmo em relação ao torque com carga de 30% e velocidade de corte de 50 m/min.

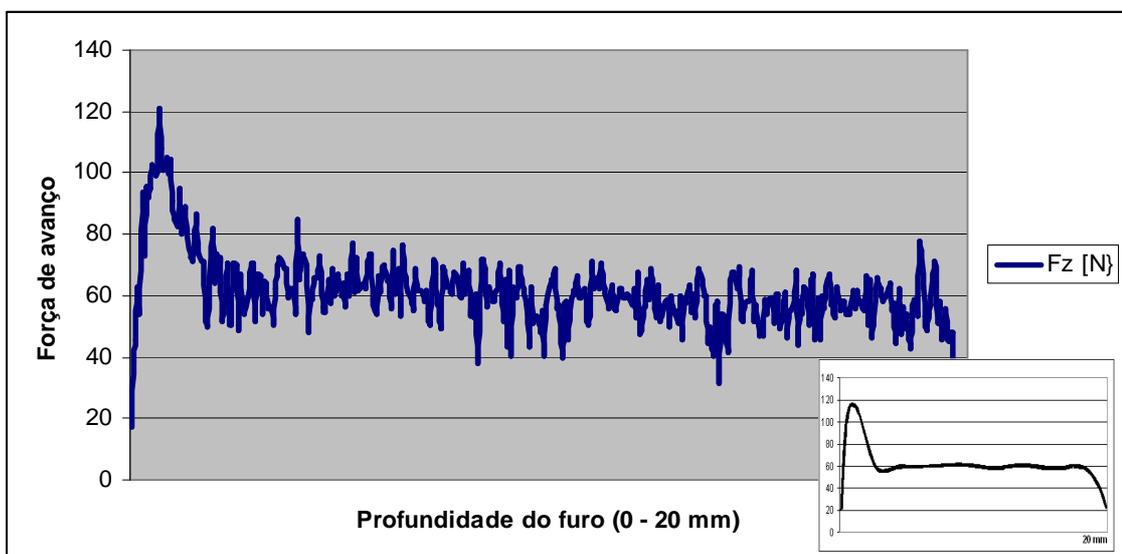


Figura 107 – Força de avanço para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

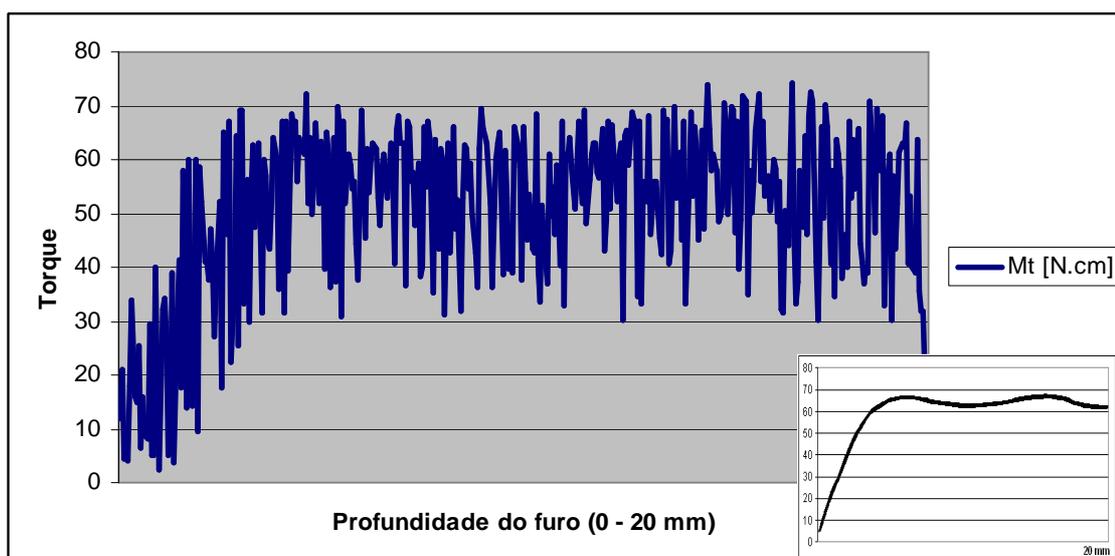


Figura 108 – Torque para resina com 30% de carga e velocidade de corte igual a 100 m/min.

De uma forma geral, as figuras indicam que existe um pico na força de avanço até a entrada total da broca e, em seguida, uma pequena queda gradual na força de avanço durante a entrada total da broca (após o valor de pico), talvez em decorrência do amolecimento da matriz pelo calor gerado no processo de furação. Nota-se que a força de avanço aumentou com o aumento da quantidade de carga do compósito. Este comportamento foi devido ao aumento das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, à resistência ao corte com o aumento da quantidade de pó de ferro. Tratando-se do torque, verifica-se que este possui um comportamento semelhante em todas as amostras, variando somente na parte quantitativa. O comportamento inicia-se com a entrada do gume da broca aumentando o torque linearmente até chegar na quina da ferramenta, a partir daí, segue aumentando modestamente até a saída da ferramenta pelo furo. Tal comportamento se dá em função do atrito das guias da broca à parede do furo somado com a força de corte. Por este motivo, quanto maior a profundidade do furo, maior o atrito e, por conseqüência, maior o torque solicitado.

#### 5.4 Avaliação do desgaste das ferramentas

Após a avaliação das brocas com microscópio, não foi verificado nenhum desgaste ou marcas nas ferramentas que usinaram somente resina epóxi sem carga metálica.

Nas brocas que usinaram resina epóxi com carga metálica, que é propriamente o material composto, não houve desgastes, mas sim uma leve marca no flanco, tipo polimento, como pode ser percebida na Figura 109. Cada broca fez 60 furos, tanto as de metal-duro quanto as de aço-rápido, totalizando para cada broca 1200 mm de comprimento usinado.



Figura 109 – Marca nos flancos da broca de metal duro, na usinagem de resina epóxi com carga metálica.

A broca de aço-rápido, que foi ensaiada somente com resina epóxi sem carga, também não apresentou desgaste ou marcas nos flancos.

Vale lembrar que o presente trabalho não busca encontrar o fim de vida da ferramenta, visto que, o não surgimento do desgaste  $V_B$  deve-se a alta dureza do material da ferramenta (metal-duro) usada nos ensaios e à baixa dureza do composto polimérico.

Por fim, as marcas no flanco das brocas que usinaram o material composto mostram que este possui maior abrasividade em relação à resina epóxi pura, o que já era esperado.

## 5.5 Usinabilidade

Como já é bem conhecido, a usinabilidade é uma propriedade que indica a capacidade dos materiais se deixarem usinar com maior ou menor nível de dificuldades. O conhecimento desta característica dos materiais é importante por

ocasião da escolha dos processos de usinagem, seleção das ferramentas de corte e definição dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte, avanço e profundidade.

A qualidade da superfície, a força de corte, a vida da ferramenta, a formação de cavacos e a potência consumida são os fatores que podem ser utilizados para realizar a avaliação dessa propriedade.

A usinagem de materiais compósitos com uma matriz polimérica, normalmente não exige grandes forças e potências para realizar a usinagem, isto porque, tais materiais não possuem grande dureza e resistência mecânica. Portanto, sob este ponto de vista, em princípio, tais materiais apresentam uma boa usinabilidade. Entretanto, também há outros fatores relevantes a considerar na análise dessa propriedade, como será exposto a seguir.

Em grande parte das aplicações dos materiais compósitos poliméricos, buscase a qualidade da peça e de sua superfície em primeiro lugar. Assim, sob este aspecto, na presente pesquisa o material que apresentou a melhor (usinabilidade) qualidade tanto na parede quanto nas bordas do furo, foi a resina epóxi com 30% de carga metálica e velocidade de corte de 50 m/min. Para os valores de  $R_a$  e  $R_z$ , foram obtidos, respectivamente 2,6 e 21  $\mu\text{m}$ . Isso representa um resultado em média 250% melhor que a resina epóxi sem carga metálica e  $v_c$  de 100 m/min, que foi o pior caso na presente pesquisa. Assim, fica evidente a influência da carga metálica na usinabilidade do material compósito polimérico.

Entretanto, no que se refere à força de avanço e o torque para a resina com 30% de carga de pó de ferro e  $v_c$  de 50 m/min, constatou-se um aumento de 24% e 630%, respectivamente, em relação à resina epóxi sem carga metálica e  $v_c$  de 50 m/min. O menor aumento na força de avanço deve-se ao gume transversal reduzido da broca. Referente ao aumento do torque aponta-se para o aumento da dureza do compósito com o acréscimo da carga metálica, exigindo maior força de corte para realizar o trabalho.

Quanto à vida da ferramenta, o objetivo maior deste trabalho era buscar a melhor qualidade na usinagem dos furos, assim, as brocas não foram ensaiadas exaustivamente até o desgaste máximo do flanco e ou da face. Porém, foi perceptível que a resina com carga metálica possui certa abrasividade, chegando a fazer uma marca muito pequena no flanco da broca, com características de um polimento mais acentuado. Para que este fator desgaste da broca possa ser

utilizado como critério de usinabilidade é necessário realizar mais experimentos e observações em futuros trabalhos.

Por sua vez, sob o ponto de vista dos cavacos estes apresentaram uma forma diferenciada para cada quantidade de carga de pó de ferro adicionada à resina epóxi. No caso da resina epóxi sem carga, os cavacos eram arrancados, chegando a formar grãos (partículas) de resina, o que revela uma matriz muito frágil. Para a resina epóxi com 10% de carga, os cavacos aumentaram seu comprimento e a forma em vírgula, fato este atribuído ao aumento da ductilidade do material compósito. Aumentando a carga metálica para 30% na resina epóxi, os cavacos tenderam a reduzir seu tamanho em relação à resina epóxi com 10% de carga metálica. Com  $v_c$  de 100 m/min, houve uma formação de um pó metálico fino. Isso pode acontecer porque com o aumento da velocidade de corte, os cavacos tendem a fraturar mais cedo.

## 6 CONCLUSÕES

Na grande maioria dos processos de usinagem de materiais metálicos, a mudança dos parâmetros de usinagem age diretamente nas variáveis de saída desses processos. No caso dos materiais compósitos, não é diferente, e os resultados dessa variação, juntamente com a variação da composição do material, serão apresentados a seguir em cinco grupos de conclusões particularizadas em consonância com os objetivos estabelecidos no início da pesquisa.

### Referente à avaliação da microestrutura dos distintos compósitos:

- Em todos os corpos do material compósito, as partículas da carga de pó de ferro estavam bem distribuídas e não foram constatadas bolhas (vazios) na microestrutura. Isto indica que o método de preparo e o vazamento para confecção dos corpos de prova foi adequado. Deve-se salientar da importância do cuidado com a inserção da carga de pó de ferro de modo que este seja uniformemente distribuído em todo corpo de prova.
- As partículas da carga metálica ficaram bem ancoradas na matriz, o que levou à pequena quantidade de arrancamentos e favoreceu a qualidade das superfícies usinadas.
- Duas características são marcantes na usinagem deste material compósito: uma com formação de microtrincas e arrancamento frágil na matriz polimérica e no outro caso é possível ver um corte com características de material dúctil, com escoamento plástico na partícula de ferro.
- Na usinagem da resina epóxi sem carga e velocidade de corte de 50 m/min houve o surgimento de cavidades na superfície usinada, resultantes da remoção frágil do material. Com uma velocidade de corte maior, surgiram menos cavidades, porém, como o corte se dá por um combinado entre microtrincas e arrancamento frágil, há a formação de uma superfície com aspecto fragmentado em determinadas regiões.
- Quando o furo é usinado com velocidade de corte de 100 m/min, os riscos nas partículas de ferro provenientes da textura das guias e quinas da broca, possuem uma profundidade e quantidade menor em relação à  $v_c$  de 50 m/min.

**Referente à rugosidade na superfície dos furos:**

- Na usinagem dos furos com velocidade de corte de 100 m/min, houve uma redução na quantidade de ranhuras na parede do furo, que provavelmente ocorrem com a fricção de partículas arrancadas, alojadas entre a guia da broca e a parede do furo. Porém, verifica-se que tais ranhuras possuem uma profundidade maior que as encontradas nos furos usinados com velocidade de corte de 50 m/min. Esse é um dos motivos que elevam os valores  $R_a$  e de  $R_z$  para velocidade de corte de 100 m/min.
- O aumento da quantidade de carga provoca uma redução nos valores de  $R_z$ . Isto ocorre devido à melhora da condutividade térmica do material compósito, pois o acúmulo de calor ao redor do gume destrói a estabilidade da matriz polimérica, produzindo uma superfície crespada e rugosa.

**Referente à análise da força de avanço e torque:**

- A força de avanço ou axial possui um comportamento similar em todas as situações estudadas. Inicia com um pico, que indica a ponta da broca iniciando o contato com o corpo de prova e logo que esta penetra integralmente no material ocorre a estabilização da força, seguida de uma pequena redução até o final do furo.
- O torque, por sua vez, também possui um comportamento semelhante em todos os casos. Assim que a ponta da broca toca no material, a curva do torque aumenta linearmente de forma abrupta, tal como o gume principal vai penetrando no corpo de prova. Quando a quina da broca penetra no material, a partir daí, torna-se praticamente constante. Na medida em que a broca vai penetrando no furo aumenta o atrito das guias da ferramenta com a parede do furo e por consequência o torque necessário.
- A usinagem da resina epóxi sem adição de carga de pó de ferro apresentou a força de avanço comparável à resina com carga, entretanto, o valor do torque é bastante inferior para a resina sem carga metálica. Isto ocorre por causa do gume transversal reduzido, que age diretamente na força de avanço.

- Como já era de se esperar, o aumento da quantidade de carga influencia diretamente nos valores da força de avanço e torque, de modo que quanto maior a quantidade de carga de pó de ferro, maiores as forças envolvidas no processo de furação, esta relação é conhecida até com 30% de carga metálica.

#### **Referente à usinabilidade:**

- Analisando os cavacos resultantes da usinagem, pode-se afirmar que o processo de formação se dá por fratura frágil. Isto porque os materiais poliméricos termofixos possuem menos capacidade de deformação plástica. Desta forma, os cavacos tendem a fraturar mais cedo.
- A usinagem da resina epóxi sem carga forma cavacos curtos e em grãos, e quanto maior a velocidade de corte, maior o tamanho dos grãos arrancados.
- No caso da resina epóxi com 30% de carga, o cavaco teve uma redução no seu comprimento, provavelmente isso ocorreu porque a maior quantidade de carga no compósito aumenta a dureza e facilitando a quebra do cavaco. Com uma velocidade de corte de 100 m/min, surgiu um pó metálico fino. Isto acontece pela tendência do cavaco fraturar mais cedo, formando um pó metálico. Provavelmente, este pó metálico se aloja entre a guia da ferramenta e a parede do furo, formando riscos profundos nas partículas metálicas.
- Os valores da força de avanço e do torque são relativamente baixos comparados aos metais (ferro e aço), por isso pode-se dizer que o material compósito estudado possui uma boa usinabilidade no critério força.
- Considerando que o maior objetivo é a qualidade dos furos usinados, o desgaste da ferramenta não foi evidenciado neste trabalho para se obter um critério de usinabilidade, pois as brocas não foram ensaiadas até o fim-de-vida. Porém a resina epóxi com carga metálica possui uma abrasividade que deixou uma leve marca nos flancos da ferramenta.
- Quando o propósito dos furos for para moldes de injeção de polímeros e para blindagem eletromagnética de equipamentos, a qualidade da superfície e das bordas de entrada e de saída do furo pode ser considerada muito boa, principalmente com  $v_c$  de 50 m/min e resina epóxi com 30% de carga

metálica. Para resina epóxi sem carga metálica não é aconselhável usar as velocidades de corte e de avanço aplicadas no presente trabalho. Novos experimentos devem ser realizados buscando parâmetros de corte mais apropriados para resina sem carga metálica.

### **Referente à Qualidade dos Furos: lascamentos e rebarbas:**

- Os lascamentos ocorreram na borda de entrada do furo. Nos trabalhos já realizados com outros materiais compósitos apresentaram lascamentos na borda de saída, possivelmente isto ocorreu pelo uso de fibras como carga. Salvo com a resina sem carga, que na saída do furo apresentou microtrincas na borda.
- Para quantidades maiores de carga metálica empregada na matriz polimérica, menor o tamanho dos lascamentos ocorridos nas bordas dos furos.
- Não é comum usinar a resina em estado natural, pois a carga em conjunto com a matriz, forma o material compósito. Desta forma, pode-se usar os ensaios sem carga, somente como comparação, visto o grande número de lascamentos.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Até o momento as pesquisas realizadas sobre materiais compósitos poliméricos com cargas metálicas são recentes e em número reduzido. Este é um material que possui muitas aplicações em diversas áreas, como já visto anteriormente.

Seguem abaixo algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão ser realizados:

- Fazer um estudo com velocidades de corte mais elevadas;
- Pesquisar os efeitos de diferentes geometrias de brocas no material;
- Estudar a usinabilidade de carga metálica em formato de fibras, para verificar se ocorrem lascamentos na saída do furo;
- Avaliar o desgaste e encontrar o fim de vida da ferramenta.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABRÃO, A. M., et al., **Drilling of fiber reinforced plastics: A review**. Journal of Materials Processing Technology, v. 186, p. 1-7, 2007.
- ALVAREZ R. J. F., **Avaliação da integridade da superfície no torneamento de um ferro fundido nodular com carboneto**. Dissertação Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. 2006, 138p.
- ANDRADE, C. L. F., **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro, com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- ARAÚJO R. A. B., ABRÃO A. M., FARIA, P. E., **Influência dos Parâmetros de Corte sobre a Rugosidade na Furação de um Compósito Polimérico**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Minas Gerais, 2005
- BET, L., **Estudo da Medição da Textura de Superfícies com Sondas Mecânicas e com Sondas Ópticas Tipo Seguidor**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- CASTILHO, W. J. G., **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina –UFSC.
- CAVALER, L. C. C., **Fresamento Periférico do Aço AISI-SAE D6 Temperado e Revenido Utilizando Fresa de Metal-Duro**. 2003. 95 p. (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CHAMBERS A., BISHOP G., **The drilling of carbon fibre polymer matrix composites**, Process. Manuf. 3 (1995) 565–572.
- CHUNG, S. I., IM, Y. G., JEONG, H. D., NAKAGAWA, T., **The Effects of metal filler on the characteristics of casting resin for semi-metallic soft tools**. Journal of Materials Processing Technology, 134, p. 26-34, 2003.
- CIMM – **Centro de Informação Metal Mecânica**. <<http://www.cimm.com.br>> Acesso em: Julho de 2008.
- DAGNALL, H. M. A., **Exploring Surface Texture**. England. Rank Taylor Hobson Limited. 1986. 178 p.
- DAVIM J.P., REIS P., ANTÔNIO C.C., **Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP), manufactured by hand lay-up**, Compos. Sci. Technol. 64 (2) (2004) 289–297.
- DINIZ, A. E., **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo, Art. Líber Editora, 2000, 256 p.

DROZDA, T. J.; WICK, C., **Tool and manufacturing engineers handbook – Machining**, n. 4. v.1. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1983. p.1.1-1.66, p. 10.1-10.76.

DURÃO, L. M. P. et al, **Estudo da Furação de Laminados Carbono/Epóxico com Diferentes Brocas**. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal – 2006.

DURÃO L. M. P., MARQUES A. T., MAGALHÃES A. G., BAPTISTA A. M., **Mecanizado de Materiales Compuestos de Matriz de PRFV**. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2006.

ENDO M., HAYASHI T., KIM Y. A., TERRONES M., DRESSELHAUS M., **Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century**. The Royal Society, 10.1098/rsta.2004.1437, Published online 13 August 2004.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenharia** – 2005. Disponível em: <[http://www.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula11\\_2005%201p.pdf](http://www.poli.usp.br/d/pmt2100/Aula11_2005%201p.pdf)>. Acesso em: 18 de outubro de 2007.

FERNANDES M., COOK C., **Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 70–75

FERRARESI, D., **Usinagem dos metais**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais. 6. ed., 1972.

GARCIA J. P., J.D.C., **Ferramental Rápido – Uma Nova Tecnologia no desenvolvimento de Produtos**. COBEF 2001 Proceedings, 2001.

GATTI M. C. A., et al., **Análise térmica do laminado PEEK/carbono submetido a diferentes rotas de processamento**, Revista Matéria, v. 11, n. 3, pp. 332 – 339, 2006.

GOYANES, S., RUBIOLLO, G., MARZOCCAC A., SALGUEIROD, W., SOMOZAD A., CONSOLATIF, G., MONDRAGONG, I., **Yield and internal stresses in aluminum filled epoxy resin. A compression test and positron annihilation analysis**. Polymer, 44, pp, 3193-3199, 2003.

JESUS, M. S., **Desenvolvimento de um Compósito Polímero-Metal à Base de Resina Epóxi para Aplicações em Moldes Rápidos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F., **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 5. Auflage. Aachen, 1997. 471 p

KRATOCHVIL, R., **Fresamento de Acabamento em Altas Velocidades de Corte para Eletrodos de Grafita Industrial** 2004. 119p. (Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KULKARNI, S. M., et al., **Machining of Fiber-reinforced Thermoplastics: Influence of Feed and Drill Size on Thrust Force and Torque during Drilling**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 24, nº 12/2005.

LACHAUD F., PIQUET R., COLLOMBET F., SURCIN L., **Drilling of composite structures**, Compos. Struct. 52 (3–4) (2001) 511–516.

LANGELLA A., NELE L., MAIO A., **A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials**, Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf. 36 (1) (2005) 83–93.

LAXMINARAYANA, K., JALILI, N. , **Functional Nanotube-based Textiles: Pathway to Next Generation Fabrics with Enhanced Sensing Capabilities**. Textile Research Journal, 2005.

LIN S.C., CHEN I.K., **Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed**, Wear 194 (1–2) (1996) 156–162.

MACEDO, S. E. M. **Análise de forças no fresamento de topo convencional e com altas velocidades de corte**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MANGONI C., **Determinação Teórico-Experimental de Forças e Análise Dinâmica por Elementos Finitos no Fresamento de Peças com Baixa Rigidez**. 2004. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

MAZUMDAR, S. K., **Composites Manufacturing : Materials, Product, and Process Engineering**. CRC Press LCC. Florida, 2002, 396 p.

MOCELLIN, F., **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

MOHAN N. S., RAMACAHNDRA A., KULKARNI S. M., **Machining of Fiber-Reinforced Thermoplastics: Influence of Feed and Drill Size on Thrust Force and Torque during Drilling**. Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, Vol. 24, No. 12/2005

MOHAN, N. S. et al, **Delamination Analysis in Drilling Processes of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials**. Journal of Materials Processing Technology, v.186, p.265-271, 2007.

MOREIRA, L., **Medição de Temperatura Usando-se Termopar**. Cerâmica Industrial, 7 (5) Setembro/Outubro, 2002

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)**, Compos. Struct. 38 (1–4) (1997) 343–350.

PALANIKUMAR, K., DAVIM, J. P., **Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools**. Journal of Materials Processing Technology 2008, 9 p.

PALANIKUMAR, K., **Cutting Parameters Optimization for Surface Roughness in Machining of GFRP Composites using Taguchi's Method**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006; 25; 1739.

PIQUET, R., FERRET, B., LACHAUD, F., SWIDER, P., **Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills**. Composites, Part A 2000;31:1107-15.

PLASTICSMAG., **Machining of Engineering Plastics**. The Plastics Distributor and Fabricator - Your Industry Magazine. Disponível em: <<http://www.plasticsmag.com/features.asp?fIssue=May/Jun-06>>. Acesso em: 18 de outubro de 2007.

RAHMAN, M., et al., **Machinability study of carbon fiber Reinforced composite**. Journal of Material Processing Technology, vol. 89-90, p.292-297, 1999.

SALMORIA G. V., LEITE J. L., SOUZA C. F. M., AHRENS C. H., **Influence of carbon nanotubes on the mechanical properties of casting epoxy resin for rapid tooling**. 9º Congresso Brasileiro de Polímeros.

SANDVIK COROMANT, **Usinar bons furos com rapidez é difícil? Não. Isso é mito**. Revista: O Mundo da Usinagem – Sandvik Coromant do Brasil - 3. 2000. pag. 7.

SANDVIK-COROMANT., **Tools for Die and Mold Makers**. Estocolmo, 2000. 258 p.

SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L., **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – parte 1**. Florianópolis, 2002. Apostila, 352p, Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHROETER, R.B. et al., **Estudo comparativo de desempenho de brocas DIN 338**. Florianópolis, 1999. 32 p.

SILAEX, **Epóxi**. Disponível em: <<http://www.silaex.com.br/epoxi.htm>>. Acesso em: 09 de outubro de 2007.

SONBATY, E., KHASHABA, U.A., MACHLY, T., **Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites**. Composite Structures, 63, p. 329-338, 2004.

SOTCKTON S. L., **Engineering and Design Composite Materials or Civil Engineering Structures**. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000, 1997, 66 p.

SOUZA, A. J., **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

STANDARD TWIST DRILL TERMINOLOGY, **Technical Bulletin #106**. Disponível em: <[http://www.castnylon.com/pdf/Machining\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www.castnylon.com/pdf/Machining_Data_Sheet.pdf)>. Acesso em: 18 de outubro de 2007.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte I**. 5ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 2001, 249 p.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de corte II**. 3ª Edição, Florianópolis: editora da UFSC, 2005, 314 p.

SULONG A. B., PARK J., LEE N., GOAK J., **Wear Behavior of Functionalized Multi-walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Matrix Composites**. Journal of Composite Materials 2006; 40; 1947 originally published online Jan 9, 2006;

THOSTENSON E. T., REN Z., CHOU T., **Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review**. Composites Science and Technology 61 (2001) 1899–1912.

VALLE, P. D., **Avaliação da influência da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de fresamento de topo reto**. 2001. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

VILLARROEL, J. C. C., **Análise Comparativa entre a Furação com Brocas para Furos Curtos de Insertos Reversíveis e Brocas Helicoidais**. 1991. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991.

VICK. **USINAGEM**. Disponível em: <<http://www.vick.com.br/vick/Produtos/nylon/nylon60.htm>>. Acesso em: 18 de outubro de 2007.

ZEILMANN, R. P., **Furação da Liga de Titânio Ti6Al4V com Mínimas Quantidades de Fluido de Corte**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

ZHOU Y. X., WU P. X., CHENG Z-Y., INGRAM J, JEELANI S., **Improvement in electrical, thermal and mechanical properties of epoxy by filling carbon nanotube**. eXPRESS Polymer Letters Vol.2, No.1 (2008) p. 40–48

ZHOU Y., PERVIN F., LEWIS L., JEELANI S., **Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes**. Materials Science and Engineering A 475 (2008) p. 157–165

WESTRUPP F. L., **Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando a sua utilização em moldes de injeção**. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

WYPYCH G., **Handbook of Fillers**. Second edition ed. 2000: ChemTec Publishing. Pág. 186-187.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.