

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2010

CARLOS EDUARDO FIGUEIREDO DOS SANTOS

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE
USINAGEM DO COMPÓSITO GLARE.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Ciências na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá
2010

S237e Santos, Carlos Eduardo Figueiredo dos
Estudo e caracterização do processo de usinagem do compósito GLARE / Carlos Eduardo Figueiredo dos Santos.
– Guaratinguetá : [s.n.], 2010
75 f. : il.
Bibliografia: f. 72

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Usinagem 2. Materiais compostos I. Título

CDU 621.9



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de
Guaratinguetá

"ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM
DO COMPOSITO GLARE®"

CARLOS EDUARDO FIGUEIREDO DOS SANTOS

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM CIÊNCIAS"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
UNESP-FEG

Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
INPE/SJC

Novembro de 2010

DADOS CURRICULARES

CARLOS EDUARDO FIGUEIREDO DOS SANTOS

NASCIMENTO	12.10.1976 – TAUBATÉ/SP
FILIAÇÃO	Irineu dos Santos Norma Figueiredo dos Santos
1994/1996	Curso de Técnico Técnico em Mecânica – Escola SENAI “Felix Guisard”
1998/2001	Curso de Graduação Administração de empresas - Universidade de Taubaté UNITAU

Dedico este trabalho de modo especial, à meus filhos Isabela e Gabriel ao meu enteado Arthur, incentivo e fonte de inspiração, e à minha esposa amada Maria Aparecida .

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Jesus Cristo, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

à minha esposa *Maria Aparecida Chaves dos Santos* que suportou minha ausência em muitas horas e ainda suportou todas as dificuldades de Saúde que passou no meio do processo deste Mestrado.

aos meus filhos Isabella e Gabriel e meu enteado Arthur por existirem, pois são de fundamental importância em minha vida.

aos meus pais *Irineu e Norma*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

às secretárias da pós-graduação Regina e Cristina pela dedicação e alegria no atendimento,

à Seco Tools, em particular na pessoa do Mestre Engenheiro Fabio Ricardo da Silva, pelas ferramentas fornecidas para os testes, e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes as ferramentas no estudo.

ao SENAI “Geraldo Alckmin”, Pindamonhangaba, em particular na pessoa do Prof. Paulo Sergio Torino, Diretor da escola, pela disponibilização das máquinas para a realização dos teste práticos de usinagem.

A escola SENAI “Felix Guisard”, Taubaté, agradeço a pessoa do Prof. Flavio Maximo, Coordenador da escola, pelo incentivo e pela disponibilização dos laboratórios, para a realização das imagens deste rabalho.

ao colega de trabalho, Elias Alves da Cunha, na ajuda com os estudos e ensaios laboratoriais, e ao colega Emerson Luis Junqueira, pela substituições das aulas para o termino deste trabalho.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

-SECO TOOLS– Com as doações das ferramentas para os testes no estudo.

-ESCOLA SENAI “GERALDO ALCKMIN” – Com a disponibilização do maquinário para os testes práticos.

- ESCOLA SENAI “FELIX GUIARD” – Com a disponibilização do laboratório de Metalografia para a execução dos ensaios do trabalho.

SANTOS, C. E. F. **Estudo e caracterização do processo de usinagem de compósito GLARE® 2010.** 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

Neste trabalho, foram analisados os resultados do processo de furação da chapa de GLARE®. O que motivou este estudo foi a necessidade cada vez maior para as empresas de realizar furos em materiais compósitos com brocas especiais e comerciais em quantidades cada vez mais crescentes. Outros fatores chamam a atenção em relação aos resultados obtidos a partir destas operações tais como: a qualidade das superfícies geradas na usinagem, o acabamento dos furos, geometria, deformação, tolerância dimensional e possíveis defeitos gerados. Neste estudo os testes foram realizados sem a presença de fluido refrigerante. Foram executados vários ensaios totalizando sete diferentes condições, e foi possível conseguir eliminar o defeito de delaminação, deformação, desfibramento e manter uma uniformização na usinagem dos furos. Foram identificados os melhores parâmetros de furação com broca de metal duro inteiriça comercial, para o material compósito GLARE®. A velocidade de corte ideal para o material foi de 157m/min, nesta condição foi possível manter a ferramenta com sua integridade com o mínimo de desgaste por abrasão totalizando 248 furos e a ferramenta ainda com condições de continuar a cortar normalmente.

PALAVRAS-CHAVE: Compósito, Glare, furação, delaminação, desfibramento, ovalização, adesão.

SANTOS, C. E. F. **Study and characterization of machining process of Glare composite.** 2010. 80p. Dissertation (Masters Science) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

In this work, the results of the drilling process of the GLARE® sheet were analyzed. What motivated this study it was the need every time larger for the companies of accomplishing holes in materials composites with special drills and you trade more and more in amounts growing. Other factors get the attention in relation to the results obtained starting from these such operations as: the quality of the surfaces generated in the machining, the finishing of the holes, geometry, deformation, dimensional tolerance and possible generated defects. In this study the tests were accomplished without the presence of cutting fluid. Several rehearsals were executed totaling seven different conditions, and it was possible to get to eliminate the delamination defect, deformation, disfibration and to maintain an uniformization in the holes machining. Were identified the best drilling parameters with integral cemented carbide drill from commercial trade, for the material composite GLARE®. The better cutting speed for the material was of 157m/min, in this condition it was possible to maintain the tool with its integrity with the minimum of wear for abrasion still totaling 248 holes and the tool with conditions of continuing to cut usually.

KEYWORDS: Composite, Glare, drilling, delamination, shredding, ovality, adesion.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Exemplos de materiais compósitos: (a) particulado, randômico; (b) fibras descontínuas, unidirecionais; (c) fibras descontínuas, randômicas; (d) fibras contínuas, unidirecional (adaptação).....	22
FIGURA 2 – Mapa de desempenho de vários materiais de engenharia, em termos de temperatura de operação(°C) e relação resistência/peso (adaptação).....	23
FIGURA 3 – (a) fibras longas (b) fibras curtas e “whiskers” (c) particulado.	25
FIGURA 4 – Rheocasting": (a) mistura das fibras ou partículas com o metal, seguido por (b), fundição em molde.....	27
FIGURA 5 – Fundição sob pressão: (a) inserção do pré-formado dentro da cavidade do molde; (b) adição de uma quantidade precisa de metal; (c) fechamento do molde e aplicação de pressão; (d) abertura do molde; (e) componente pronto.	28
FIGURA 6 – Infiltração da liga fundida sob pressão de gás: (a) inserção do pré-formado e fechamento do molde, (b) aplicação de vácuo, (c) aplicação de pressão de gás, mantida durante a solidificação.....	29
FIGURA 7 – Desenho esquemático do processo de infiltração por baixas pressões.....	30
FIGURA 8 – Desenho esquemático do processo “spray” para fabricação de materiais compósitos por co-deposição de matriz e reforço.....	31
FIGURA 9 – Esquema da configuração de um CHMF.....	39
FIGURA 10 – Foto do material GLARE®, vista de cima.	39
FIGURA 11 – Foto do material GLARE®, vista de lado.	39
FIGURA 12 – Morsa e mordentes de fixação do centro de usinagem CNC.	40
FIGURA 13 – Detalhes do dispositivo inicial: (a) Dispositivo inicial , com a amostra a usinar, (b) Dispositivo com a amostra montada para o teste.	41
FIGURA 14 – Detalhes do dispositivo alterado: (a) Visão geral do dispositivo, amostra e ferramenta montado no cone de fixação, (b) Fixação do dispositivo na morsa e preparação da fixação da placa.	41
FIGURA 15 – Detalhes da montagem da amostra: (a) Encaixe da amostra e (b) Preparação da placa para referenciamento.	42

FIGURA 16 – Guilhotina IMAG	43
FIGURA 17 – Centro de Usinagem CNC ROMI Discovery 760	43
FIGURA 18 – Centro de Usinagem CNC VEKER CKV1066L.....	43
FIGURA 19 – Fresa sólida de metal duro com cobertura de Diamante. 620V050R050.....	44
FIGURA 20 – Broca de metal duro SD203A-5.0-20-6R1-T.	44
FIGURA 21 – 19 Suportes de ferramentas: (a) Cone BT 40 com pinça ER32, (b) Cone BT40 de precisão com pinça D24 UP.	45
FIGURA 22 – Estereoscópio Olympus SZ-TZ	46
FIGURA 23 – Fotos dos furos executados na amostra para 1°. Ensaio: (a) furo n°1 (b) furo n° 2 (c) furo n°3 (d) furo n°17 (e) furo n°18 (f) furo n°19.	50
FIGURA 24 – Foto dos detalhes transversais dos furos; (a) furo n° 17 (b) furo n°19°	51
FIGURA 25 – Foto do detalhes laterais da fresa, (a) posição mostrando as arestas de frente, (b) mostrando as arestas restantes de lado.	51
FIGURA 26 – Foto de topo da Fresa.....	51
FIGURA 27 – Fotos dos furos executados na amostra para 2°. Ensaio: (a) furo n° 1(b) furo 2 (c) furo 16 (d) furo 17 (e) furo 18	52
FIGURA 28 – Foto do corte transversal do furo n°3.....	53
FIGURA 29 – Foto lateral da B03 (a) foto lateral e guias (b) topo com arestas de corte.	53
FIGURA 30 – Foto dos furos de cima (a) furo n° 1 (b) furo n°2 (c) furo n°3	54
FIGURA 31 – Foto do corte transversal do furo n° 3 do ensaio 3.	55
FIGURA 32 – – Fotos lateral e de topo da B02:(a) lateral mostrando as guias (b) topo mostrando a aresta de corte.	55
FIGURA 33 – Fotos os furos de cima: (a) furo n°1(b) furo n° (c) furo n°3 (d) furo n°8 (e) furo n°9 (f) furo n°10.....	56
FIGURA 34 – Fotos do detalhe transversal do furo.....	57
FIGURA 35 – Fotos da lateral e topo da B01: (a) foto lateral da broca (b) foto de topo da Broca.....	58

FIGURA 36 – Fotos dos furos de cima ensaio 5: (a) furo nº 1 (b) furo nº 2 (c) furo nº 3 (d) furo nº 16 (e) furo nº17 (f) furo nº 18	58
FIGURA 37 – Fotos dos furos em corte transversal: (a) furo nº3 (b) furo nº16	59
FIGURA 38 – Fotos da broca B04 ensaio 5: (a) posição longitudinal B04 (b) posição longitudinal com giro de 90° da B04 (c) topo da B04.....	60
FIGURA 39 – Fotos dos furos vista de cima: (a) furo nº1 (b) furo nº 2 (c) furo nº3 (d) furo nº16 (e) furo nº17 (f) furo nº18.	61
FIGURA 40 – Fotos do corte transversal dos furos: (a) furo nº 3 e furo nº16.....	62
FIGURA 41 – Fotos da broca B05: (a) foto lateral da broca mostrando os canal de saída (b) foto lateral da broca mostrando a guia (c) foto do topo mostrando as aresta de corte.	63
FIGURA 42 – Fotos do cavaco final dos furos ensaio 5 e 6: (a) parte externa do cavaco do ensaio 6 furo nº15 (b) foto interna do cavaco do ensaio 6 furo nº15 (c) foto externa do cavaco do ensaio 5 furo nº15 (d) foto interna do cavaco do ensaio 5 furo nº15.	64
FIGURA 43 – Fotos dos furos da PL02 do ensaio 7: (a) furo nº3visto por cima (b) furo nº03 vista interna (c) furo nº15 vista de cima (d) furo nº15 vista interna (e) furo nº23 vista de cima (f) furo nº23 vista interna.	65
FIGURA 44 – Fotos dos furos da PL05do ensaio 7: (a) furo nº3visto por cima (b) furo nº03 vista interna (c) furo nº15 vista de cima (d) furo nº15 vista interna (e) furo nº23 vista de cima (f) furo nº23 vista interna.	66
FIGURA 45 – Fotos dos furos da PL10do ensaio 7: (a) furo nº3visto por cima (b) furo nº03 vista interna (c) furo nº15 vista de cima (d) furo nº15 vista interna (e) furo nº23 vista de cima (f) furo nº23 vista interna.	67
FIGURA 46 – Fotos da broca B05 utilizada no ensaio 7, após usinagem de 248furos:(a) vista lateral da B05 e (b) vista topo da B05.....	68

LISTA DE TABELAS E QUADROS

QUADRO 1 – Exemplos de materiais compósitos de matriz metálica (CMM) para aplicações aeroespaciais.....	24
TABELA 1 – Tabela dos parâmetros dos testes.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	- Alumínio
B	- Broca de metal duro interiça
BT	- Tipo de Cone
C	- Carbona
CMM	- Compósito de matriz metálica
CNC	- Comando Numerico computadorizado
Cu	- Cobre
CVK	- Centro de Usinagem VEKER
D24 UP	- Tipo de pinça de Precisão
DIN	- Norma Alemãs
ER	- Tipo de Pinça
f	- Velocidade de avanço
F	- Força de atrito
F01	- Identificação da ferramenta fresa utilizada
Fe	- Ferro
G01	- Movimento Linear de avanço
GLARE	- Compósito de fibra de vidro
Gpm	- Golpes por minutos
ISO	- Sistema internacional de Normas Técnicas
Kg	- Kilograma
m	- Numero de lâminas de alumínio
Mg	- Manganês
N	- Força normal
n	- Número de lâminas de fibra de vibro
NBR	- Norma Brasileira Registrada
Ni	- Níquel
O	- Oxigênio
SD	- Sólida
SiC	- Carbetto de Silício
SP	- Estado de São Paulo
T3	- Liga de titânio
Vc	- Velocidade de corte
W	- Tungstênio
(n)	- Numero de ordem da utilização
®	- Registro
μ	- Coeficiente de atrito
μ_k	- Coeficiente de atrito dinâmico
μ_s	- Coeficiente de atrito estático

LISTA DE SÍMBOLOS

G01	Movimento linear de avanço	<i>mm/min</i>
f	Avanço	<i>mm/min</i>
Vc	Velocidade de corte	<i>m/min</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 COMPÓSITOS HÍBRIDOS	20
2.1.1 Materiais compósitos de matriz metálica	22
2.1.2 Processos de fabricação de compósitos de matriz metálica	25
2.1.2.1 Fabricação via metalurgia do pó.....	31
2.2 TRIBOLOGIA.....	32
2.2.1 Origens e conceitos	32
2.3 USINAGEM	35
2.3.1 Origens e conceitos	35
2.3.2 Desgaste da ferramenta	37
2.3.3 Usinabilidade	37
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
3.1 MATERIAL.....	39
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	40
3.3 EQUIPAMENTOS	42
3.3.1 Guilhotina	42
3.3.2 Centro de usinagem CNC	43
3.3.3 Ferramentas de corte	44
3.3.4 Esterioscópio	45
3.4 MÉTODOS	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 TESTES PRELIMINARES	49
4.2 TESTES FINAIS	57
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
5 CONCLUSÃO	70
REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO:

Nas últimas décadas, os materiais compósitos têm se revelado como um dos mais interessantes para aplicações tecnológicas. As razões da sua crescente utilização estão ligadas às suas propriedades características, tais como o seu baixo peso, a elevada resistência e a rigidez. Entre as desvantagens na sua utilização pode citar o seu elevado custo de produção e a necessidade de proteção específica dos trabalhadores, além de potenciais custos associados à sua reciclagem (Durão, *et al.*2003).

Embora o desenvolvimento destes materiais tenha sido efetuado pelas indústrias de defesa.

Esses materiais ainda possuem grande campo de aplicação nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, náutica, petroquímica, automobilística e outras, embora esses materiais possuam vasta aplicação, seus processos de manufatura não seguem a mesma tendência, apresentando alto custo de usinagem.

A usinagem de materiais compósitos surge da necessidade de redução de custo nesses processos, da obtenção de tolerâncias específicas para montagens de diversas peças de um mesmo componente. A usinagem de materiais compósitos é complexa devido à sua heterogeneidade, registrando-se diferentes comportamentos do mesmo material apenas devido à distribuição e orientação das fibras, sensibilidade ao calor e ao fato de os reforços serem extremamente abrasivos.

Os métodos mais tradicionais de usinagem embora possam ser utilizados, devem ser adaptados de forma a reduzir a geração de danos por meios térmicos ou mecânicos (Durão, *et al.*2003).

Embora as suas propriedades físicas os tornem num conjunto de materiais atrativos, os compósitos levantam problemas específicos em relação à sua usinabilidade, quando comparados com os materiais metálicos. Um dos problemas da usinagem de compósitos está relacionado com a abrasividade das fibras usadas nos reforços provocando um rápido desgaste das ferramentas e deterioração das superfícies usinadas (Abrate, 1997). Por outro lado, a usinagem

de compósitos pode provocar diversos defeitos, tais como delaminações, arrancamento de fibras, danos térmicos na matriz e outros (Wern, *et al.* 1994). Os procedimentos a serem adotados para uma usinagem eficaz de um compósito dependem, essencialmente, do tipo de reforço e menos do material da matriz (Engineered Materials Handbook, vol 1, 1987). Quando se analisam materiais compósitos convém lembrar que, para além da fibra usada como reforço, também a sua orientação e seqüência de empilhamento, no caso de laminados, alteram as suas propriedades.

Geralmente, os materiais compósitos têm um processo de fabricação em que um dos objetivos é a obtenção de uma forma quase final da peça pretendida. Este fato permite reduzir ao mínimo as necessidades de usinagem. No entanto, operações como o corte de formas e a execução de furos para possibilitar a montagem em estruturas, são operações correntes nas indústrias que trabalham com estes materiais.

A furação é uma operação complexa que se caracteriza pela existência de mecanismos de extrusão e corte, o primeiro efetuado pela ponta da broca, cuja velocidade é nula ou quase nula, e o segundo pelas arestas cortantes em movimento de rotação a uma dada velocidade.

De todos os defeitos que podem resultar da furação de um compósito, o mais grave é a delaminação, pois provoca perda de propriedades mecânicas das peças. (Persson, *et al.*, 1997). O principal mecanismo responsável pela ocorrência da delaminação é a força axial exercida pelo centro estacionário da broca, cuja ação mecânica é mais próxima de uma extrusão do que de uma furação. A minimização desta força permite reduzir a probabilidade de se verificar este defeito após furação. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas com o objetivo de minimizar a delaminação, tendo como base a escolha adequada dos parâmetros de usinagem, os materiais e a geometria das ferramentas. Outras variáveis têm igualmente merecido a devida atenção tais como a colocação de uma placa suporte por baixo da peça a furar, o que nem sempre é possível, e a realização de um furo-piloto de diâmetro adequado.

Portanto, não é possível obter um acabamento comparável ao das peças metálicas devido à não homogeneidade e anisotropia própria dos compósitos. Por outro lado, a operação de furação causa diversos defeitos nas peças além da delaminação, tais como, fissuras intralaminares, descolamento fibra/matriz e danos térmicos (Tagliaferri, *et al.*, 1990). Estes defeitos provocam uma deterioração das propriedades mecânicas das peças, podendo mesmo afetar a sua confiabilidade, razão pela qual o seu uso em componentes considerados críticos, do ponto de vista da segurança das estruturas deve ser feito com extrema cautela. Outro aspecto que deve também ser levado em conta é o desgaste das ferramentas utilizadas, que contribui também para a extensão dos defeitos encontrados nas peças.

A ferramenta que foi utilizada é de uso comercial, e a utilização delas é para a verificação do desempenho na furação. Brocas com ângulo de ponta de 140°, e fresas sem ângulo de ponta, no caso das fresas além de serem de metal duro, ainda têm uma cobertura de Diamante, para que a abrasividade das fibras não danifiquem as ferramentas.

O objetivo desse trabalho foi o estudo do processo de usinagem por furação em compósito GLARE utilizando broca de metal duro comercial e avaliar o seu desempenho.

A utilização destes materiais e procedimentos é para se garantir a eficácia dos resultados, para tentar eliminar os defeitos gerados no processo atual de furação. Com isto definir as melhores condições de usinagem e parâmetros ideais para este material.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Na busca constante pela melhoria do desempenho, que pode ser avaliada sob vários aspectos como redução de peso, maior resistência, maior resistência ao desgaste e melhor estabilidade térmica entre outras, os materiais normalmente usados já alcançaram o limite de suas aplicações. Neste sentido cientistas, engenheiros e pesquisadores da área de materiais estão constantemente trabalhando para melhorar o desempenho dos materiais tradicionais ou desenvolver materiais completamente novos (JESUS, 1998).

Materiais compósitos são exemplos de novos materiais concebidos dentro desta filosofia a idéia de material compósito não é recente. Compósitos naturais como por exemplo a madeira e alguns outros compósitos sintéticos têm sido usados pelo homem a milhares de anos; porém, o desenvolvimento maior nesta área ocorreu somente nas últimas décadas.

A nomenclatura dos compósitos híbridos metal/fibra pode ser designada por uma seqüência do tipo m/n , onde m é o número de lâminas de alumínio e n é o número de lâminas do compósito polimérico.

Segundo Chawla (1987), pode-se considerar como origem da disciplina de materiais compósitos o início dos anos 60, sendo que grande parte das pesquisas e desenvolvimento nesta área começou em meados da mesma década.

Existe muita divergência quanto à definição de material compósito, contudo Schwartz (1983) salienta que uma definição correta deve ser estabelecida em função do nível de observação. O dicionário define “compósito” como algo feito ou composto de várias partes ou elementos. Neste contexto, avaliando-se do ponto de vista atômico e molecular todo e qualquer material poderia ser classificado como um compósito, visto que é composto por vários átomos e moléculas. Para que se possa definir melhor o termo compósito dentro do campo da engenharia metalúrgica e de materiais, é necessário que se faça uma avaliação menos abrangente.

Schwartz (1983) subdivide o sentido amplo fornecido pelo dicionário em três níveis de definição:

- No nível básico ou elementar todo material composto de dois ou mais átomos diferentes pode ser considerado um compósito. Neste nível pode-se incluir as misturas, ligas, polímeros e cerâmicas. Apenas elementos puros podem ser excluídos.
- No nível microestrutural, incluem-se materiais compostos de dois ou mais cristais, estruturas moleculares ou fases diferentes. Por esta definição muitos materiais considerados monolíticos ou homogêneos podem ser classificados como materiais compósitos. Aços e ligas multifase de carbono e ferro podem ser compósitos.
- No nível macroestrutural o que se caracteriza são formas estruturais ou constituintes grosseiros, isto é, matrizes, *whiskers* e fibras que podem na grande maioria das vezes ser distinguidos a olho nú.

Os materiais compósitos caracterizados pelo nível de observação, macroestrutural são os responsáveis pela recente revolução tecnológica na área de novos materiais.

Somente a observação do ponto de vista macroestrutural ainda não é suficiente para que se possa definir perfeitamente estes novos materiais. Para tanto, é necessário considerar, segundo Schwartz (1983) duas outras características muito importantes na identificação destes materiais. Primeiro, os constituintes individuais que formam um compósito são quase sempre diferentes quimicamente; segundo, eles são essencialmente insolúveis entre si. Chawla (1987) coloca algumas outras características igualmente importantes, que podem ser adicionadas às de Schwartz (1983); primeiro, o material compósito é um material fabricado (isto é, compósitos que ocorrem naturalmente como a madeira são excluídos); segundo, consiste de duas fases química e/ou fisicamente distintas devidamente arranjadas ou distribuídas com uma interface de separação entre elas; e finalmente, esses materiais têm características diferenciadas das dos seus componentes isoladamente. Matthews e Rawlings (1994) destacam uma outra

característica que se diferencia das anteriores, e que também é bastante importante; os constituintes desses materiais têm normalmente que estar presentes em proporções razoáveis, maiores que 5 %.

Nestes materiais, uma das fases normalmente mais dúctil se apresenta em maior proporção sendo comumente denominada “matriz”. A fase ou fases complementares apresentam-se em menor proporção, na maioria dos casos é mais dura do que a matriz e é normalmente denominada “reforço”. Existe uma quantidade enorme de possibilidades de características que podem ser usadas para a classificação de materiais compósitos, contudo, de modo geral eles são classificados de acordo com o tipo de reforço e orientação dos mesmos (Figura 1)

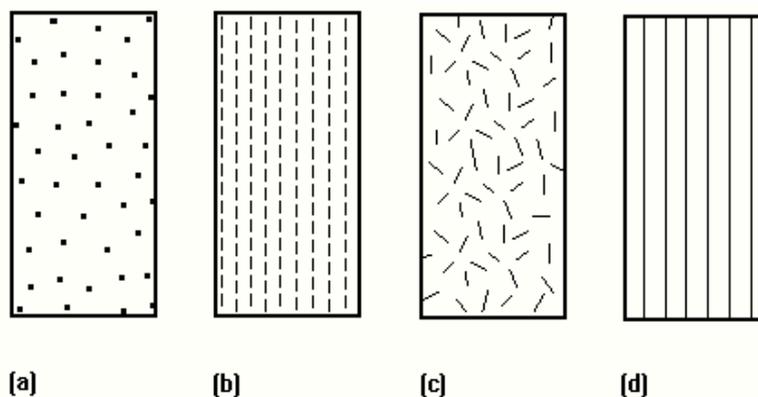


Figura 1 – Exemplos de materiais compósitos: (a) particulado, randômico; (b) fibras descontínuas, unidirecionais; (c) fibras descontínuas, randômicas; (d) fibras contínuas, unidirecional(adaptação Matthews e Rawlings (1994)).

2.1.1 – Materiais compósitos de matriz metálica

O início das pesquisas no campo de materiais compósitos foi marcado em particular por um grande número de estudos e aplicações em compósitos de matriz polimérica, nas décadas de 70 e 80. A idéia evoluiu, e com o passar do tempo intensificou - se também o número de pesquisas e aplicações em compósitos de matriz metálica e cerâmica, devido à possibilidade de poderem ser usados a temperaturas mais altas (Figura 2.2).

Os materiais compósitos de matriz metálica têm muitas vantagens sobre os materiais convencionais, tais como: maiores limites de resistência mecânica e módulo de elasticidade, melhores propriedades a altas temperaturas, baixo coeficiente de expansão térmica e melhor resistência ao desgaste, entre outras (Figuras 2). Portanto, graças a estas propriedades estes materiais podem ser usados em um grande número de aplicações (Quadro 1).

Algumas propriedades e características que se destacam nestes materiais, quando comparados a seus constituintes isolados (compósito e/ou ligas de alumínio) são: baixas taxas de propagação de trincas; baixa absorção de umidade (menos de 0,5%) quando comparado aos compósitos poliméricos convencionais; baixo peso específico e elevada resistência ao impacto.

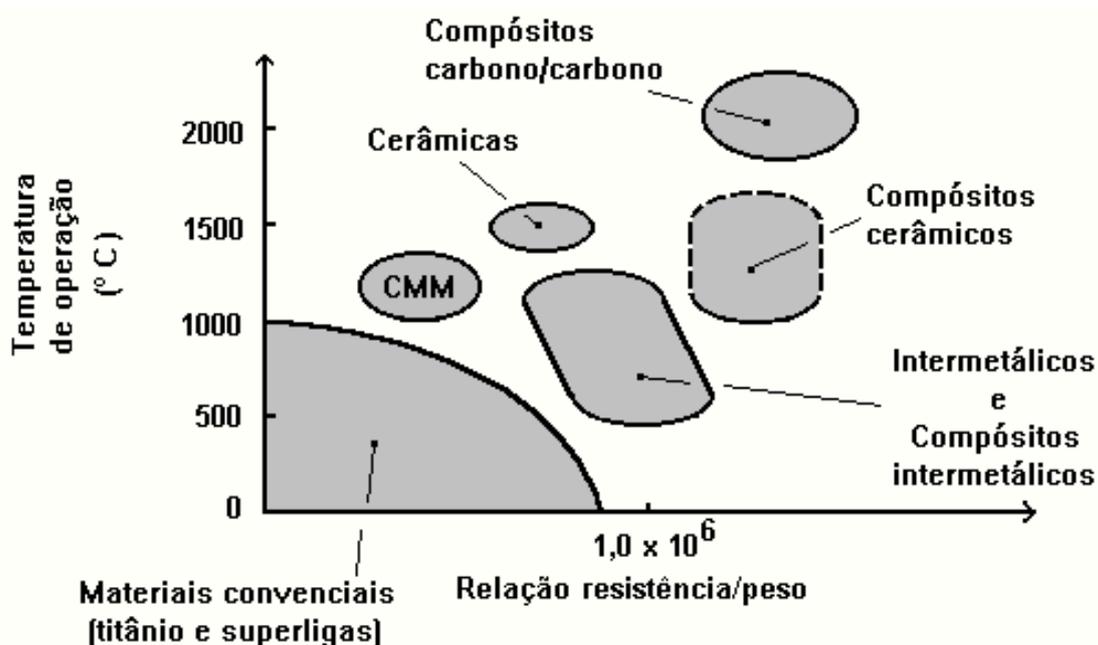


Figura 2 – Mapa de desempenho de vários materiais de engenharia, em termos de temperatura de operação(°C) e relação resistência/peso (adaptação). Taya,(1989)

Os compósitos de matriz metálica podem ter uma variada combinação de elementos de matriz e reforço dependendo da aplicação e propriedades que se deseja obter. Entretanto, devido a principal aplicação ser estrutural buscam-se elementos mais leves e mais resistentes e utilizam-se normalmente materiais que apresentam baixas densidades vide (Quadro 1). Nestes materiais, o reforço é

normalmente um material cerâmico, embora possa ocorrer também por exemplo, a utilização de metais.

Quadro 1 – Exemplos de materiais compósitos de matriz metálica (CMM) para aplicações aeroespaciais. Mathews, (1994)

Matriz	Reforço	Aplicação
Cu	C	câmara de combustão
	SiC	nariz (foguetes, lançadores)
	W	NASP ^a - Trocadores de calor
Fe	W	tanques
Ni e intermetálicos	Al ₂ O ₃	lâminas, discos
	W	lâminas, discos
Ti e intermetálicos	SiC	alojamentos, tanque
	TiB ₂	lâminas, discos
	TiC	cabos
Al	SiC	alojamentos (bombas, instrumentação), conectores mecânicos, satélite, estruturas
	Al ₂ O ₃	fuselagem
	C	membros estruturais
	SiC	anéis, lâminas
Mg	Al ₂ O ₃	membros estruturais

Clyne e Withers, (1993), subdividem os CMM de acordo com os tipos de reforço que os constituem, que podem ser contínuos (fibras longas), descontínuos (fibras curtas e “*whiskers*”) (Figura 4 a-b-c) e particulados. Acrescentam ainda que outras distinções podem ser feitas com base no diâmetro das fibras, orientação e distribuição do reforço.

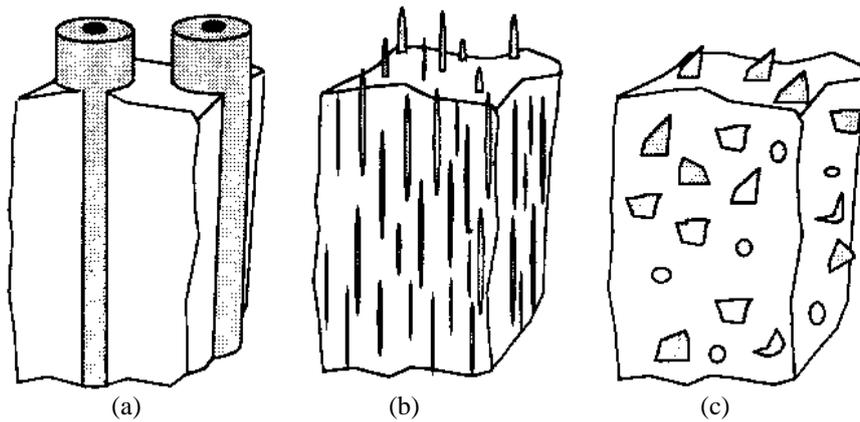


Figura 3 – Três tipos de CMM, (a) fibras longas (b) fibras curtas e “whiskers” (c) particulado. Clyne, (1993).

2.1.2 - Processos de fabricação de compósitos de matriz metálica

Uma série de técnicas de processamento têm sido estudadas e utilizadas com o objetivo de otimizar a microestrutura e as propriedades mecânicas de compósitos de matriz metálica; entretanto, existe uma certa divergência quanto à classificação destes processos. Matthews e Rawlings (1994) classificam os processos de fabricação de CMM dentro de quatro grupos básicos: a) estado sólido, b) estado líquido, c) deposição e d) *in situ*.

Cada um destes métodos se diferencia dos demais, basicamente pela forma em que a matriz se encontra no momento em que é colocada em contato com o reforço, e também pela rota seguida até a consolidação efetiva entre as partes.

Segundo Srivatsan, *et al.* (1991), os métodos de processamento utilizados na fabricação de compósitos de matriz metálica, mais especificamente aqueles com reforço particulado, podem ser agrupados de acordo com a temperatura em que o material da matriz se encontra durante o processo.

Conseqüentemente podem ser divididos em três categorias: (1) processos de fase sólida; (2) processos de fase líquida; (3) processos de duas fases (sólido/líquido).

No processo de fase líquida, o material de reforço é incorporado dentro da matriz fundida usando-se várias técnicas as quais normalmente envolvem mistura e eventual fundição da mistura resultante em forma de componentes ou tarugos para posterior retrabalho. No processo de fase sólida, os materiais da matriz e do

reforço são adicionados na forma de pós envolvendo uma série de estágios antes da efetiva consolidação do material. Processos de duas fases envolvem a mistura de material de reforço e matriz onde o material da matriz encontra-se em fases líquida e sólida.

Ambrozio Filho, *et al.* (1996), adotam uma classificação mais abrangente e dividem os processos de fabricação de CMM em duas categorias básicas: processos com fase líquida e processos em estado sólido.

Dentro da classificação proposta por Ambrozio Filho, *et al.* (1996), alguns processos podem ser exemplificados. São eles: a) via metal líquido ("compcasting", co-deposição por "spray" e infiltração entre outros) e b) via metalurgia do pó. Clyne e Withers (1993) nomeiam todos os processos citados anteriormente, como processos primários de fabricação os quais dão o nome de processos secundários.

a) Fabricação via metal líquido

Na fabricação via metal líquido, a produtividade é maior. Não há necessidade da utilização de prensas ou matrizes metálicas (exceto se for utilizado o processo "squeeze - casting" como será visto mais adiante), possibilitando menores custos de produção e maior produtividade se comparada com a metalurgia do pó. Existe entretanto, dificuldade em se conseguir distribuição homogênea do reforço na matriz, bem como a introdução do reforço na forma de pó no banho metálico. Uma solução seria a refusão / solidificação de lingotes do compósito, de maneira muito bem controlada para evitar segregação e porosidades, mas isto encarece o processo e em muitos casos causa reações interfaciais indesejáveis.

Existe ainda a limitação quanto a quantidade de reforço que pode ser introduzido na matriz, com 20% em média de partículas em um banho, a viscosidade do mesmo aumenta de tal forma, que inviabiliza a produção via metal líquido (fundição) ou mesmo a homogeneização e vazamento do banho.

Um outro problema na produção via metal líquido, é a falta de molhabilidade do mesmo Mourisco, (1995).

b) - "Compcasting" ("rheocasting")

No processo "compcasting", basicamente o reforço é misturado à matriz fundida em seguida a mistura é moldada de maneira convencional. Naturalmente, uma mistura uniforme é difícil de ser alcançada, levando-se em consideração as diferenças de densidade entre a matriz e o reforço. No "rheocasting" (Figura 5), a mistura é melhorada graças a um resfriamento controlado da mesma, o que a coloca numa condição mais viscosa e facilita a homogeneização Taya (1989).

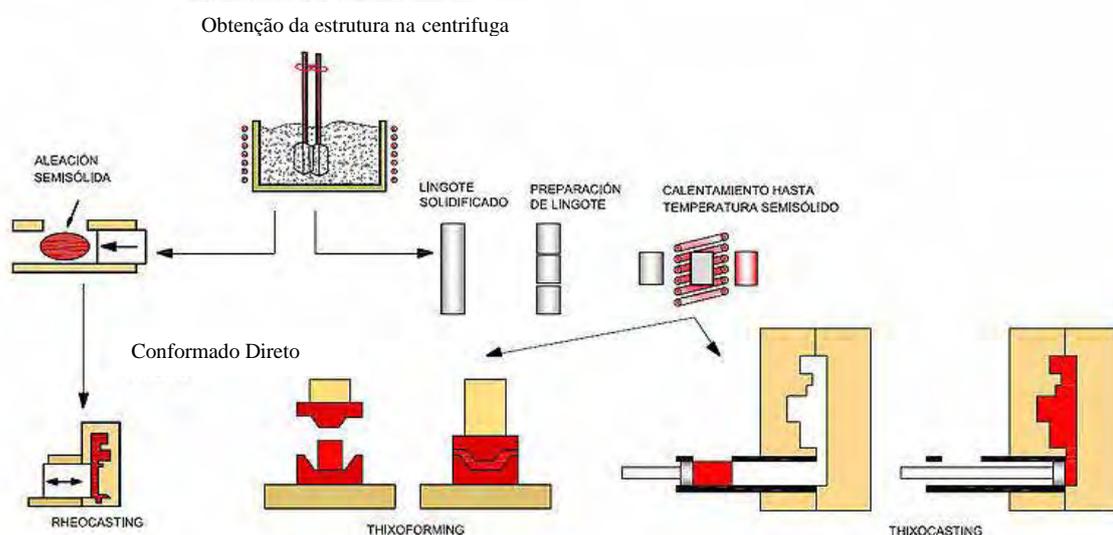


Figura 4 – (a) mistura das fibras ou partículas com o metal, (b), fundição em molde. Taya (1989)

c) Infiltração

Em contraste com o caso de mistura de fases como no "compcasting", muitos processos via líquida envolvem a utilização de pré-formados de reforço, onde a matriz líquida precisa infiltrar. Uma infiltração mais eficiente pode ser conseguida pela aplicação de uma pressão maior que a atmosférica.

Esta pressão é normalmente obtida mecanicamente por gás, mas outros métodos têm sido estudados incluindo indução eletromagnética. Segundo Matthews e Rawlings (1994) os processos de infiltração são aplicados a CMM reforçados por fibras e consistem em se obter um fluxo de metal líquido através de interstícios de um pré-formado que é um emaranhado de fibras curtas ou

partículas. Após a infiltração obtém-se como produto final uma peça ou uma barra solidificada onde o metal líquido preencheu todas as cavidades possíveis desse pré-formado.

d) Fundição sob pressão ("squeeze-casting")

A fundição sob pressão é caracterizada pela aplicação mecânica da pressão e é adequada para a produção de pequenos componentes. Basicamente, um pré-formado de reforço é introduzido dentro de uma cavidade, onde uma quantidade precisa de metal fundido é adicionada e em seguida pressionada sobre o pré-formado para que o metal se infiltre. As vantagens desse processo são: altas taxas de produção, baixos custos se grandes quantidades são produzidas, alta qualidade da microestrutura nas regiões não reforçadas e altas taxas de solidificação resultando em baixas degradações das fibras.

Algumas desvantagens são: os altos custos de ferramentais; dificuldade na fabricação de protótipos e dificuldade no controle de parâmetros importantes como temperatura do pré-formado (Figura 6) Matthews e Rawlings (1994).

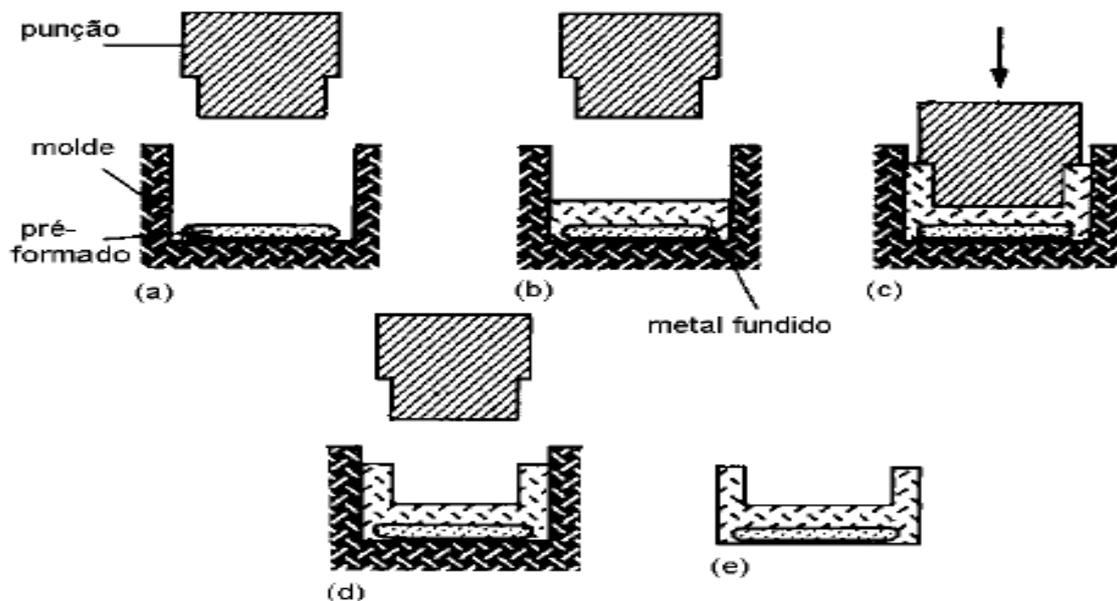


Figura 5 – (a) inserção do pré-formado dentro da cavidade do molde; (b) adição de uma quantidade precisa de metal; (c) fechamento do molde e aplicação de pressão; (d) abertura do molde; (e) componente pronto. Matthews e Rawlings (1994).

e) Infiltração sob pressão

Neste processo, o pré-formado é colocado dentro de um molde que por sua vez encontra dentro de uma câmara. O metal que se encontra dentro de um recipiente também no interior da câmara é liquefeito pela ação de resistências elétricas que envolvem o recipiente. A alta pressão é conseguida fazendo-se inicialmente vácuo nesta câmara para que o metal seja levado a se infiltrar no pré-formado. Posteriormente a câmara é pressurizada e o banho metálico é forçado ainda mais a se infiltrar no pré-formado (Figura 7) Matthews e Rawlings (1994).

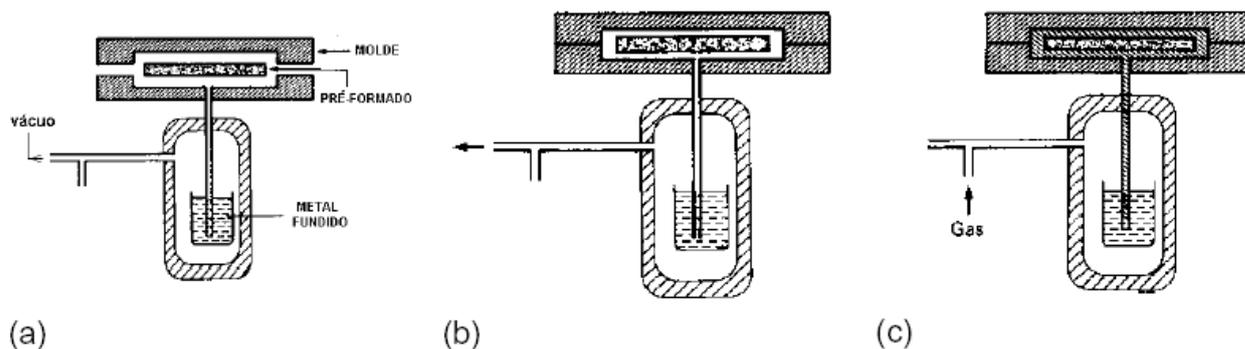


Figura 6 – Infiltração da liga fundida sob pressão de gás: (a) inserção do pré-formado e fechamento do molde, (b) aplicação de vácuo, (c) aplicação de pressão de gás, mantida durante a solidificação. Matthews e Rawlings (1994).

f) Infiltração por vácuo

Este processo é muito parecido com o processo anterior com a diferença de que a infiltração é feita apenas com a presença de vácuo. É geralmente usado quando se têm fibras grossas ($140\ \mu\text{m}$) e espaço necessário entre elas para que se crie uma diferença de pressão suficiente, (no mínimo 1 atm) para que o metal penetre entre as mesmas.

Devido às baixas pressões aplicadas, podem ocorrer regiões não infiltradas do pré-formado, mesmo em materiais com boas propriedades de molhabilidade (Figura 8) Mourisco (1995).

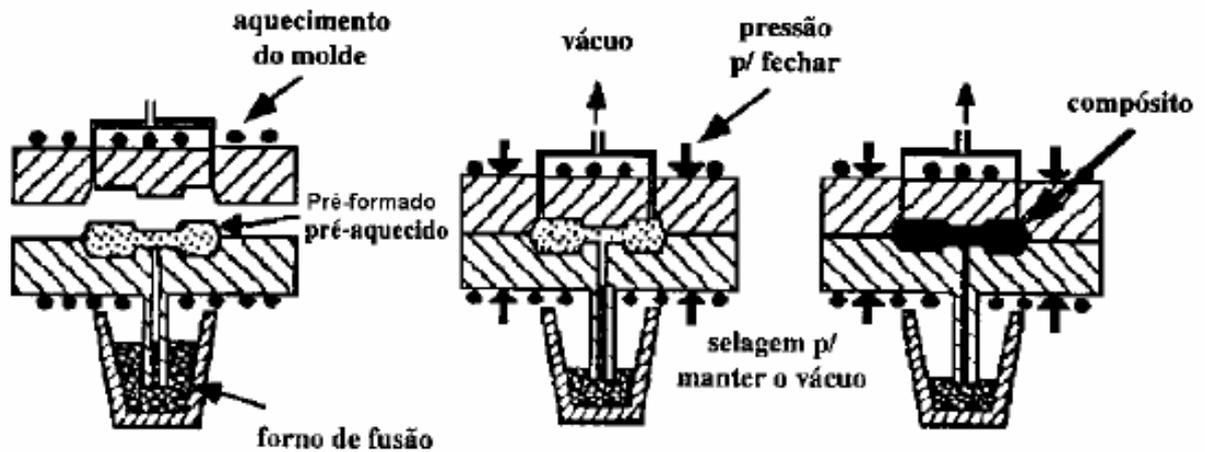


Figura 7 – Desenho esquemático do processo de infiltração por baixas pressões Mourisco (1995).

g) Co-desposição por “spray”

Neste processo, a matriz fundida é pulverizada juntamente com o reforço sobre um substrato de maneira semelhante àquela que ocorre nos processos de atomização; com a diferença de se adicionar as partículas de reforço na saída do metal que está sofrendo o processos de atomização. Pode ser aplicado para grandes produções, (0,2 a 6kg/s) Taya, (1989). O metal atomizado permite uma rápida solidificação levando á obtenção de uma matriz com microestrutura fina e reduzindo a possibilidade de reação química extensiva da matriz com o reforço (Figura 9) Ambrozio Filho (1996).

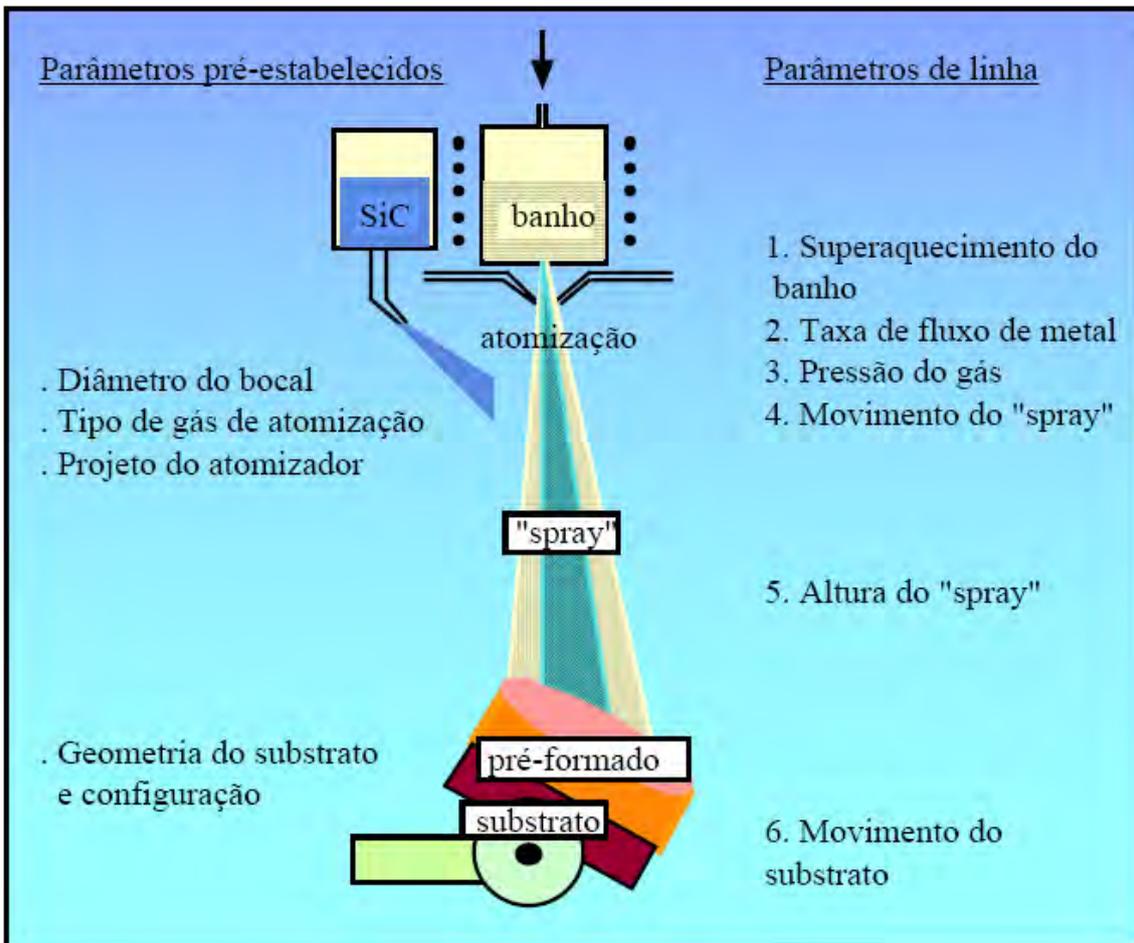


Figura 9 – Desenho esquemático do processo “spray” para fabricação de materiais compósitos por co-deposição de matriz e reforço. Ambrozio Filho, (1996).

2.1.1.2. Fabricação via metalurgia do pó

O processo via metalurgia do pó se enquadra na categoria de processos de fase sólida. Este processo envolve a mistura de pós do metal da matriz e do material de Reforço através de uma sequência de etapas que levam à efetiva consolidação do material, podendo incluir basicamente as seguintes etapas:

(a) Peneiramento do material da matriz; (b) do material da matriz com o material de reforço; (c) composição da mistura; (d) desgaseificação; (e) consolidação por extrusão, forjamento, laminação ou outro método qualquer de trabalho á quente.

Srivatsan et al.(1991), salientam que a tecnologia de produção via metalurgia do pó têm sido desenvolvida com sucesso por vários fabricantes comerciais. Os resultados revelam ainda que o processamento via metalurgia do pó, possibilita a

obtenção de com níveis de resistência mecânica superiores, se comparados a materiais equivalentes obtidos por processamentos via metal líquido.

2.2 TRIBOLOGIA

2.2.1 Origens e conceitos

O movimento de uma superfície sólida sobre a outra, é de fundamental importância para o funcionamento de muitos tipos de mecanismos naturais e artificiais. A tribologia engloba o estudo do atrito, desgaste e lubrificação e é definida como a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo. Jost (1990) define como sendo a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo, e das práticas e assuntos relacionados. A Palavra tribologia é derivada da grega “tribos” que significa atrito e foi implantada basicamente a partir de 1966.

A falha de um componente ou estrutura, segundo Gahr (1987), pode ocorrer por meio de 4 mecanismos básicos, ou em alguns casos pela interação de dois ou mais desses mecanismos em conjunto sendo que os demais têm efeito secundário. São eles:

- Deformação plástica;
- Formação e propagação de trincas;
- Corrosão
- Desgaste.

Cada um deste mecanismos têm características própria e, compreende ramos de estudos e pesquisas diferenciados dentro do campo das diversas áreas da engenharia. O desgaste é um mecanismo que danifica a superfície de componentes. A vibração, o aquecimento, as mudanças geométricas e sobras de desgastes podem ser causados pela presença de atrito e desgaste. Estes podem

resultar em perda futura da função do componente e pode ou não levar a uma falha catastrófica.

O desgaste e atrito são fenômenos antigos para a raça humana. Em épocas remotas, o fogo era obtido pelo atrito madeira contra madeira, ou pela colisão entre pedras muito duras. Muito mais tarde no período da renascença ocorreram importantes contribuições para o melhor entendimento dos fenômenos do atrito e desgaste. Conceitos como coeficiente de atrito foram implantados e a influência benéfica da utilização de lubrificantes na redução dos efeitos do atrito e desgaste também foi comprovada.

A importância econômica da tribologia e a grande necessidade por uma pesquisa sistemática e melhoria da transferência de conhecimentos teóricos nesta área, têm sido bem reconhecida durante as últimas quatro décadas. Muitos estudos têm sido conduzido em diferentes países industrializados no sentido de avaliar a impacto econômico provocação pelos fenômenos de desgaste e atrito. De acordo com alguns desses estudos perdas econômicas chegam a atingir cerca de 4,5% do produto interno bruto de alguns países (Gahr 1987). Daí a necessidade de que estudos e pesquisas sejam intensificadas nesta área para que se entenda melhor este fenômenos e para que se elimine, minimize ou se tenha controle sobre as suas causa e efeitos.

Existe uma variada gama de aplicações onde pode ser verificada a ocorrência de desgaste: equipamentos de movimentação, bombas moinhos anéis de pistão, engrenagens, discos de freio, etc. Em todos os casos uma ampla variedade de condições causam desgaste. A Solução de determinado problema de desgaste depende da identificação exata da natureza do problema. Sistemas de análise podem ser usados para identificação dos parâmetros de sistemas tribológicos (tribotecnologia ou tribossistemas).

Dependendo dos parâmetros de um tribossistemas, diferentes tipos de desgaste podem ocorrer. Mecanismos de desgaste descrevem a interação energética e os corpos em contatos pode também ser usado para classificação dos diferentes processos de desgaste. Embora a norma DIN 50320 (1997) não considere o processo tribológico que ocorre nos processos de fabricação como desgaste em

relação à peça trabalhada, Bayer (1994) sugere que Usinagem e polimento são formas de desgaste e que existe o lado positivo do desgaste e dos fenômenos de desgaste.

Um termo que geralmente acompanha o desgaste é o atrito. Bayer (1994) define atrito como “uma força que se opõe ao movimento relativo entre duas superfícies”. Ela age em direção paralela às superfícies de contato e em sentido oposto ao movimento. Geralmente a magnitude do efeito do atrito é descrita em termos de um coeficiente dito coeficiente de atrito (μ) que é a relação entre a força de atrito F e a força normal N , responsável por manter unidas as superfícies em contato.

Pode-se ainda considerar variações no conceito de coeficiente de atrito, na medida em que existe uma diferença entre o valor da força de atrito no início do movimento, e o seu valor quando o movimento é mantido em velocidade constante. Assim, tem-se no primeiro caso o chamado coeficiente de atrito estático (μ_s) e no segundo caso o coeficiente de atrito dinâmico (μ_k).

Bayer (1994) classifica desgaste basicamente em três caminhos: o primeiro leva em conta a aparência da marca do desgaste; o segundo relaciona o mecanismo físico que remove o material ou causa a falha e o terceiros as condições que envolvem a situação do desgaste. Assim tem-se a seguinte configuração:

- | | |
|-----------|--|
| APARÊNCIA | <ul style="list-style-type: none"> • Corrido (“Pitted”) • Lascado (“Spalled”) • Riscado (“Scratched”) • Polido (“Polished”) • Rachado (“Cracked”) • Fadigado (“Fretted”) • Escavado (“Gouged”) • Brunido (“Scuffed”) |
|-----------|--|

MECANISMO FISICO

- Adesão
- Abrasão
- Delaminação / Fadiga de superfície, Gahr (1987)
- Oxidativa / reações triboquímicas, Garh (1987)

CONDIÇÕES QUE ENVOLVEM A SITUAÇÃO DO DESGASTE

- Desgaste Lubrificado
- Desgaste não Lubrificado
- Desgaste por escorregamento metal/metal
- Desgaste por rolamento
- Desgaste por deslizamento de alto esforço
- Desgaste metálico a alta temperatura

O desgaste é avaliado por meio de teste tribológicos, através dos quais obtém-se resultados que permitem estabelecer relações comparativas entre os matérias. Gahr (1987), cita em seu livro diversas normas relacionadas ao assunto dentre elas a DIN 50321(16), que estabelece maios para a determinação da quantidade de desgaste baseados nos resultados em teste tribológico.

2.3 USINAGEM

2.3.1 Origens e conceitos

Existem basicamente três processos pelos quais se obtêm peças e produtos prontos para a utilização. O primeiro se caracteriza pela deposição de material e junção de partes como por exemplo no caso da Solda e metalização; o segundo é o processo por deformação ou conformação que produz peças e componentes com as propriedades mecânicas necessárias por deformação plástica, onde o material é movido e o seu volume conservado; o terceiro processo é exatamente o processo de **usinagem** que produz peças pela remoção de material em partes ou

em toda a extensão da peça por meio da utilização de ferramentas de corte. Um outro processo têm se destacado nos últimos anos revolucionando o campos da fabricação de peças e componentes principalmente de pequeno e médio porte, é o processo por metalurgia do pó, que permite em alguns casos a confecção de peças tão precisas quanto aquelas obtidas pelos processos mais delicados de usinagem.

Difícilmente ocorre a presença isolada de um ou outro destes processos na fabricação de peças ou componentes, sendo que, normalmente o processo de usinagem atua como processo complementar com relação aos demais processos.

Há muito tempo o homem se esforça para concretizar formas que visualiza em sua mente. Sempre insatisfeito com os resultados obtidos na concretização de suas obras, têm buscado constantemente meios que possam facilitar e auxiliá-lo na busca da perfeição rumo a excelência. Percebeu que a forma tinha enorme influência em sua existência e que tinha poder para transformá-la, podendo não só torna bela, mas também adequada á conquista dos seus objetivos. Este é o conceito global de usinagem “alcançar a perfeição da matéria, não apenas enquanto a torna bela, mas também enquanto a torna útil e com razão suficiente de existência” Marcondes (1991).

Tecnicamente, usinagem é a operação executada por uma máquina ferramenta que removendo matéria prima e produzindo cavacos por meio de ferramentas de corte, confere a forma, dimensão e acabamento planejado a uma peça.

Existe uma extensa variedades de processos de usinagem de que pode fazer uso, dependendo é claro da geometria da peça a usinar, da geometria final que se deseja obter e do grau de acabamento e tolerância especificadas no objeto. Ferraresi (1970) em seu livro “Fundamentos da usinagem dos metais”, cita 23 processos e 32 subprocessos dos quais pode-se exemplificar três processos considerados universais de usinagem: torneamento, fresamento e furação. Cada um destes processos ou subprocessos se caracteriza pela utilização de equipamentos diferenciados e de ferramentas também diferenciadas, que irão auxiliar na efetiva consolidação do processo. Então, pode-se ter equipamentos

como tornos, fresadoras, retificadoras, etc, utilizando ferramentas como fresas, brocas rebolos e outras Jesus (1998).

2.3.2 Desgaste da Ferramenta

No processo de corte dos metais por métodos convencionais, um fator indesejável e que exerce forte influência nos custos finais de produção de determinada peça ou componente, é o desgaste da ferramenta de usinagem. De modo geral, os mecanismos de desgastes na ferramenta de usinagem obedece os princípios teórico estabelecidos pela “tribologia” (ciência que estuda os fenômenos e mecanismos envolvidos no processo de desgaste), vide item 2.3.

Mais especificamente para as ferramentas de usinagem de ponta única, existe uma classificação que denomina os efeitos do desgaste de acordo com o tipo (local e forma visual em que se apresentam). São eles: a) desgaste de flanco, b) desgaste de cratera, c) desgaste de sulco, d) deformação plástica, e) Lascamento, f) desgaste em forma de pente g) falha catastrófica.

Dentre estes os mais importantes são o de flanco e o de cratera, pois além de serem os de maior ocorrência, são inevitáveis e os maiores responsáveis pelo fim da vida da ferramenta em condições normais de trabalho Jesus (1998).

2.3.3 Usinabilidade

A chave para a produção industrial econômica com qualidade assegurada é a escolha e a configuração correta do processo produtivo. Quando este processo é o de usinagem a grande preocupação dos fabricantes de materiais, bem como dos fabricantes de peças e componentes que irão utilizar estes materiais e também dos fabricantes de ferramentas, é com a usinabilidade dos mesmos, ou seja, a facilidade ou não com que podem ser usinados.

Usinabilidade pode ser definida como sendo uma grandeza tecnológica que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem de um metal Ferraresi (1970) são

aquelas que expressam o seu efeito sobre as grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais tais como vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial da peça temperatura de corte, etc.

A usinabilidade tem grande influência na produtividade e nos custos finais de fabricação do produto de uma empresa. Se o índice de usinabilidade é muito baixo, por exemplo, leva à necessidade da utilização de velocidades de corte menores para que não ocorra um desgaste acentuado e prematuro da ferramenta; isto implica em maior tempo de produção e conseqüentemente maior custo. Uma opção seria a utilização de uma ferramenta mais resistente ao desgaste com aumento simultâneo da velocidade de corte. Esta alternativa diminuiria o tempo de produção mas aumentaria o custo. Restaria saber qual alternativa seria a mais vantajosa e ainda assim o acréscimo no custo mais caro. Restaria saber qual alternativa seria a mais vantajosa e ainda assim o acréscimo no custo final de produção seria evidente. É sabido, que o ideal é que se trabalhe com altas velocidades de corte e que para isso, não seja necessário a utilização de ferramentas especiais e mais caras; somente um material com alto índice de usinabilidade pode oferecer estas condições e é neste sentido que fabricantes de materiais, cientistas e pesquisadores da área de materiais têm se empenhado Jesus (1998).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após experimentos em laboratório, foram selecionadas sete condições, procurando minimizar as quantidades de testes a ser realizados. Os testes de furação na placa de compósito híbrido Glare foi realizado em um centro de usinagem CNC na escola SENAI-Pindamonhangaba e as caracterização no laboratório do SENAI-Taubaté.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

A placa de compósito híbrido de GLARE 3/2 utilizada consiste de uma estrutura híbrida, com três camadas de liga de alumínio e duas camadas do compósito polimérico (fibra de vidro), sendo que a lâmina de alumínio possui uma espessura de 0,4 mm O compósito polimérico foi posicionado de forma unidirecional sobre a placa de alumínio.

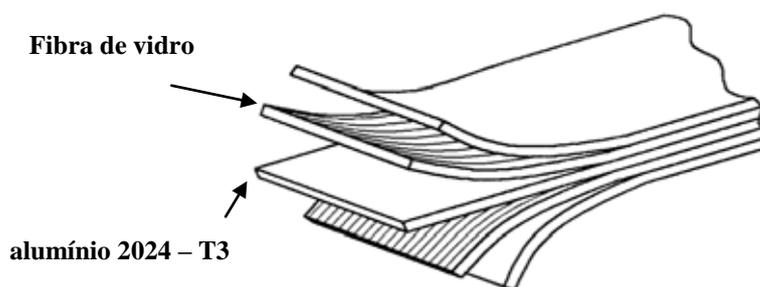


Figura 9 – Esquema da configuração de um CHMF. (DAMATO, 2010)

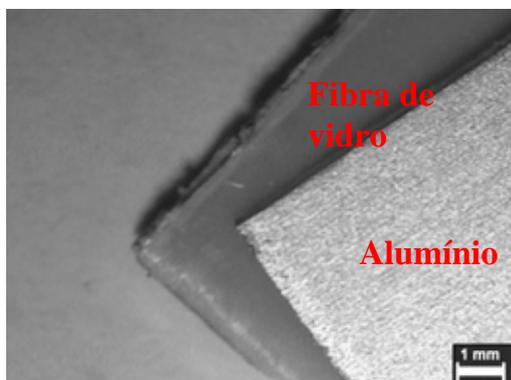


Figura 10 – Foto do material GLARE®, vista de cima

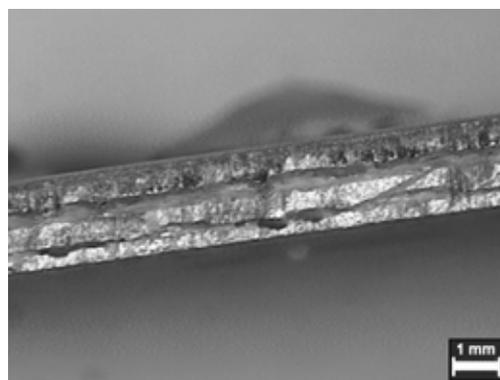


Figura 11 – Foto do material GLARE®, vista de lado.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para realização dos ensaios foram preparadas amostras com 40mm x 300mm x 1,6mm (Ensaio 1), retiradas da placa com dimensões de 600mm x 800mm. Para obtenção das amostras foi utilizada a guilhotina (Figura 13). Com a utilização da guilhotina o resultado do trabalho o foi muito mais satisfatório, pois o material sofreu o cisalhamento sem danificar seu contorno e principalmente, não houve delaminação em nenhuma das amostra, com isso foi mantida a integridade das amostras.

Para fixar as amostras no Centro de usinagem CNC (Figura 15 e 16), nos mordentes rebaixados, pois a compressão dos mordentes transversais poderia levar amostra à flexão, assim danificando.

Para o 1º ensaio foi fixado na morsa da máquina (Figura 21), um dispositivo com dimensões de 35mm x 45mm x 250mm construído em aço ABNT 4340 (Figura 22a), além de dois rebaixos laterais de 1,3mm para encaixe da amostra assim mantendo fixa em todo o contorno e 4 para fusos M8 com cabeça e sextavado interno, com arruelas para a fixação completa, evitando o movimento transversal e longitudinal da amostra. (Figura 22b)



Figura 12 – Morsa e mordentes de fixação do centro de usinagem CNC.

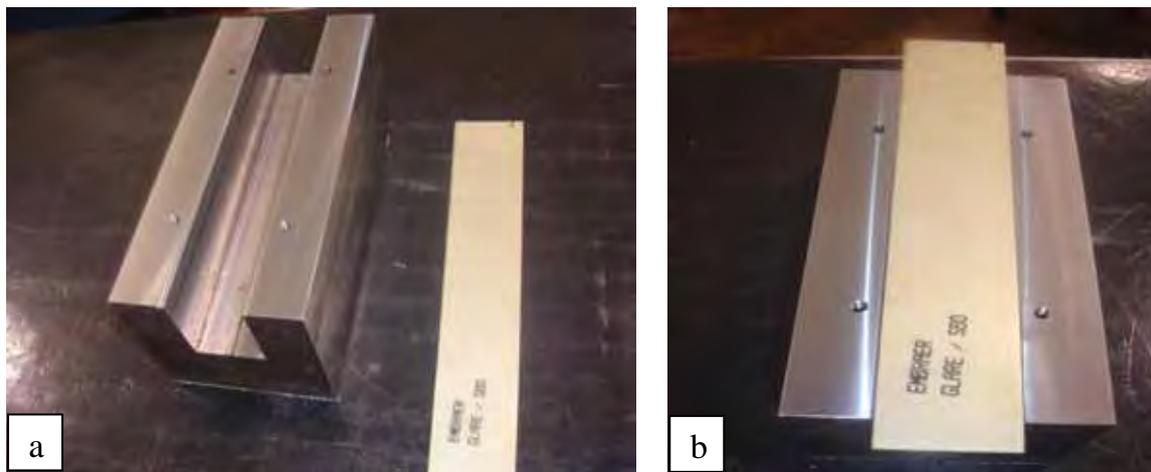


Figura 13 – Detalhes do dispositivo inicial: (a) Dispositivo inicial , com a amostra a usinar (b) Dispositivo com a amostra montada para o teste.

Foi elaborado um programa de usinagem para execução de 46 furos por amostra com velocidade de corte, rotação e avanço conforme a Tabela 1.

Para o 2º ensaio foi usinado um outro dispositivo de fixação (Figura 23a) e alterada a forma da amostra para 15mm x 250mm x 1,6mm. O dispositivo apresenta um rasgo de 7mm x 10mm x 250mm com fixação de 4 parafusos M8 com cabeça sextavada interna e arruelas. Este dispositivo também foi montado na morsa do Centro de Usinagem (Figura 23b).

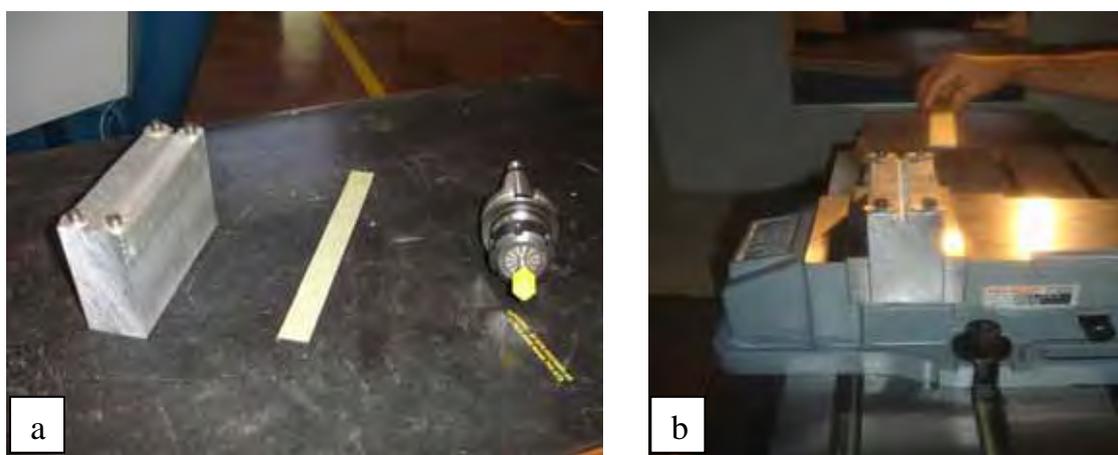


Figura 14 – Detalhes do dispositivo alterado: (a) Visão geral do dispositivo, amostra e ferramenta montado no cone de fixação, (b) Fixação do dispositivo na morsa e preparação da fixação da placa.

O programa de furação foi alterado para executar 18 furos em linha simples na amostra. A montagem das placas foi feita em série utilizando a face lateral esquerda para referenciamento do processo de furação (Figura 24 a-b).

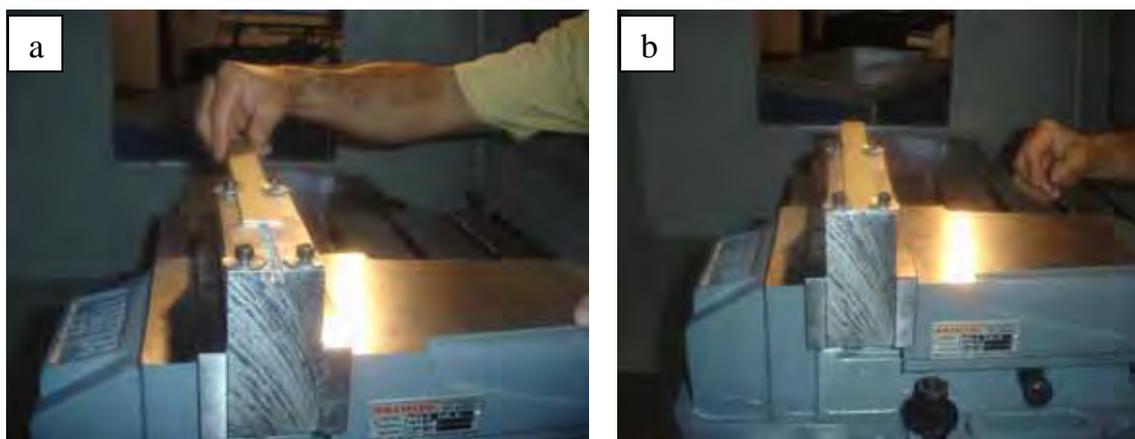


Figura 15 – Detalhes da montagem da amostra: (a) Encaixe da amostra e (b) Preparação da placa para referenciamento.

3.3 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos de usinagem utilizados nos testes são da Escola SENAI GERALDO ALCKMIN – Pindamonhangaba – SP e estão apresentados a seguir.

3.3.1. Guilhotina

As amostras foram preparadas utilizando uma guilhotina da marca IMAG, modelo 19M1, espessura máxima para o alumínio 6mm, regulagem da espessura da faca de 6mm a 8mm. (Figura 14)

Para a obtenção das dimensões 40mmx300mm, que foram retiradas de uma placa de 600mmx800mm.



Figura 16 – Guilhotina IMAG.

3.3.2. Centros de usinagem CNC

Para realização da furação das amostras foram utilizados dois centros de usinagem CNC. Nos testes iniciais, com rotação do eixo árvore máxima de 7500 RPM, foi utilizado o Discovery 760 da marca ROMI, velocidade máxima de avanço G01 30000mm/min nos eixos X e Y e no eixo Z 20000mm/min, equipado com comando numérico Sinumerik 810D da marca Siemens (Figura 15).

Para a segunda fase dos ensaios, com rotação máxima de 10.000 RPM, foi utilizado o centro de usinagem CVK 1066L da marca VEKER comando Mitsubishi 70L (Figura 16).



Figura 17 – Centro de Usinagem CNC ROMI
Discovery 760



Figura 18 – Centro de Usinagem CNC VEKER
CVK1066L

3.3.3 Ferramentas de corte

Para os ensaios foram utilizadas duas ferramentas. Nos testes iniciais foi utilizada uma fresa sólida de metal duro com cobertura de diamante, por conta da abrasividade do reforço de fibra. código 620V050R050 da marca JABRO, com diâmetro de 5mm (Figura 17), denominada a partir de agora de **F01**.

Nos teste definitivos foram usadas brocas sólidas de metal duro sem recobrimento, código SD203A-5.0-20-6R1-T da marca SECO, com diâmetro de 5mm (Figura 18), denominada a partir de agora de **B(n)** onde n é o numero seqüencial das brocas utilizadas .



Figura 19 – Fresas sólidas de metal duro com cobertura de diamante – 620V050R050 (SECO, 2008)



Figura 20 – Broca de metal duro – SD203A-5.0-20-6R1-T (SECO, 2008)

As brocas utilizadas foram montadas nos cones ISO Cone BT 40 com pinça ER32, pois as mesmas contam com uma haste de 6mm (Figura 19a). Já as fresas foram montadas no Cone ISO BT40 de precisão com pinça D24 UP (Figura 19b).

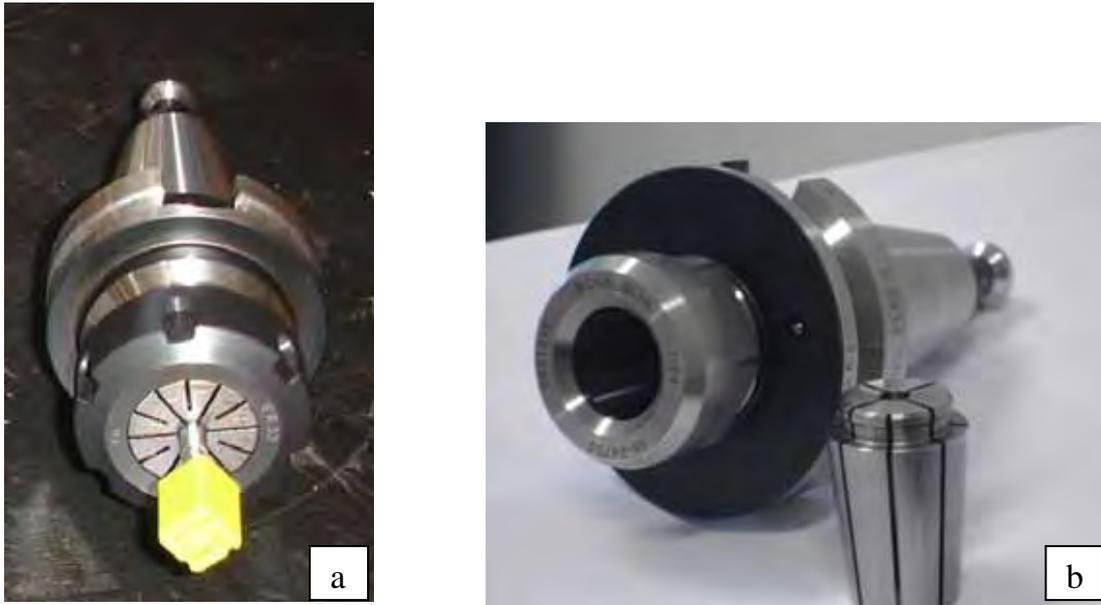


Figura 21 – Suportes de ferramentas: (a) Cone BT 40 com pinça ER32, (b) Cone BT40 de precisão com pinça D24 UP

3.3.4 Esterioscópio

Para a análise e documentação dos desgastes das ferramentas e da qualidade dos furos foi utilizado Esterioscópio Olympus SZ-TZ, pertencente ao laboratório de Ensaio Metalográficos da escola SENAI Felix Guisard – Taubaté – SP (Figura 20).



Figura 22 – Esterioscópio Olympus SZ-TZ

3.4 MÉTODOS.

Os parâmetros de usinagem iniciais utilizado nos ensaios foram obtidos do catálogo do fabricante de ferramentas em função do material alumínio devido a falta de informações desse material os testes foram realizados com uma fresa de topo sólida Ø 5mm diamantada, fixada em um suporte de ferramenta cone DP24 UP pinça de precisão. Com programação de 46 furos alinhados em duas fileiras, sem e com a utilização de fluido refrigerante. Como parte do estudo foi verificar o rendimento da ferramenta em termos de vida, há a necessidade de executar o máximo de furos na chapa. A finalidade da grande quantidade de furos é para se verificar-se qual o tipo de desgaste ou avaria foi predominante no final do processo. Nos ensaios foi utilizada refrigeração com óleo semi-sintético.

Por se tratar de compósito a base de alumínio e em função da inexistência de dados acerca deste material em catálogos de fabricantes, está analogia foi necessária para definir os dados iniciais. Foram realizados furos com broca de

metal duro sem cobertura com ângulo de influência de 140° para minimizar a pressão no corte do material.

Portanto, os dados utilizados do fabricante conforme catálogo foi para o material alumínio, conforme Quadro 1 e 2.

Cada amostra passou a contar com 18 furos consecutivos e eqüidistantes para a análise do desgaste que o processo de usinagem proporciona à ferramenta. As mesmas foram identificadas e analisadas da seguinte forma:

- Foram analisados os primeiros e últimos furos ;
- Imagens dos furos de topo no sentido transversal, para análise das deformações de contorno e de entrada da ferramenta.
- Imagens dos furos no sentido longitudinal, para se verificar o acabamento e se houve ou não a delaminação e o corte da fibra de vidro.
- Imagens das ferramentas longitudinalmente das guias e ponta;
- Imagens do topo da ferramenta para verificação das arestas de topo.
- Imagens do cavaco final para verificação da pressão de corte.
- Imagens dos furos nas amostras de vida de ferramenta, das dez amostras foram documentados as amostras dois, cinco e dez, vista de cima do furo vista do corte longitudinal.

Foram realizados ensaios de Usinagem dos furos com e sem refrigeração, para verificar a influência do fluido nos resultados. Portanto, logo no primeiro ensaio com fluido de corte, verificou-se que para o processo de usinagem deste material seria de grande valia a presença do fluido. Porém como existe o problema da contaminação da fibra de vidro, os ensaios com fluido de corte foram abandonados .

Tabela 1 – Tabela dos parâmetros dos testes.

Ensaio	Ferramenta	Rotação do Eixo árvore RPM	Vc m/min	F mm/min	Refrigeração	Furos Qtd
1	F01	7500	117	2250	Sem	46
2	B01	7500	117	2700	Sem	18
3	B02	7500	117	2700	Com	18
4	B03	7500	117	2250	Sem	18
5	B04	10000	157	2250	Sem	18
6	B05	10000	157	1800	Sem	18
7	B05	10000	157	1800	Sem	230

Os parâmetros identificados na Tabela 1, foram utilizados como referência do comportamento da amostra, pois com as alterações no decorrer dos testes consegue-se chegar no parâmetro de velocidade de corte, onde o problema de delaminação o defeito mais crítico deste tipo de material, é eliminado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões.

4.1 TESTES PRELIMINARES

Os resultados foram analisados após execução da furação com a fresa, como mostrado nas Figuras 25a-b-c-d-e-f, utilizadas para documentar o ensaio. O objetivo foi de verificar se a ferramenta cumpriu sua finalidade de cortar e transpassar a amostra, e se os furos apresentavam variações em seu contorno, além de verificar na posição transversal se era observado algum problema de delaminação.

Ensaio 1º - Foi utilizado fresa diamantada sem refrigeração, o dispositivo de fixação 1, os dados de acordo com Tabela 1.

Analisando as imagens de penetração dos primeiros furos (Figuras 25a-b-c) e dos últimos furos (Figuras 25d-e-f) executados pela fresa de metal duro recoberta por diamante, ficou evidente pelas imagens que houve o corte, mas a ferramenta não ultrapassou a amostra, por causa da pressão de penetração da fresa, com isto a amostra fletiu logo no primeiro furo, quebrando as arestas de corte. Com a perda na integridade da ferramenta os furos subsequentes ficaram deformados por conformação e não usinagem. Portanto ficou evidenciado que o rasgo do dispositivo de 35mm ficou muito grande, o que levou a usinagem de um novo dispositivo com o espaço mínimo e assim acabando com o problema de flexão da amostra.

A ferramenta não tendo um ângulo de ponta efetivo o esforço de corte aumentou em toda sua área de topo, pois como a área de contato é do tamanho do diâmetro da ferramenta, optamos em trocar a ferramenta para broca, para os testes seguintes, mesmo porque a intenção da utilização desta ferramenta seria por causa da cobertura diamantada reduzindo o desgaste por abrasão da fibra de vidro.

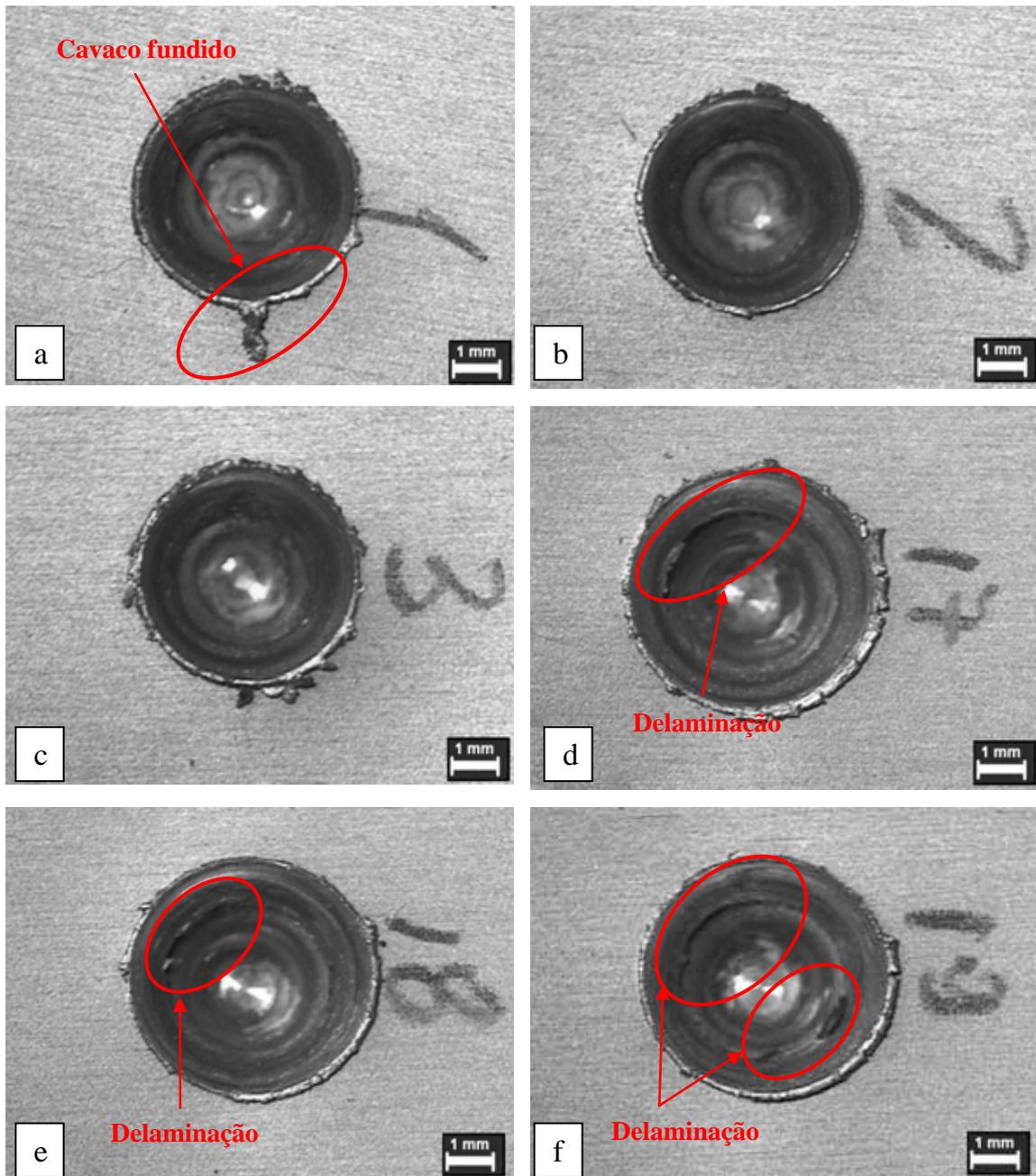


Figura 23 – Fotos dos furos executados na amostra para 1º. Ensaio: (a) furo nº1 (b) furo nº 2 (c) furo nº3 (d) furo nº17 (e) furo nº18 (f) furo nº19.

Nas (Figuras 26a-b), fica evidente que no topo do furo no corte e no percurso de penetração da fresa não houve a delaminação da amostra de compósito, ficando confirmada a necessidade de arestas de corte de topo resistente e a modificação do dispositivo de fixação de amostra.

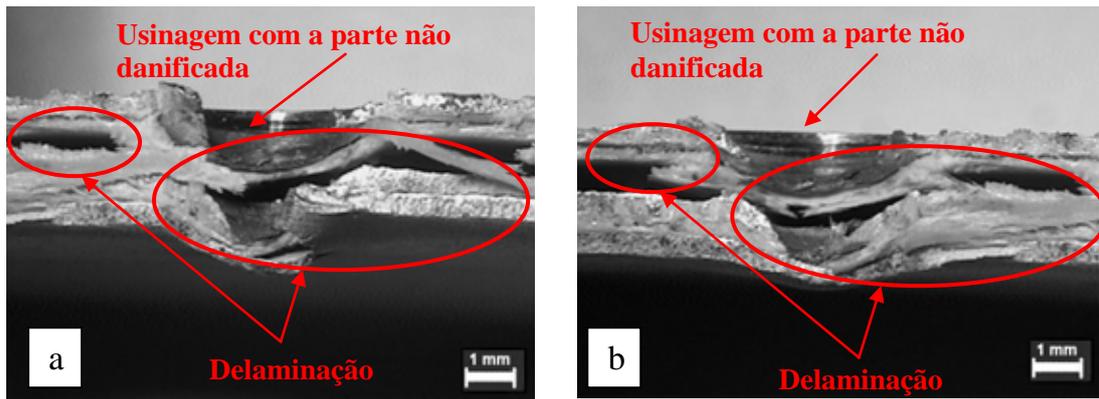


Figura 24 – Foto dos detalhes transversais dos furos; (a) furo n° 17 (b) furo n°19°

Nas (Figura 27a-b) é mostrada a lateral da fresa em duas posições diferentes e verifica-se que devido a flexão da amostra o furo prensou a ferramenta danificando as arestas laterais. Já na (Figura 28) é mostrado que a ponta da Fresa faz a função neste teste de conformador do furo, pois não transpassa a amostra.

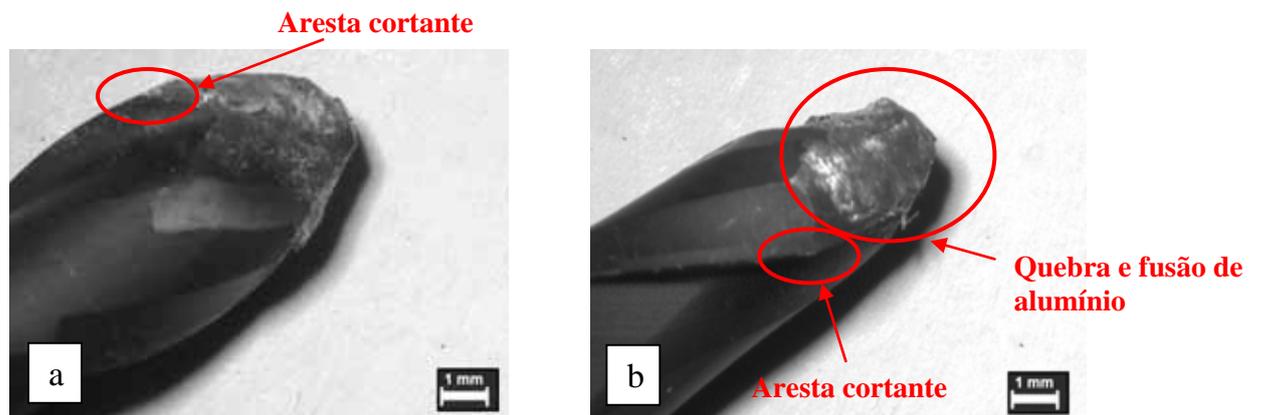


Figura 25 – Foto do detalhes laterais da fresa, (a) posição mostrando as arestas de frente, (b) mostrando as arestas restantes de lado.

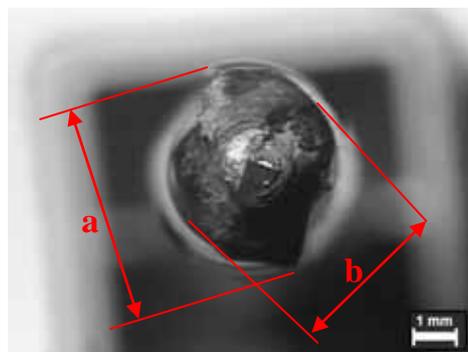


Figura26 – Foto de topo da Fresa

No 2º ensaio foi utilizada a broca de metal duro B01 sem refrigeração. Foi utilizado o dispositivo de fixação conforme a Figura 23 e os parâmetros utilizados conforme a Tabela 1.

De acordo com as Figuras 29a-b-c-d-e, verifica-se que a usinagem dos furos acontece, e também ocorrem dois defeitos: a delaminação e desfibramento do reforço de fibra de vidro da amostra. Isto mostra que o as fibras ficam muito mais deformadas por causa da pressão de avanço executada no momento da penetração e por causa da rotação baixa para as condições da fibra e do alumínio.

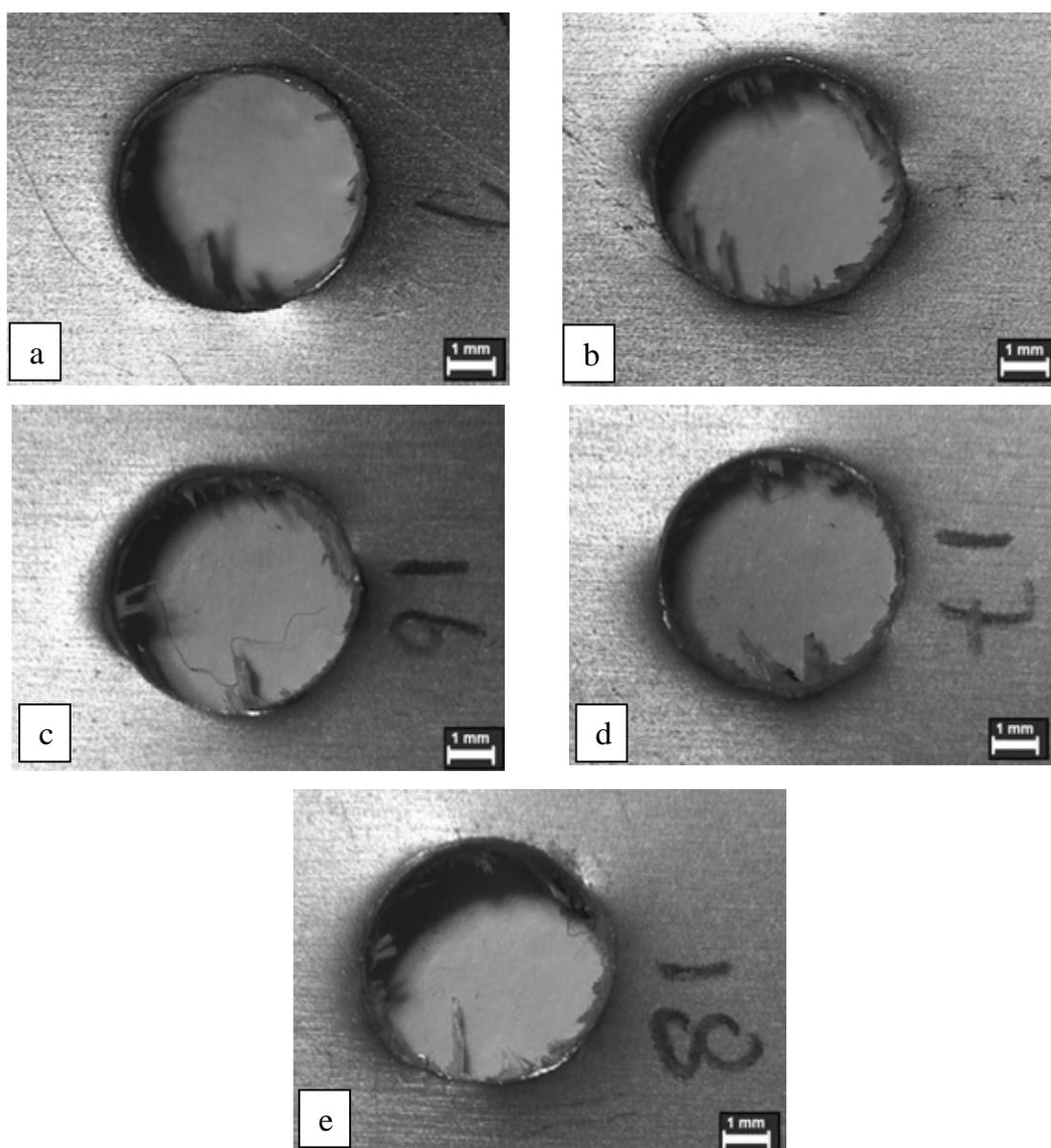


Figura 27 – Fotos dos furos executados na amostra para 2º. Ensaio: (a) furo n° 1 (b) furo 2 (c) furo 16 (d) furo 17 (e) furo 18

Conforme mostrado nas Figuras 29a-b-c-d-e, o aspecto do furo confirma que a usinagem da placa de alumínio foi feita, com uma deformação muito agressiva na de usinagem, além de ficar clara a delaminação e desfibramento das placas. Porém a usinagem total do furo fica assegurada, demonstrando a eficiência do novo dispositivo de fixação.

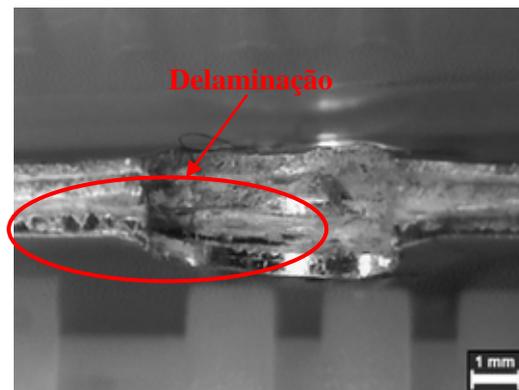


Figura 28 – Foto do corte transversal do furo nº3

Na Figura 30, fica evidenciado que houve um desgaste a brasivo na região de saída de cavaco da broca, mas com o novo dispositivo a broca não se quebrou. Já na Figura 31, nota-se o desgaste nas arestas de corte e observa-se que o material tem uma abrasividade alta, pois com poucos furos observa-se desgastes por abrasão comprometendo a integridade das arestas de corte.

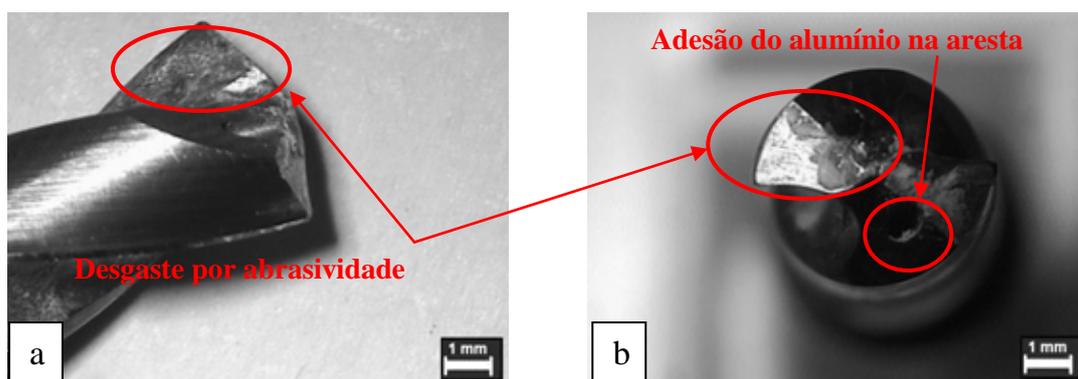


Figura 29 – Foto lateral da B03 (a) foto lateral e guias (b) topo com arestas de corte.

No 3º ensaio foi utilizada a broca de metal duro B02 com refrigeração. Foi utilizado o dispositivo de fixação conforme a Figura 15 e os parâmetros utilizados conforme a Tabela 1.

Conforme as Figuras 32a-b-c, verifica-se que a usinagem dos furos acontece, e também ocorrem dois defeitos a delaminação e desfibramento das fibras do material na amostra. Verifica-se que o fluido refrigerante de corte cumpriu sua função de reduzir a temperatura e melhorar o corte e acabamento do alumínio. Porém verifica-se também que a fibra sofreu uma mudança na sua coloração, que pode ser um prenúncio de contaminação da fibra. As contaminações do óleo refrigerante pode causar oxidação entre as placas de alumínio e o reforço de fibra. A grande quantidade de sílica encontrada no reforço de fibra acelera o processo de oxidação.

Por este resultado opta-se por não utilizar mais o fluido de corte nos próximos ensaios.

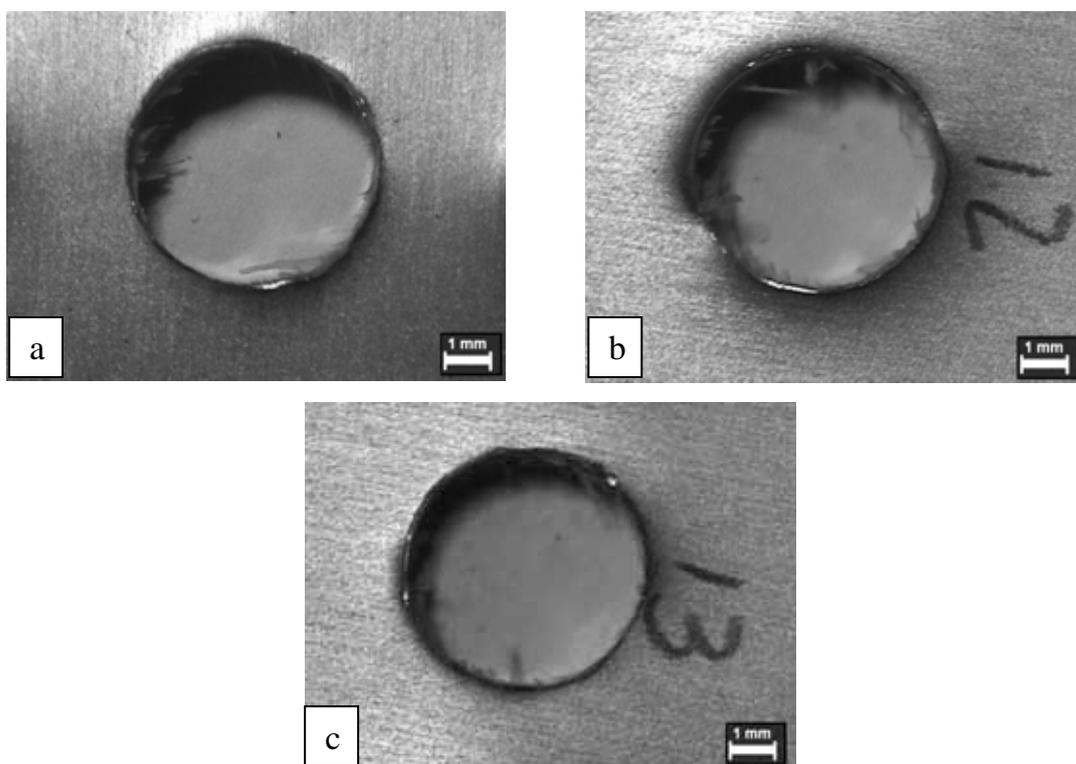


Figura 30 – Foto dos furos de cima (a) furo nº 1 (b) furo nº2 (c) furo nº3 .

Conforme a Figura 33, é mostrado que o resultado melhora a usinagem dos furos, por conta da influência do fluido refrigerante de corte, pois o acabamento superficial da amostras nas placas de alumínio foi melhor que no 2º ensaio.

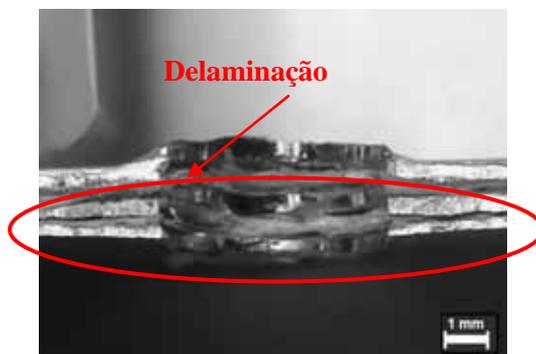


Figura 31 – Foto do corte transversal do furo nº 3 do ensaio 3.

Conforme (Figura 34a-b) observa-se que a ferramenta tem sinais de desgaste por abrasão, porém com uma área superficial menor, demonstrando a eficiência do fluido refrigerante.

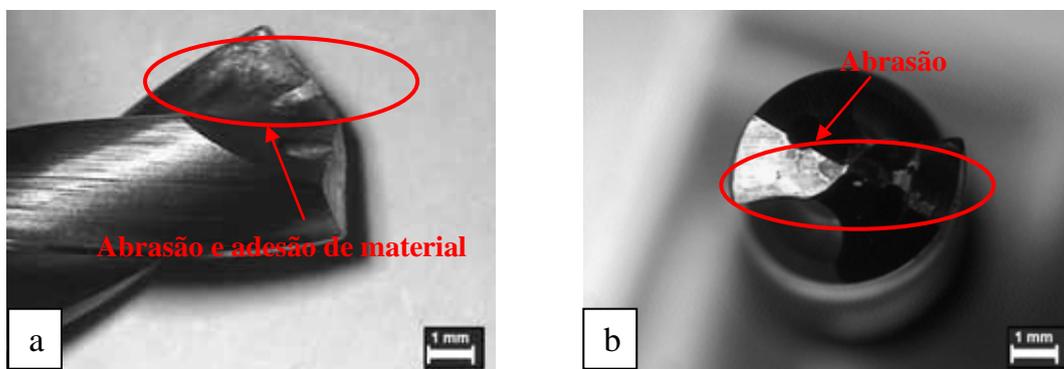


Figura 32 – Fotos lateral e de topo da B02:(a) lateral mostrando as guias (b) topo mostrando a aresta de corte.

No 4º ensaio foi utilizada a broca de metal duro, B01 sem refrigeração e os parâmetros de corte conforme a Tabela 1.

Nas Figuras 35a-b-c-d-e-f, visualiza-se que o furo apresenta um resultado de corte melhorado pela redução de 20% do avanço. Os furos apresentam uma ovalização, o desfibramento também é reduzido e a uniformidade dos resultados pode ser observada.

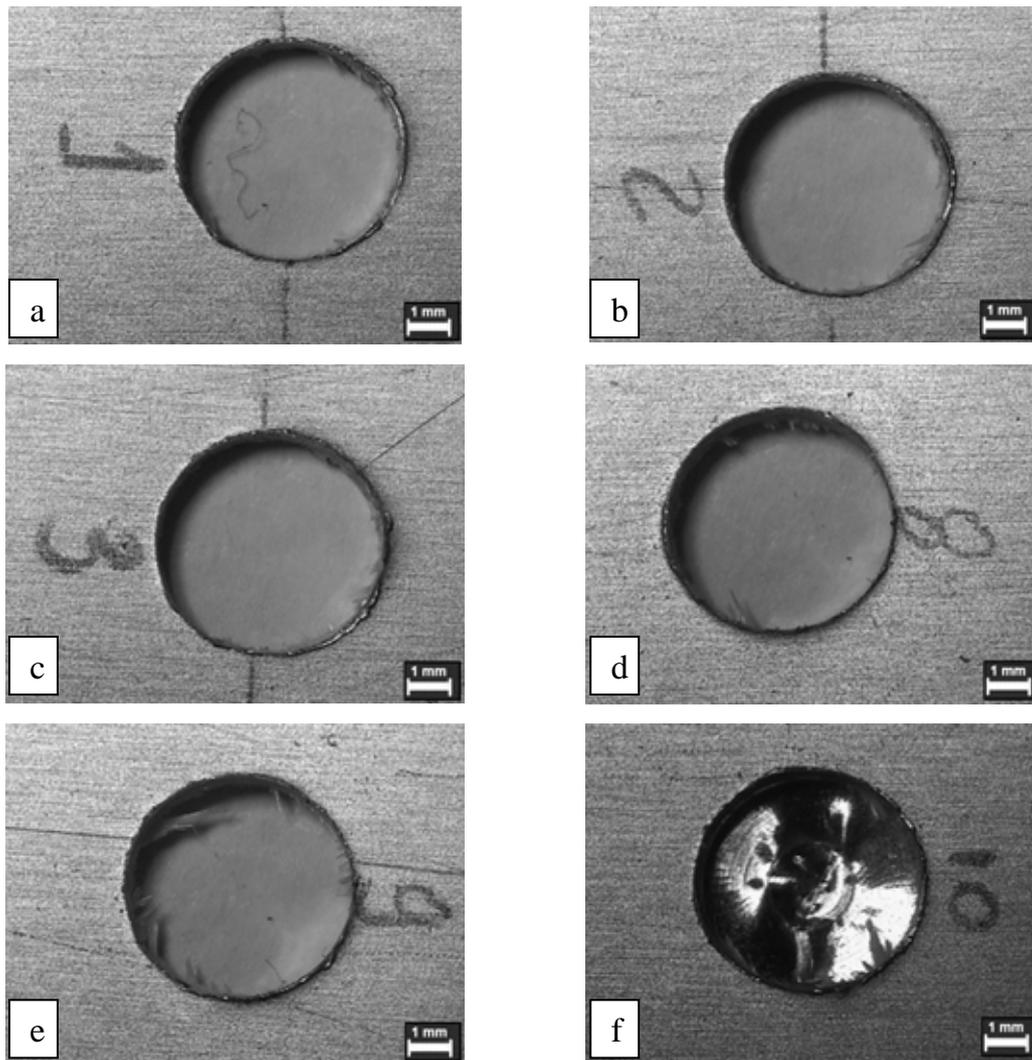


Figura 33 – Fotos os furos de cima: (a) furo nº1 (b) furo nº (c) furo nº3 (d) furo nº8 (e) furo nº9 (f) furo nº10

Analisando as Figuras 36a-b, pode-se comprovar que os furos foram usinados com uma melhor performance em relação ao corte do material, e também no quesito deformação do furo, por causa da pressão de corte transversal reduzida. Verifica-se que os resultados estão mais aceitáveis dos que os anteriores.

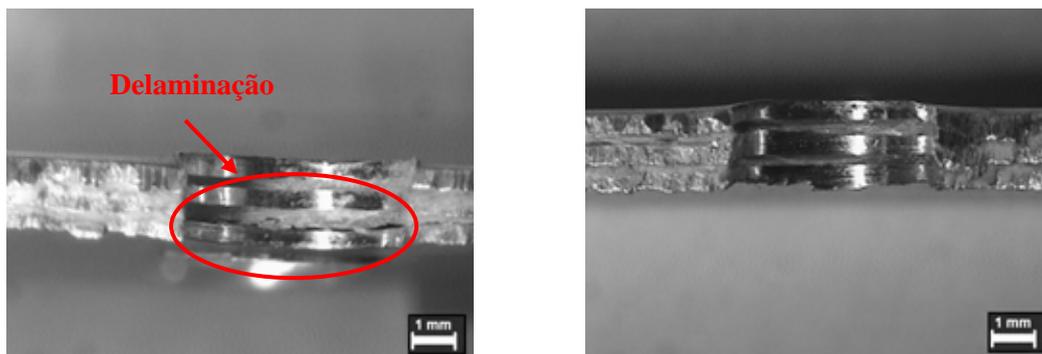


Figura 34 – Fotos do detalhe transversal do furo

Pode-se analisar pela Figura 37a, que representa a broca B01, mostrada na posição longitudinal, que as guias laterais da broca não apresentam desgaste significativo, mantendo-se a integridade da ferramenta. Já na Figura 37b, é mostrado o topo da broca onde pode-se localizar as arestas de corte e os ângulos de saída, confirmando o nível de integridade da ferramenta.

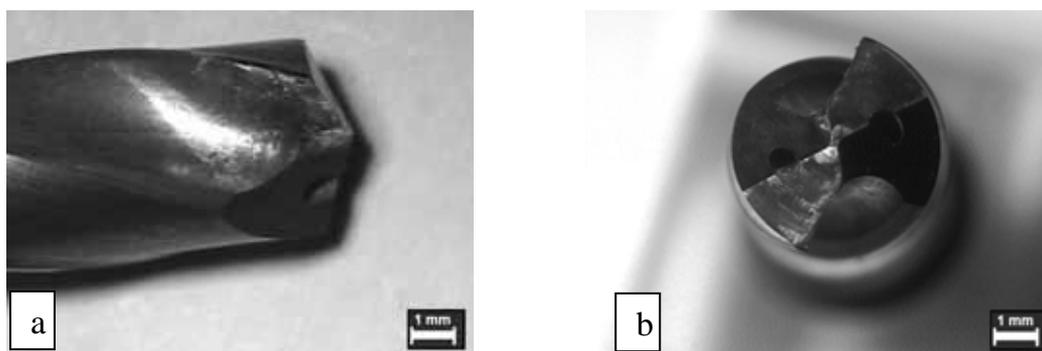


Figura 35 – Fotos da lateral e topo da B01: (a) foto lateral da broca (b) foto de topo da Broca

4.2 TESTES FINAIS

No 5º ensaio foi utilizada uma broca de metal duro (B04) sem refrigeração e com os parâmetros de corte conforme a Tabela 1.

Conforme as Figura 38a-b-c-d-e-f, verifica-se que aumentando a rotação do eixo árvore em 33% e mantendo-se o avanço como mostrado na Tabela 1, isto leva a um resultado favorável, demonstrando que o aumento na rotação para a furação foi fundamental, pois na documentação do ensaio é mostrado que os furos não se ovalizaram, a fibra de vidro foi cortada pelas arestas de corte e o

problema de delaminação também foi resolvido. Possivelmente com a rotação acima de 10.000 RPM, para a broca de diâmetro de 5mm, pode ocorrer uma diminuição da temperatura de corte fazendo com que não ocasione a fusão do material da amostra aderência na aresta de corte.

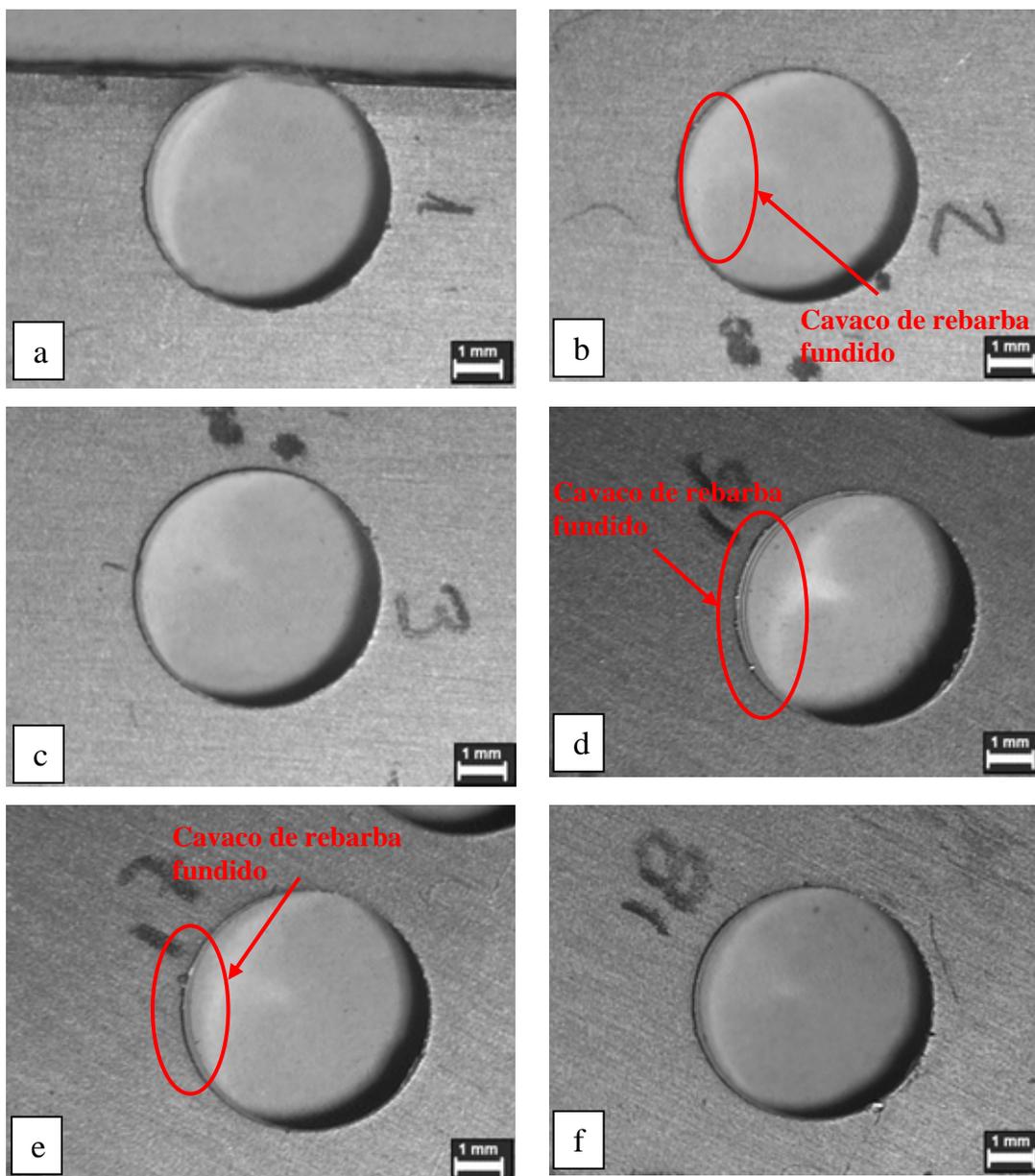


Figura 36 – Fotos dos furos de cima ensaio 5: (a) furo nº 1 (b) furo nº 2 (c) furo nº 3 (d) furo nº 16 (e) furo nº 17 (f) furo nº 18

Analisando a Figura 39a-b, observa-se que a usinagem do furo foi realizada adequadamente e o acabamento da usinagem no sentido transversal está dentro de padrões aceitáveis. Além de ficar evidente que o problema de desfibramento não ocorreu, ficando assim visível o corte da fibra e também ficando evidente que não houve nenhuma delaminação das placas. Todos os furos mantiveram o mesmo padrão.

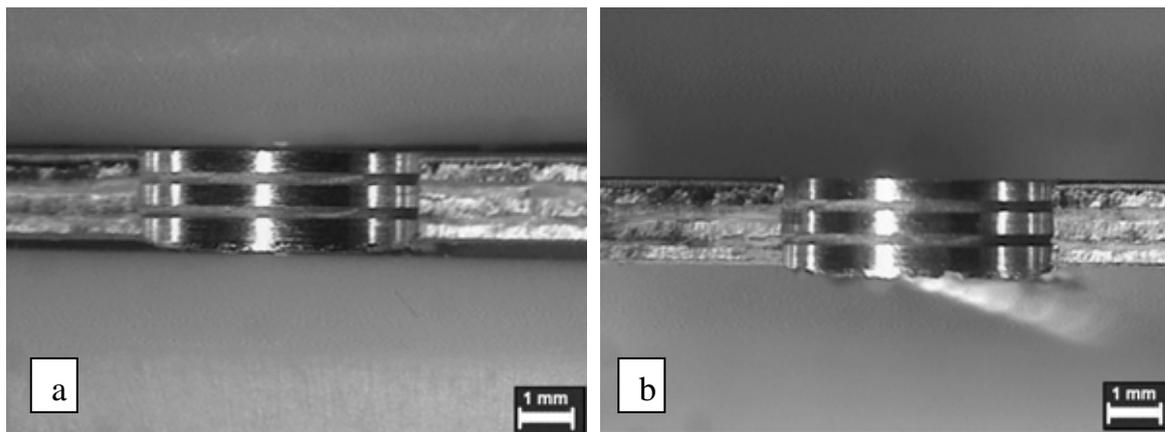


Figura 37 – Fotos dos furos em corte transversal: (a) furo nº3 (b) furo nº16

Conforme a Figura 40a-b-c, verifica-se que após a usinagem de 18 furos a integridade da broca, das guias laterais e da aresta de corte se manteve, ou seja, praticamente não se observa nenhuma avaria ou desgaste, apenas uma descoloração referente à abrasão no momento do corte da broca com o material. Observou-se no máximo uma leve adesão do material da amostra na broca conforme a Figura 40c, no canal de saída também há uma descoloração na ferramenta referente ao atrito de corte (Figura 40a-b).

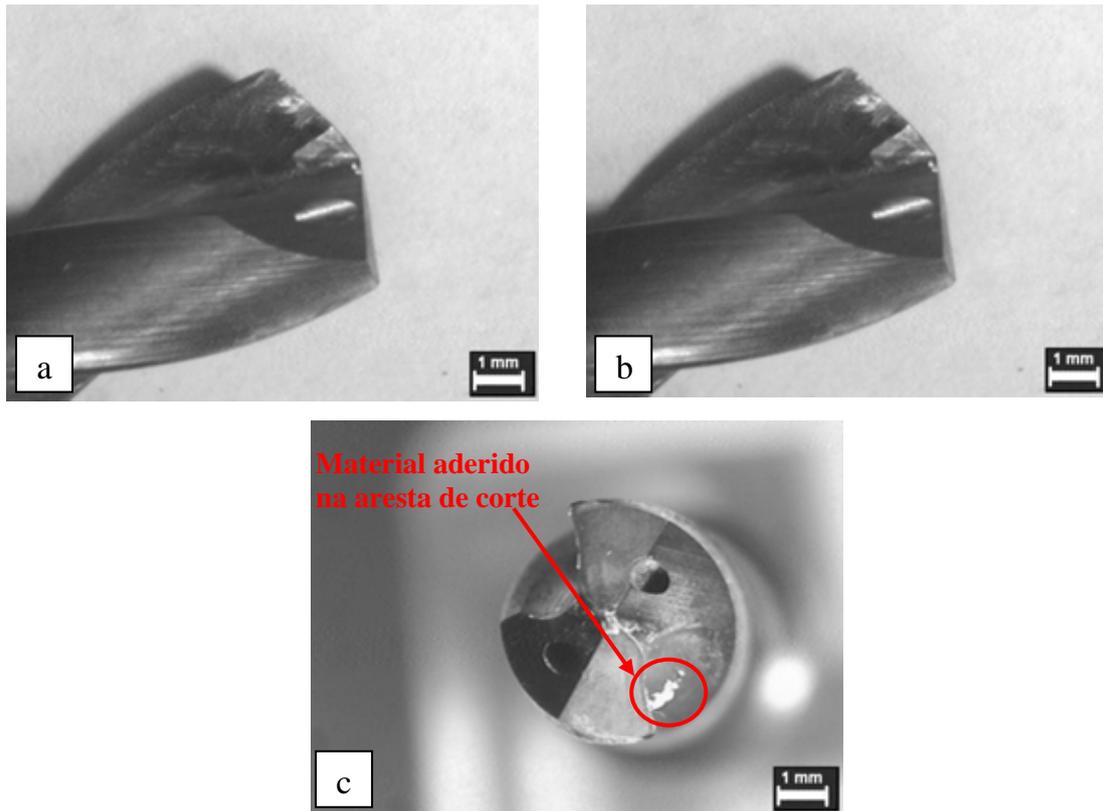


Figura 38 – Fotos da broca B04 ensaio 5: (a) posição longitudinal B04 (b) posição longitudinal com giro de 90° da B04 (c) topo da B04

No 6º ensaio foi utilizada uma broca de metal duro (B05), sem refrigeração e com os parâmetros de corte conforme a Tabela 1.

Para este ensaio foi aumentada a rotação do eixo árvore em 33% e a houve uma redução do avanço em 20% como mostrado na Tabela 1, o resultado conforme as Figuras 41a-b-c-d-e-f, mostrou que o aumento na rotação para a furação foi fundamental, pois a documentação do ensaio mostra que os furos não se ovalizaram e a fibra de vidro foi cortada pelas arestas cortantes da ferramenta. O problema de delaminação não foi mais identificado. Assim como no ensaio anterior, possivelmente a rotação de 10.000 RPM para a broca de diâmetro de 5mm faz com que a temperatura de corte diminua e assim não ocasione a fusão do material da amostra e aderência na aresta de corte. Na porção de fibra de vidro do compósito não se observa delaminação da mesma quando o material é cortado.

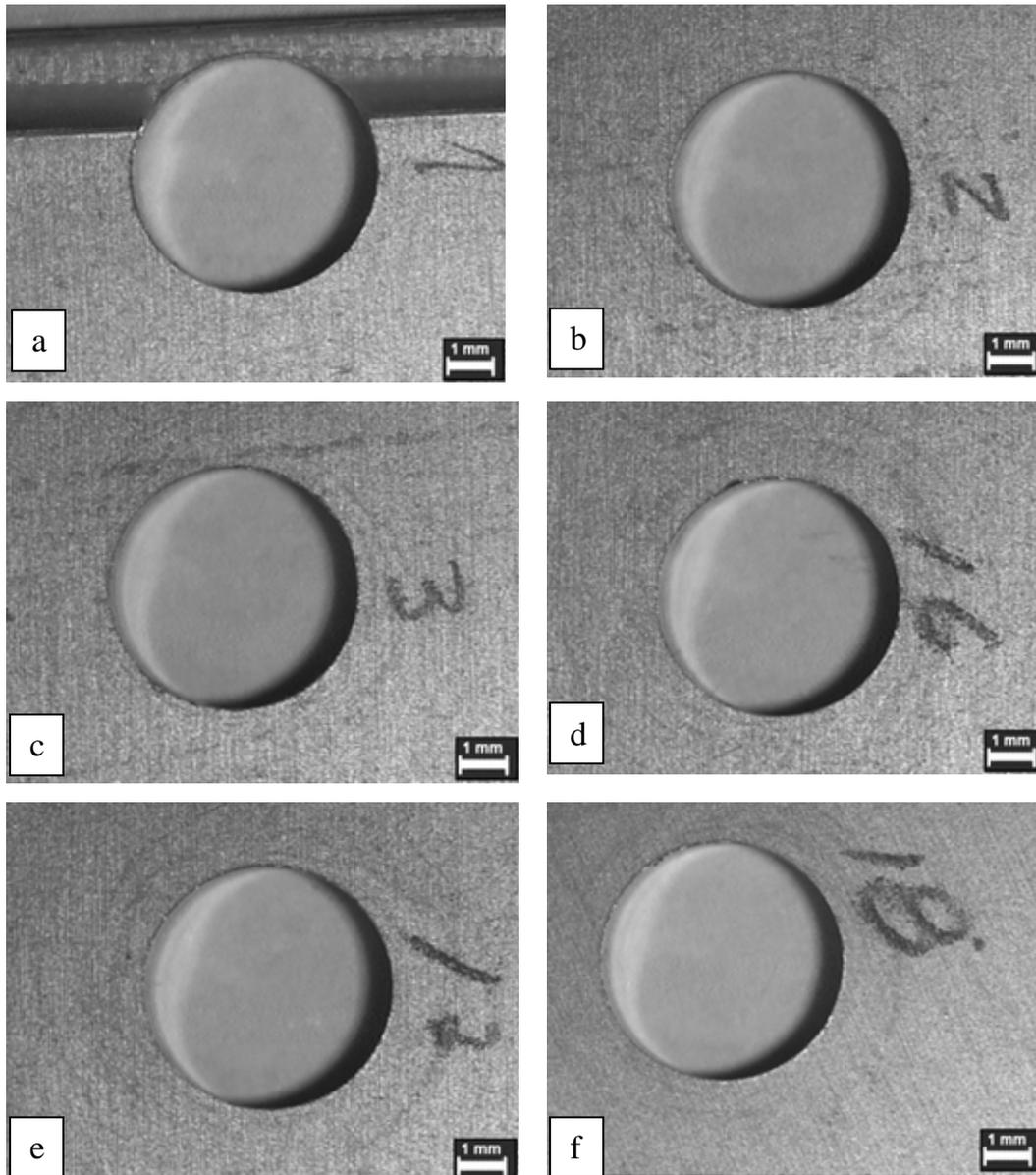


Figura 30 – Fotos dos furos vista de cima: (a) furo nº1 (b) furo nº 2 (c) furo nº3 (d) furo nº16 (e) furo nº17 (f) furo nº18.

Nas Figuras 42a-b, foi analisada a usinagem pelo aspecto transversal do furo. Observou-se que a mesma foi executada com um acabamento dentro dos padrões de furação, como mostrado na placa de alumínio. Já a porção de fibra de vidro não apresenta sinais de desfibramento, podendo também verificar que houve o corte uniforme do material. Outra informação importante a ser levada em consideração é quanto as entradas dos furos, as quais não apresentam rebarba (Figuras 41a-b-c-d-e-f), diferentemente do que ocorreu com os furos do 5°

ensaio, os quais apresentam uma rebarba fundida (Figuras 38a-b-c-d-e-f), isto pode demonstrar que nesta condição a temperatura de atrito no momento do corte está muito alta, ocorrendo assim a fusão da rebarba.

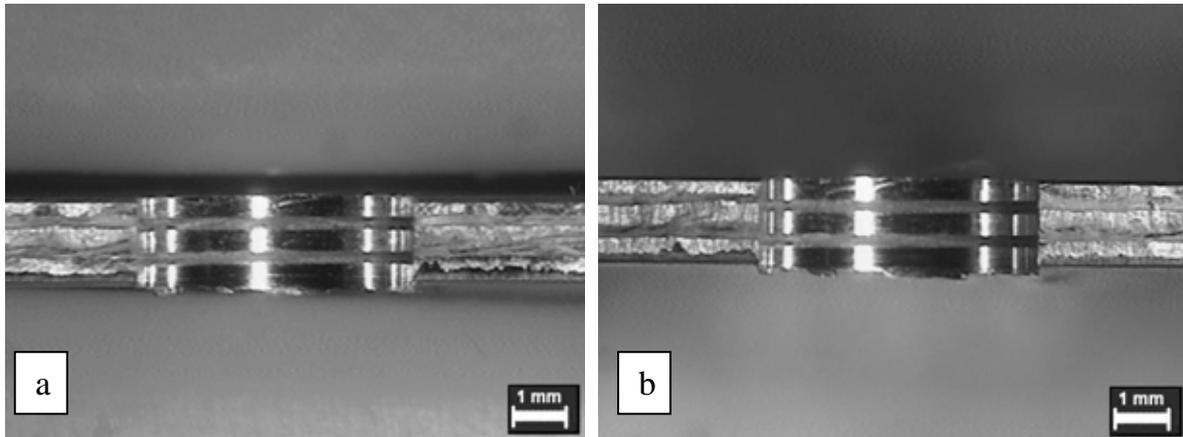


Figura 40 – Fotos do corte transversal dos furos: (a) furo n° 3 e furo n°16

Na Figuras 43a-b-c, é mostrado que o processo de furação com os parâmetros conforme a Tabela 1, não afetou a aresta de corte da **B05** e a quantidade de material aderido na ferramenta foi muito menor, como se pode visualizar na Figura 43c. O desgaste por abrasividade não aparece no canal de saída e também nas guias. Isto mostra como a ferramenta manteve a sua integridade, conforme as Figuras 43a-b.

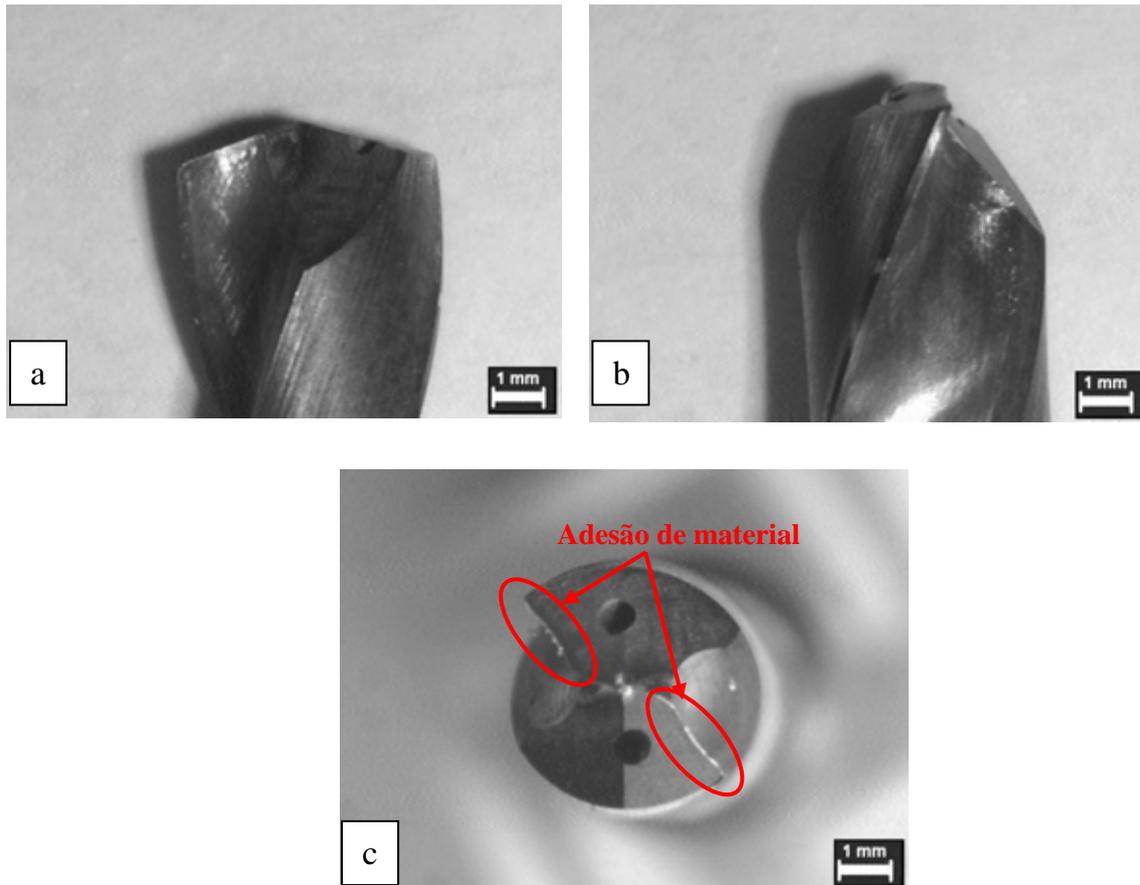


Figura 41 – Fotos da broca B05: (a) foto lateral da broca mostrando os canais de saída (b) foto lateral da broca mostrando a guia (c) foto do topo mostrando as aresta de corte.

Conforme mostrado nos ensaios 5 e 6 as condições e parâmetros de corte funcionaram, eliminando o principal defeito: a delaminação. Mas para se definir entre os dois resultados, foi tomada a análise dos “cavacos finais”, ou seja, do material do fundo do furo, e das características das ferramentas após o ensaio. Ainda precisava-se verificar a vida da ferramenta, para isto foi necessário definir os parâmetros corretos.

Analisando-se as Figura 44a-b-c-d, nas quais é mostrado o “cavaco final” da usinagem, pode-se concluir que os parâmetros do ensaio 5 em relação ao ensaio 6 (Tabela 1), produz provavelmente uma força de penetração maior, podendo-se então verificar que a ponta da broca rompe o cavaco, como mostrado nas Figuras 44c-d.

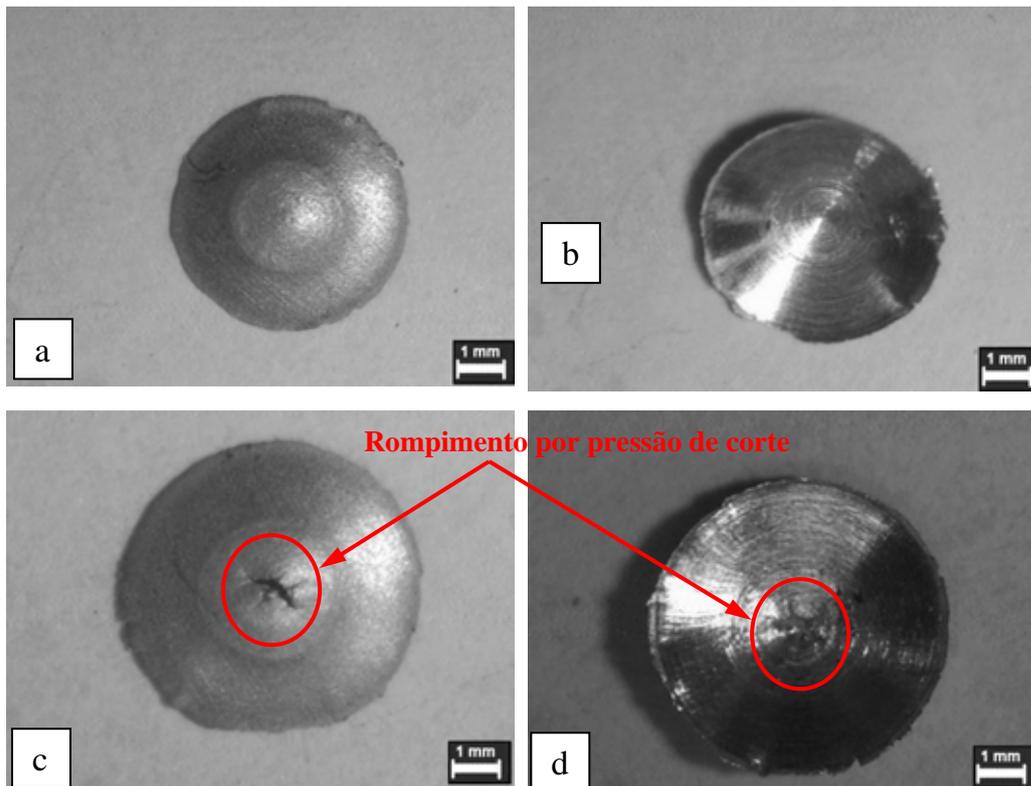


Figura 42 – Fotos do “cavaco final” dos furos ensaio 5 e 6: (a) parte externa do cavaco do ensaio 6 furo nº15 (b) foto interna do cavaco do ensaio 6 furo nº15 (c) foto externa do cavaco do ensaio 5 furo nº15 (d) foto interna do cavaco do ensaio 5 furo nº15.

No Ensaio 7 foi verificada a vida da ferramenta em trabalho, foi modificado o programa de usinagem aumentando a quantidade de 18 furos para 23 furos, e para se aproveitar melhor o material disponível, foram mantidos os parâmetros de corte de acordo com a Tabela 1. Executou-se o ensaio com a ferramenta **B05** que foi utilizada no ensaio 6, pois foi a melhor condição encontrada. Foram feitas dez placas no total para se verificar vida da ferramenta. Após a usinagem das dez amostras analisou-se a ferramenta para se verificar a ocorrência de desgastes ou avarias.

Nas Figura 45a-b-c-d-e-f, os furos mantiveram todas as características do Ensaio 6 (Figuras 41a-b-c-d-e-f), quando se verificou uma primeira amostragem.

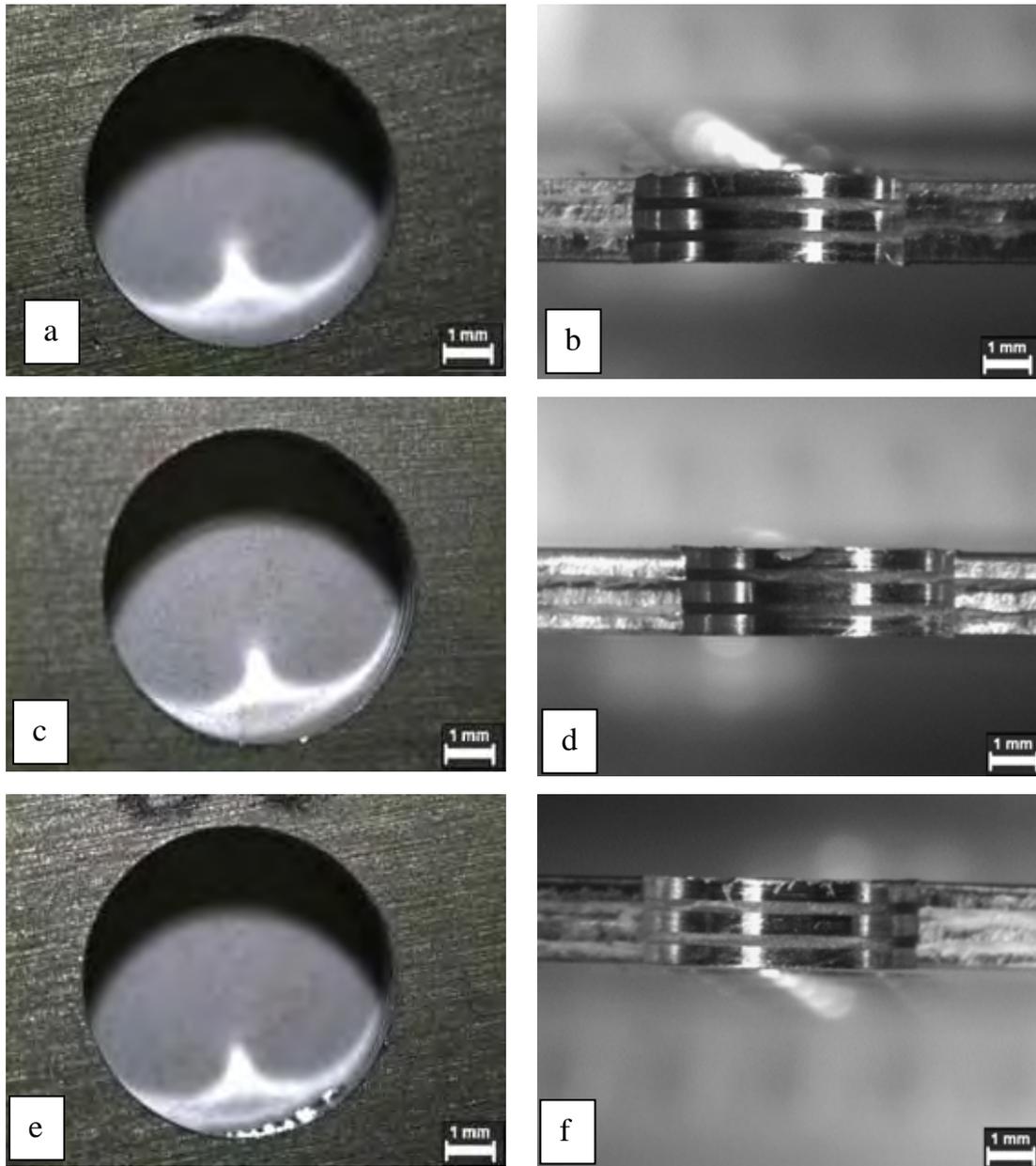


Figura 43 – Fotos dos furos da PL02 do ensaio 7: (a) furo nº3 visto por cima (b) furo nº03 vista interna (c) furo nº15 vista de cima (d) furo nº15 vista interna (e) furo nº23 vista de cima (f) furo nº23 vista interna.

Nas Figuras 46a-b-c-d-e-f, os furos continuaram mantendo todas as características do Ensaio 6 (Figura 41a-b-c-d-e-f). A análise da PL05 forneceu a informação de que o processo se manteve estável. até este momento já tinham sido realizados 110 furos com a ferramenta.

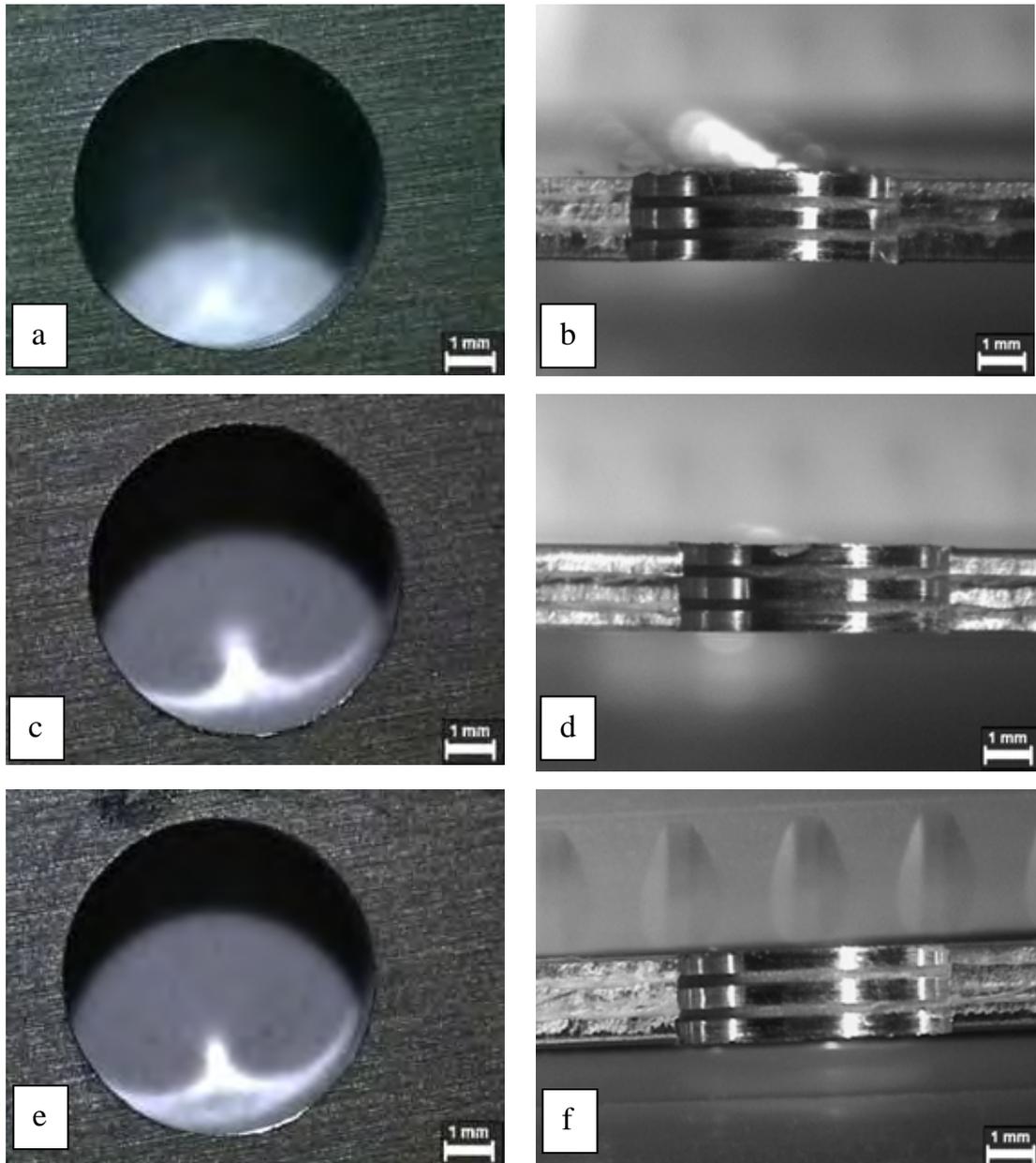


Figura 44 – Fotos dos furos da PL05 do ensaio 7: (a) furo nº3 visto por cima (b) furo nº03 vista interna (c) furo nº15 vista de cima (d) furo nº15 vista interna (e) furo nº23 vista de cima (f) furo nº23 vista interna.

Nas Figuras 47a-b-c-d-e-f, observa-se que os furos não tiveram alterações, e todas as características do ensaio 6 se mantiveram, como nas Figuras 41a-b-c-d-e-f, a análise da PL10 fornece um panorama segundo o qual o processo permanece estável. Os parâmetros utilizados permitiram a manutenção da integridade da ferramenta e da qualidade dos furos.

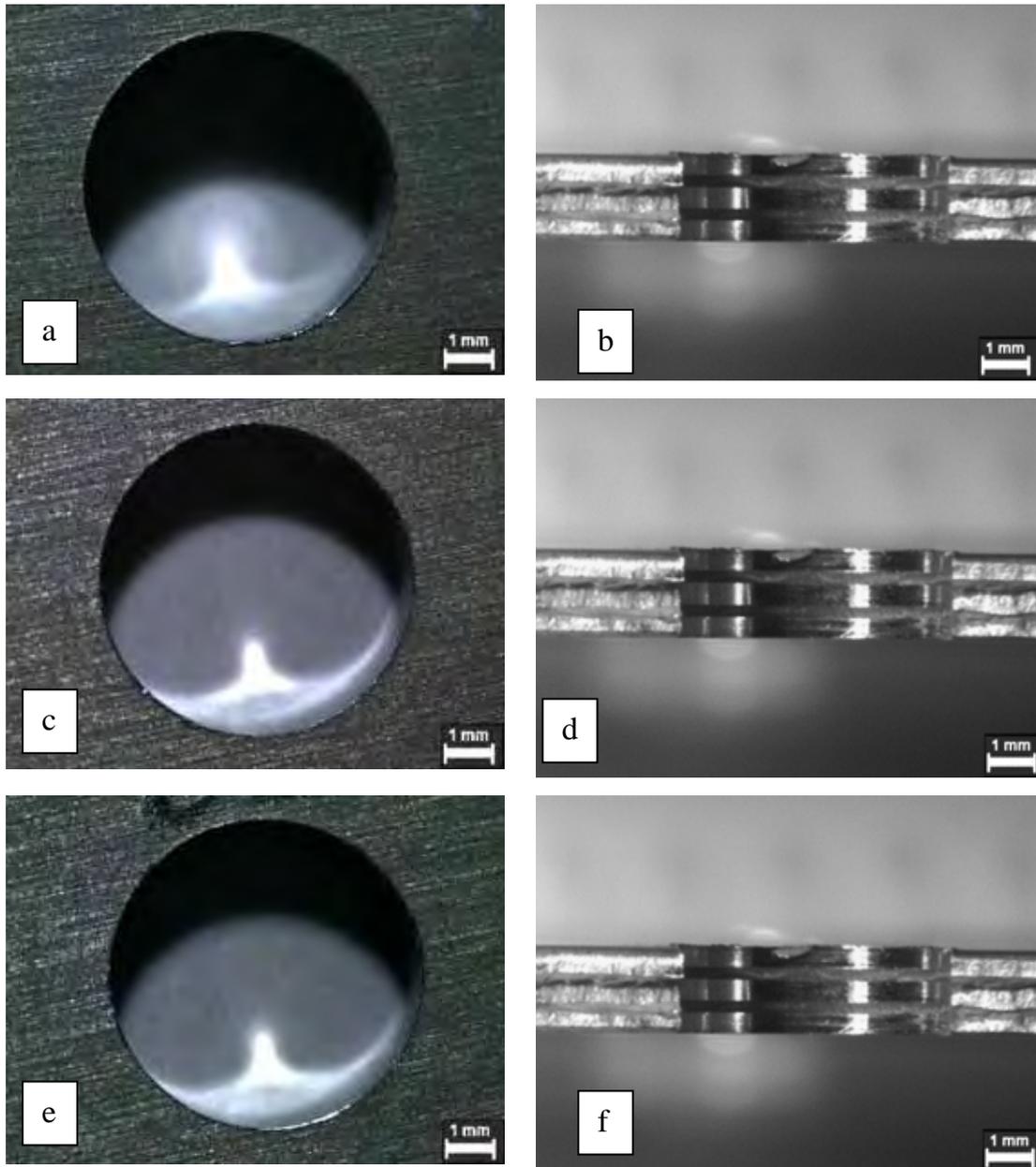


Figura 45 – Fotos dos furos da PL10 do ensaio 7: (a) furo n°3 visto por cima (b) furo n°03 vista interna (c) furo n°15 vista de cima (d) furo n°15 vista interna (e) furo n°23 vista de cima (f) furo n°23 vista interna.

Pelas Figuras 48a-b, ficou documentado que a ferramenta não apresentou nenhum desgaste ou avaria perceptível, permanecendo com boas condições de utilização. A aresta estava intacta e as guias também. Como mostrado na Figura 48, houve uma pequena adesão do material. Já na Figura 48b, pode-se verificar que a aresta de corte está intacta e o esbranquiçado na superfície de folga são os resíduos de fibra de vidro que aderiram na mesma.

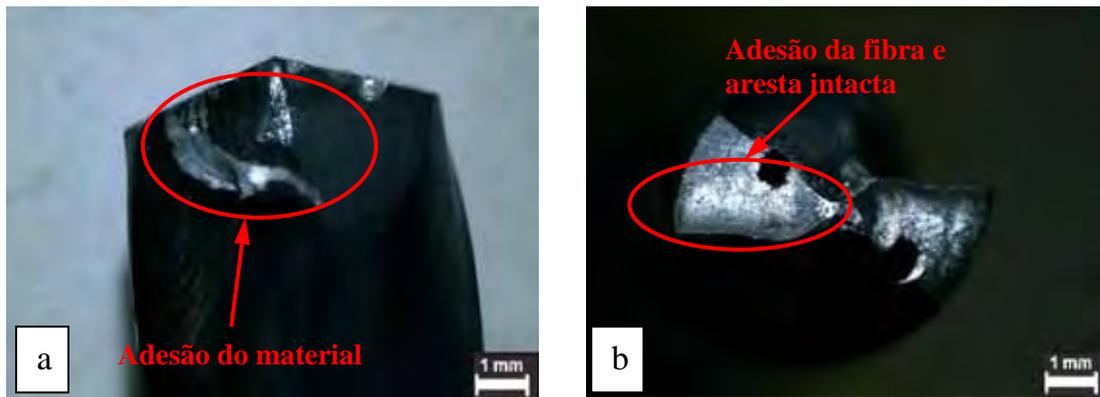


Figura 46 – Fotos da broca B05 utilizada no ensaio 7, após usinagem de 248 furos: (a) vista lateral da B05 e (b) vista topo da B05

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos ensaios preliminares (ensaios 1 ao 4) foi clara a ocorrência de todos os defeitos mencionados acima. Porém todos os resultados encontrados levam a perceber uma total dependência dos parâmetros de corte e também da fixação da amostra. Nestes ensaios foram utilizados parâmetros conforme a tabela do fabricante de ferramenta, pois a ferramenta começou a ditar as diretrizes dos ensaios.

Porém esbarra-se em outro problema que foi a capacidade da máquina disponível, que limitava muito mais a influência dos resultados. Pois, como na tabela do fabricante não existem parâmetros específicos para o material compósito, partiu-se dos parâmetros do material da matriz, o alumínio, o qual consta do catálogo.

Com os parâmetros de corte após 4 ensaios ficou claro que a escolha dos parâmetros era a parte fundamental no processo de furação para que o mesmo pudesse ser caracterizado. Foi disponibilizada então outra máquina, agora com a capacidade de rotação 33% maior. Com isto foi possível executar novos testes partindo do melhor resultado dos testes anteriores (Ensaio 3), foram mantidos os parâmetros de avanço de furação e elevada a rotação para o máximo permitido pela máquina.

O Ensaio 5 foi muito proveitoso, pois nele a amostra não apresentou dois defeitos sendo um deles o principal a delaminação e o outro a desfibramento do reforço de fibra de vidro. O desgaste a ferramenta também não teve e a adesão de material na aresta de corte foi muito pequena. Porém o que se verificou é que a pressão de avanço transversal estava muito alta, pela ruptura no local de ponta da ferramenta no cavaco final da furação como é mostrado na Figura 4.25.

Reduziu-se o avanço transversal de corte em 20%, e executou-se o Ensaio 6, e o que se verificou foi que não houve mais desgastes por abrasividade nem adesão de material na aresta de corte conforme pode ser verificado pelas imagens da ferramenta. Quanto ao furo da amostra, foi uniformidade e não apresentou ovalização, não ocorreu o desfibramento e assim como não ocorreu o principal problema a delaminação, verificou-se também que a com a redução da força transversal de corte as placas de alumínio e fibra de vidro mantiveram intactas, e que as placas de alumínio serviram de reforço para o melhor corte da fibra de vidro. Com isto não houve o desfibramento do reforço de fibra de vidro.

Após estes resultados e a integridade ferramenta, foi executados o Ensaio 7, onde a análise foi a vida em trabalho da ferramenta, e quantos furos ela executaria.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os ensaios executados, revela-se que o problema de delaminação do material compósito é o mais crítico. Porém verificam-se outros problemas que também influenciam na qualidade e funcionabilidade do furo, como o desfibramento da fibra de vidro, fusão do material na ferramenta de furação, desgaste abrasivo da ferramenta, e contaminação por fluido refrigerante.

Com os resultados obtidos do ensaio 6, ficou demonstrado que estes parâmetros eliminam os defeitos do processo de furação e principalmente que a pressão de corte na amostra dificultaria o problema de empenamento da mesma.

Verificou-se então depois de se furar dez placas, sendo nove com 23 furos e uma com 18 furos, totalizando 248 furos, com os parâmetros de corte do Ensaio 6, que a ferramenta não apresentou nenhum desgaste ou avaria aparente, estando pronta para ser utilizada na continuidade de furação até o desgaste final. E os furos todos mantendo todas as características de excelente qualidade visual e dimensional.

Portanto identificou-se que a velocidade de corte ideal para este tipo de material é a V_c 157m/mim, não se descuidando de uma boa fixação do material a ser usinado.

Conclui-se então que para as condições utilizadas a broca comercial de metal duro, consegue apresentar um bom desempenho na furação do material compósito GLARE®.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRATE, S. **Machining of Composite Materials**, Composites Engineering

ALDERLIESTEN, R.C.; HOMAN, J.J. **Fatigue and damage tolerance issues of Glare in aircraft structures**, International Journal of Fatigue, v.28, n.10, p.1116-1123, Oct. 2006.

AMBROZIO FILHO, F.; ROSSI, J.L.; GONÇALVES, M.; GOLDENSTEIN, H.; SOUZA, R. M.; YOSHIMURA, H. N. **Desenvolvimento de compósitos de matriz metálica**, Metalurgia e Materiais, Abril/96. p 248-252.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Designation ASTM-D7264M-07: **Standard test methods for flexural properties of polymer matrix composite materials**, ASTM International Handbook, 2007.

ATAS, C. **An experimental investigation on the impact response of fiberglass/aluminum composites**, Journal of Reinforced Plastics & Composites, v.26, n.14, p.1479-1491, Sep. 2007.

BAYER, R. **Mechanical Wear Prediction and prevention**, Marcel Dekker First. Edition, 1994. P1-4

BERNHARDT, S.; RAMULU, M.; KOBAYASHI, A.S., **Low-velocity impact response characterization of a hybrid titanium composite laminate**, ASME Journal of Engineering Materials & Technology, v.129, n.2, p.220-226, Apr. 2007.

BEUMLER, T.; STAIKOV, R.; GENNAI, A.; SENATOROVA, O.; **Controlling the damage with fiber-metal laminate structures**, In: Proceedings of the 1st International Conference on Damage Tolerance of Aircraft Structures, TU Delft, The Netherlands, Paper 32, Sep. 2007.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. **O usos de compósitos estruturais na indústria aeroespacial**. Polímeros: ciência e tecnologia, v 10, n 2, p. E4-E10, Apr./June 2000. Disponível em <[Http/WWW.scielo.br/pdf/pó/v10n2/3106.pdf](http://WWW.scielo.br/pdf/pó/v10n2/3106.pdf)>.

BOTELHO, E.C.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. **Evaluation of hygrothermal affects on the shear propperties of Carall composites.** Materials Science and Engineering A. v. 452-453, p. 292-301, Apr, 2007.

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

Catálogo & Guia Técnico fresas sólidas, Mini Diamond – SECOTOOLS Industria e comércio LTDA, 2008

Catálogo & Guia Técnico holemaking, SECOTOOLS Indústria e comércio LTDA, 2008

CHAWLA, K. K. **Composite Materials Science and Engineerring,**. New York, Springer Verlag, 1987.p3-5.

CLYNE, T. W.; WITHERS, P. J. **An introduction to Metal Matrix Composite,** Cambridge University Press 1993. P 1-3.

CORTÉS, P., CANTWELL, W.J., **The impact properties of high-temperature fiber-metal laminates,** Journal of Composite Materials, v. 41, n.5, p.613-632, 2007.

CUNHA, JOSÉ A. P. **Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos nas propriedades mecânicas de compósitos d fibra de carbono/epóxi,** 2010.239f, Tese de Doutorado em Física e Química dos Materiais aeroespaciais – ITA , São José dos Campos.

DAMATO, C. A., **Processamento e caracterização mecânica de laminados Híbridos Metal/Fibra com matriz termoplástica,** 2010, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Materiais.

DIN 50320, **Análise sistemática dos processos de desgaste. Classificação dos fenômenos de desgaste**, Traduzido do original para a o português, Metalurgia e Mateirais, 1997. P 619-22.

DIN 50321, **Wear Measuring quantities**, 1979.

DURÃO, L. M.; MARQUES, A. T.; MAGALHÃES, A. G.; BAPTISTA, A. M. **maquinagem de materiais compósitos de matriz polimérica**,

ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK, Vol. 1 **Composites** , Sec. 9, Solid Tool Machining and Drilling, ASMInternational, 1987

E. Enemuoh, U., Sherif El-Gizawy, A. and Chukwujekwu Okafor, A., **An Approach for Development of Damage-Free Drilling of Carbon Fiber Reinforced Thermosets**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(12), 1795-1814 (2001)

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Vol 1, Ed. Edgard Blücher, 1970. P XXV-XLIV/566-568.

GAHR, K. H. Z. – **Microstructure and Wear of Materials** – (Tribology series 10) – Elsevier – 1987. p 1-7.

GERE, J.M. **Mechanics of materials**, 7 ed, Toronto, Cengage Learning, 2009.

HOO FATT, M.S., LIN, C., REVILOCK, Jr. D.M., HOPKINS, D.A., **Ballistic impact of Glare fiber-metal laminates**, Composite Structures, v.61, n.1-2, p.73-88, Jul. 2003.

HOSSEINZADEH, R., SHORKRIEH, M.M., LESSARD, R., **Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts**, Composite Science & Technology, v.66, n.1, p.61-68, Jan. 2006.

JESUS, E. R. B, **Obtenção, usinagem e desgaste de materiais compósitos de matriz metálica processo via metalurgia do pó**, Dissertação de Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais – Universidade de São Paulo.

JOST, H.P, **Tribology-origin and future** – Wear 136 (1990) 1-17.

KALTHOFF, J.F., **Characterization of the dynamic failure behaviour of a glass-fiber/vinyl-ester at different temperatures by means of instrumented Charpy impact testing**, Composites: Part B: Engineering, v.35, n.6-8, p.657-663, September-December 2004.

KANG, H., **Fatigue prediction of lightweight thermoplastic fiber-metal laminates**, Journal of Testing and Evaluation, v.35, n.3, p.266-271, May 2007.

LANNING, D.B., **The residual fatigue strength of 2024-T4 with foreign object damage**, In: Proceedings of the 9th International Fatigue Congress, Atlanta-GA, USA, May 2006. Abstract Ref. FT380, 2006.

MARCONDES, F. C, **A História do Metal Duro** – Sandvik – 1a. edição – Unidas Artes Gráficas e Editoras LTda – 1990. p 27-28 Materials Science – 26(1991).p5965-78.

MATHEUS,F.L.;RAWLINGS,R.D, **Composite materials: engineering and Science** – Chapman & Hall – 15t edition – 1994.p 3-8.

MCKOWN, S., CANTWELL, W.J., JONES, N., **Investigation of scaling effects in fiber-metal laminates**, Journal of Composite Materials, v.42, n.9., pp.865-888, 2008.

MITREVSKI, T., MARSHALL, I.H., THOMSON, R., **The influence of impactor shape on the damage to composite laminates**, Composite Structures, v.76, n.1-2, p.116-122, Oct. 2006.

MOURISCO, A. J. - **Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio1100 com partículas de SiC por metalurgia do pó** - Dissertação de mestrado - IPEN-USP – 1995. p 5-9/34-35.

MOSSE, L., COMPSTON, P., CANTWELL, W.J., CARDEW-HALL, M., KALYANASUNDARAM, S., **The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre-metal laminates**, Composites: Part A, v.36, n.8, p.1158-1166, Aug. 2005.

MOSSE, L., COMPSTON, P., CANTWELL, W.J., CARDEW-HALL, M., KALYANASUNDARAM, S., **Stamp forming of polypropylene based fibre-metal laminates: the effect of process variables on formability**, Journal of Materials Processing Technology, v.172, n.2, p.163-168, Feb. 2006. Schwartz, M.M. – Composite Materials Handbook – Mc Graw Hill – 1983.p1.1-1.3.

PERSSON, E.; ERIKSSON, I.; ZACKRISSON L, **Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates**, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 28, 2, 141-151, 1997.

SRICVATSAN, T. S.; IBRAHIM, I. A.; MOHAMED, F. A.; LAVERNIA, E. J. – **Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composite** – J. of Materials Science – 26 (1991). P 5665-78.

TAGLIAFERRI,V., CAPRINO,G., DITTERLIZZI, A. – **Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites** - Int. Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.30,1990, pp. 77-84

TARPANI, J.R., ANGELONI, M., IEZZI, L., CASTRO, C.E.G., **Fadiga após múltiplos impactos em laminados carbono-epóxi**, Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.2, n.4, p.63-70, Abril-Junho 2006.

TAYA, M; ARSENAULT, R. J, **Metal Matrix Composites Thermomechanical Behavior** – Pergamom Press – 1989. P 5-8/209-221

VOGELESANG, L.B., VLOT, A., **Development of fiber-metal laminates for advanced aerospace structures**, Journal Materials Processing & Technology, v.103, n.1, p.1-5, Jun. 2000.

WERN, C.W.; RAMULU, M. AND SHUKLA, A., **Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fiber-Reinforced Plastics**, Experimental Mechanics, pp. 33 – 41, 1994