

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE MARIN

**ANÁLISE DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**

**CAXIAS DO SUL
2016**

FELIPE MARIN

**ANÁLISE DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção de grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação

Supervisor: Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2016

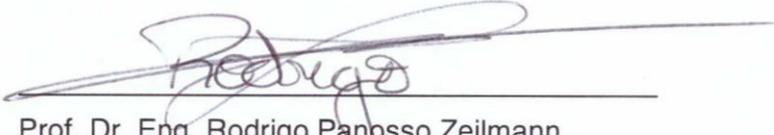
FELIPE MARIN

**ANÁLISE DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO PROCESSO DE FURAÇÃO DE
COMPÓSITO POLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**

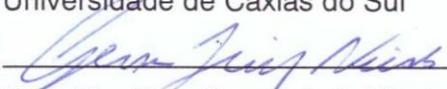
Trabalho de conclusão de curso da disciplina de Estágio II apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção de grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Processos de Fabricação

Aprovado em: 30 / 6 / 2016

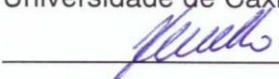
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Me. Eng. Gerson Luiz Nicola
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Me. Eng. Ivandro Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Expresso agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann, pela oportunidade, dedicação e conhecimento transmitidos durante todos momentos de sua orientação neste trabalho.

Ao Prof. Me. Gerson Luiz Nicola, técnico do centro integrado de manufatura do bloco D – UCS, pelo apoio técnico para a realização dos ensaios de furação.

À Plasmosul indústria de plásticos LTDA, pelos corpos de prova e ferramentas fornecidos para os testes.

De forma muito especial, agradecer à minha família pela compreensão em entender minha ausência neste período e pelo incansável apoio e motivação na realização deste trabalho.

RESUMO

Na busca constante da substituição de materiais com objetivo de obter melhores propriedades cresce a utilização de materiais compósitos. Dentre estes compósitos destaca-se o compósito polimérico reforçado com fibras de vidro (PRFV), o qual é utilizado em grande escala na indústria automotiva para fabricação de peças técnicas. Na maioria dos casos estas peças são produzidas na sua forma final, entretanto, ocorrem necessidades de posterior fixação ou montagem destas peças, dependendo diretamente de operações de usinagem, como a operação de furação. A furação destes compósitos é considerada complexa, devido à baixa condutividade térmica e natureza muito abrasiva do compósito, resultando em um desgaste muito prematuro das ferramentas utilizadas. Ocorrem também frequentes defeitos, como a delaminação na entrada e saída do furo. Este trabalho teve como objetivo analisar os desgastes das ferramentas no processo de furação de placas de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro. Nos ensaios práticos foram utilizadas brocas helicoidais de aço rápido, com diâmetro de 6,0 mm. Estas ferramentas foram separadas em dois grupos, o primeiro de brocas sem revestimento e o segundo com brocas possuindo revestimento de nitreto de titânio. Nos testes manteve-se o parâmetro de avanço constante em 0,2 mm/rot e utilizou-se para velocidades de corte 40 e 80 m/min. Os resultados mostraram que há elevada vantagem no uso de brocas com revestimento de TiN sobre as mesmas sem revestimento para a usinagem de compósitos PRFV. Observou-se também que a abrasão foi o principal desgaste observado durante os ensaios, já nos corpos de prova verificou-se nitidamente defeitos de delaminação à saída dos furos. Finalmente, os melhores resultados, no que tange os desgastes ocorridos, foram constatados com as brocas que possuíam revestimento de TiN e menores valores de velocidade de corte.

Palavras-Chave: Furação. Materiais Compósitos. PRFV. Desgaste.

ABSTRACT

In constant search for replacement materials in order to obtain better proprieties, the use of composite material rises. Among these composites, stands out the glass fiber reinforced polymer composites (GFRP). It is used widely in the automotive industry to the manufacture of technical parts. In most cases these parts are manufactured in their final form, however, some may need a subsequent attachment or mounting, depending directly of from machining operations, such as drilling. The drilling of these composites is considered to be complex due to the low thermal conductivity and abrasive nature of the composite, resulting in a very premature wear of the tools used. Also, is frequent to occur defects such as delamination at the input and at the output of the hole. This study aimed to analyze the wear of tools when drilling the plates of glass fiber reinforced polymer composites. In practical tests, were used twist drills of high speed steel with a diameter of 6.0 mm. These tools were separated into two groups: the first, drills without coating and, the second, drills with titanium nitride coating. In the tests, the feed rate parameter remained constant in 0,2 mm/rev, already to cutting speeds used were of 40 and 80 m/min. Results showed that there is a high advantage in using drills with TiN coating, over those without coating for the manufacturing of GFRP composite. Also, is clear that the abrasion was the main wastage observed during the tests, on the testing specimens, the defect was mainly on the delamination at the output of the hole. Finally, the bests results, regarding the wear occurred, were noticed on the drills that had TiN coating and lower cutting speed values

Keywords: Drilling. Composites Materials. GFRP. Tool Wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capô de trator em compósito PRFV pelo processo de <i>spray-up</i>	11
Figura 2 – Esquema de classificação dos vários tipos de compósitos	14
Figura 3 – Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatórias.....	15
Figura 4 – Técnicas de processos de fabricação de compósitos termofixos	20
Figura 5 – Forma construtiva de uma broca helicoidal cônica.....	21
Figura 6 – Causas de desgastes no processo de usinagem	25
Figura 7 – Delaminações (a) à entrada, (b) à saída	28
Figura 8 – Desgastes de broca helicoidal	29
Figura 9 – Corpo de prova ensaiado no pré-teste	31
Figura 10 – Brocas helicoidais de aço-rápido (a) sem revestimento e (b) com revestimento TiN	33
Figura 11 – Desgaste máximo de flanco de broca com revestimento TiN ensaiada no pré-teste	34
Figura 12 – Resultados de desgastes de flanco máximo	35
Figura 13 – Repetitividade dos resultados de desgastes de flanco	36
Figura 14 – Desgastes analisados na broca A.....	37
Figura 15 – Desgastes analisados na broca RA1	38
Figura 16 – Desgastes analisados na broca B.....	39
Figura 17 – Desgastes analisados na broca RB1	40
Figura 18 – Desgastes analisados na broca C.....	41
Figura 19 – Desgastes analisados na broca RC1	42
Figura 20 – Efeito de delaminação à saída apresentada nos corpos de prova	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de vários materiais utilizados como reforços.....	17
Tabela 2 – Composições de fibras de vidro de reforço	18
Tabela 3 – Máximas temperaturas para uso contínuo de resinas termofixas e termoplásticas	19
Tabela 4 – Composição e características dos aços rápidos.....	23
Tabela 5 – Propriedades mecânicas e técnicas da resina UC-2095-20 <i>UCEFLEX®</i>	32
Tabela 6 – Propriedades mecânicas da manta de fibra de vidro M710B <i>Advantex®</i>	32
Tabela 7 – Parâmetros de corte para ensaios de furação	34
Tabela 8 – Intervalo de medição de desgastes de ferramentas	34

LISTA DE SIGLAS

CCD	<i>Charge coupled device</i>
CMP	Compósito de matriz polimérica
CNC	Comando numérico computadorizado
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
LTDA	Limitada
PRFV	Polímero reforçado com fibra de vidro
PVD	<i>Physcial vapor deposition</i>
RTM	<i>Resin Tranfer Molding</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte
d	Diâmetro da broca
n	Rotação da broca
VB_{max}	Máximo desgaste de flanco
v_c	Velocidade de corte
σ	Ângulo de ponta
f	Avanço

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	AMBIENTE DE ESTÁGIO	12
1.3	OBJETIVOS.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	14
2.1.1	Compósitos reforçados com fibras	14
2.1.2	Polímeros	15
2.1.3	Fase matriz.....	16
2.1.4	Fase reforço	17
2.1.5	Compósitos de matriz polimérica (CMP).....	18
2.1.6	Processos de fabricação de compósitos	19
2.1.6.1	Laminação manual.....	20
2.1.6.2	Spray-Up	20
2.2	PROCESSO DE FURAÇÃO.....	21
2.2.1	Broca helicoidal	21
2.2.2	Materiais para ferramentas	22
2.2.2.1	Aço-rápido	22
2.2.2.2	Metal duro.....	23
2.2.3	Grandezas de corte.....	24
2.2.4	Usinabilidade	25
2.2.5	Desgaste da ferramenta de corte.....	25
2.2.5.1	Abrasão	26
2.2.5.2	Adesão	26
2.2.5.3	Difusão	26
2.2.5.4	Oxidação	26
2.3	USINAGEM DE COMPÓSITO PRFV	27
2.3.1	Efeitos na furação de PRFV	28
2.3.2	Desgastes da broca após furação de compósitos	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	CORPOS DE PROVA	31
3.2	MÁQUINA-FERRAMENTA	32
3.3	FERRAMENTAS DE CORTE.....	32

3.4	PARÂMETROS DE CORTE.....	33
3.5	MEDIÇÃO DE DESGASTES.....	34
4	RESULTADOS	35
4.1	DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO	35
4.2	CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS.....	36
4.3	ANÁLISE DOS DESGASTES DA FERRAMENTA.....	37
4.4	ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA	43
5	CONCLUSÃO.....	45
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Na constante busca para a substituição de materiais para produção de peças técnicas, com objetivo de melhorar suas propriedades, cresce a utilização de materiais compósitos. Dentre as razões favoráveis está a elevada resistência mecânica, maior rigidez e baixa densidade. Em detalhes negativos, preocupa-se com a proteção necessária dos envolvidos no processo e a custosa destinação dos resíduos ou a reciclagem dos mesmos.

O material compósito é formado pela mistura ou combinação de dois ou mais materiais, obtendo um material final com propriedades superiores comparadas às propriedades de cada material anterior. A maioria dos materiais compósitos são formados de duas fases, a primeira denominada de matriz que é contínua e envolve a outra fase que é chamada de dispersa (reforço). Divide-se como matriz os grupos de metais, cerâmicos e polímeros, já os reforços são classificados como partículas, reforçados com fibras e estruturais (CALLISTER, 2012).

O exemplo mais conhecido é o compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV), que combina a resistência das fibras de vidro do reforço com a ductilidade da matriz polimérica (SHACKELFORD, 2008). Sendo este compósito bastante aplicado nas áreas náutica, aeronáutica, petroquímica, automobilística, de refrigeração entre outras (Figura 1). A maioria dos produtos já é produzida na forma final, entretanto com a necessidade existente de posterior fixação ou montagem destes produtos surge a dependência de operações de usinagem, destacando-se principalmente pela operação de furação (CALLISTER, 2012; MAZUMDAR, 2001).

Figura 1 – Capô de trator em compósito PRFV pelo processo de *spray-up*



Fonte: O autor (2015)

A furação consiste em um processo de usinagem destinado a obtenção de furo geralmente cilíndrico em uma peça, com o auxílio de uma ferramenta multicortante (FERRARESI, 2014). A furação de materiais compósitos é complexa, apresentando diferentes comportamentos em um mesmo material devido à natureza não homogênea, e resultante também da difícil distribuição e orientação das fibras do reforço (SANTOS, 2010). Considerado os compósitos PRFV como materiais extremamente abrasivos para a usinagem estão relacionados problemas de desgaste rápido da ferramenta (ABRATE, 1997), bem como problemas com delaminação dos compósitos (DURÃO et al., 2004).

1.1 JUSTIFICATIVA

Pela grande quantidade de furos necessários na produção de certas peças em compósitos e buscando reduções de custos internos e externos, como também otimizando processos industriais, a Plasmosul Industria de Plásticos LTDA investe em testes e pesquisas com objetivo de manter-se competitiva no mercado produtivo de peças técnicas poliméricas.

No processo de usinagem diversas variáveis são analisadas para resultar em uma condição da melhor relação entre custo e benefício da operação. Entre estas informações consideradas algumas das principais são: o tempo do processo (custo hora-máquina e mão de obra), o custo da ferramenta (vida útil) e a qualidade superficial do produto.

Motivado por este assunto, a finalidade deste estudo é analisar os desgastes ocorridos nas brocas utilizadas no processo de furação de compósitos poliméricos com reforço de fibra de vidro e avaliar a possibilidade de melhorar o rendimento (menor custo) trocando o tipo de broca por outras opções.

1.2 AMBIENTE DE ESTÁGIO

Fundada em Caxias do Sul, a Plasmosul iniciou sua história empresarial em janeiro de 2011, a empresa atua na produção de peças termoplásticas e termofixas, nos processos de *fiberglass* (laminação manual, *spray-up* e RTM), *vacuumforming* e injeção de termoplásticos. Suas aplicações destacam-se em implementos rodoviários, ônibus, caminhões, equipamentos de refrigeração e linha agrícola, fornecendo para as grandes montadoras da região.

O estágio foi realizado nos setores de projetos e laminação da Plasmosul, bem como também parte realizado nos laboratórios de usinagem da UCS.

1.3 OBJETIVOS

Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar os desgastes das ferramentas no processo de furação de compósito polimérico reforçado com fibras de vidro.

Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, seguem abaixo os objetivos específicos:

- a) buscar fundamentos sobre compósitos, processo de furação e usinagem destes materiais;
- b) definir corpos de prova, ferramentas e parâmetros a serem utilizadas nos ensaios;
- c) ensaiar furações nos corpos de prova. Replicar os ensaios;
- d) analisar os desgastes ocorridos nas diferentes ferramentas utilizadas nos ensaios;
- e) comparar os resultados dos ensaios com diferentes ferramentas;
- f) concluir sobre os resultados obtidos e possibilidade de futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Mazumdar (2001) define que um material compósito é a combinação de dois ou mais materiais com o objetivo de obter um novo material combinado de propriedades superiores aos que os constituem. Ou como define filosoficamente Shackelford (2008), estes materiais combinados devem fornecer 'o melhor de dois mundos'.

Materiais compósitos foram criados para melhorar características mecânicas, como a rigidez, resistência e tenacidade. A maioria deles é formado por apenas duas fases, a primeira chamada de matriz e a outra que é envolvida por esta, definida como reforço. A divisão dos materiais compósitos é feita em três grupos, os compósitos reforçados com partículas, os compósitos estruturais e os compósitos reforçados com fibras. Ainda dentro de cada um destes grupos os compósitos são subdivididos conforme a Figura 2 (CALLISTER, 2012; MILATIAS, 2014).

Figura 2 – Esquema de classificação dos vários tipos de compósitos



Fonte: Callister (2012)

2.1.1 Compósitos reforçados com fibras

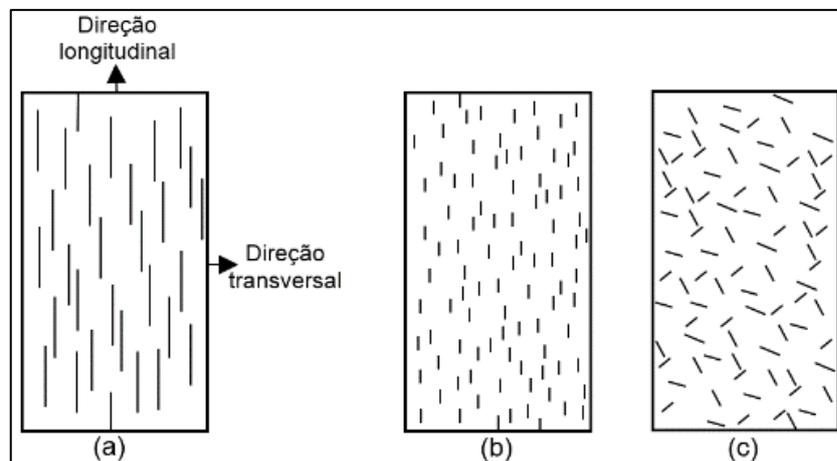
Dos três grupos mencionados anteriormente, o que possui maior importância segundo Callister (2012) é o de compósitos reforçados com fibras. Estas fibras são responsáveis por transmitirem e distribuírem entre elas cerca de 70 a 90% das tensões e deformações de cargas aplicadas sobre o compósito (MAZUMDAR, 2001).

As características mecânicas não dependem apenas das propriedades da fibra, mas dependem também de um certo comprimento crítico da mesma. A maioria destas combinações de matriz-fibra dos compósitos, tem este comprimento crítico próximo a 1 mm, ou seja, 20 a 150 vezes maior que o diâmetro da fibra. As fibras que possuem comprimento

acima de 15 vezes ao comprimento crítico, são chamadas de fibras contínuas. Abaixo deste comprimento crítico, são definidas como fibras descontínuas ou fibras curtas. Para melhores resultados de resistência do material compósito se espera que as fibras sejam contínuas (CALLISTER, 2012).

Além do comprimento das fibras, outro fator importante é o arranjo da fibra em relação às outras dentro do compósito, podendo ser alinhadas, ou seja, paralelas em um único sentido de direção entre si, ou então distribuídas de forma aleatória. As fibras contínuas normalmente se encontram alinhadas, já as fibras descontínuas podem também estar alinhadas ou orientadas aleatoriamente, como demonstra a Figura 3 (CALLISTER, 2012).

Figura 3 – Representações esquemáticas dos compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatórias



Fonte: Callister (2012)

Compósitos com fibras alinhadas são anisotrópicos, possuem altas resistências à tensões e deformações no sentido longitudinal, ou seja, ao longo da direção do alinhamento das fibras. Já quando aplicada tensão no sentido transversal, o resultado do uso das fibras é praticamente nulo, ocorrendo fraturas à baixas tensões. Para estes casos o indicado é utilizar fibras orientadas aleatoriamente, resultando em uma eficiência do reforço, em todos os sentidos de tensões, de cerca de um quinto da eficiência de um compósito alinhando na direção longitudinal. Contudo, a escolha do comprimento e da orientação da fibra deve ser levada em conta dependendo das tensões aplicadas e dos custos de fabricação, que tendem a ser mais baratas para os compósitos de fibras curtas (CALLISTER, 2012).

2.1.2 Polímeros

Polímeros são materiais orgânicos compostos por macromoléculas orgânicas, obtidos pela combinação de diversos monômeros (pequenas moléculas) através da reação

químico de polimerização, onde resultam em uma estrutura em forma de cadeia (SHACKELFORD, 2008).

Os polímeros são classificados de acordo com sua característica mecânica à elevadas temperaturas. Classificados assim em polímeros termoplásticos e polímeros termofixos. Sendo os mais comuns e que ocupam a maior parcela de consumo global, os polímeros termoplásticos se tornam moles e deformáveis quando são aquecidos. Suas moléculas “deslizam” umas sobre as outras, e quando são resfriados acabam endurecendo novamente, tornando um processo reversível e repetitivo quando necessário (CALLISTER, 2012). Geralmente estes polímeros são processados com moldagem por injeção, extrusão ou insuflação, ambos pela aplicação simultânea de pressão e calor (SHACKELFORD, 2008).

Os polímeros termofixos são totalmente o oposto dos termoplásticos, eles se tornam permanentemente duros e rígidos e não amolecem quando sofrem um novo aquecimento, limitando o reprocesso destes materiais, ou seja, tornando um processo irreversível (CALLISTER, 2012). O processo de fabricação destes polímeros tem predominância em moldagens por compressão e por transferência. Em desvantagem os termofixos são mais frágeis, não são recicláveis e seus processos requerem maiores níveis de proteção com equipamentos de proteção individual dos operadores em comparação com os termoplásticos (SHACKELFORD, 2008).

Praticado durante o processo, é possível acrescentar na composição dos polímeros alguns aditivos para fornecer características específicas desejáveis. Dentre os aditivos mais utilizados estão os plastificantes, que são utilizados com o objetivo de amolecer um polímero a uma temperatura inferior que a de característica natural deste material polimérico, reduzindo tempo de processo e consumo de energia. Também existem os corantes utilizados quando é necessário fornecer cor ao polímero. Por fim, também bastante utilizados, os enchimentos ou reforços, possuem o objetivo de fortalecer estruturalmente um polímero, aumentando a resistência mecânica e rigidez para competir com materiais metálicos. O uso destes aditivos limita-se a até 50% do volume de material para ainda ser considerado um polímero, acima deste nível o material já é chamado de compósito (SHACKELFORD, 2008).

2.1.3 Fase matriz

Como já descrito anteriormente por Mazumdar (2001), a fase matriz tem a função de envolver a fase reforço. Callister (2012) descreve que a matriz também possui a função de ligar as fibras umas às outras, proteger as mesmas contra os ataques químicos do ambiente, evitar o desgaste abrasivo superficial e criar uma barreira contra a propagação de possíveis trincas.

Dentro dos compósitos reforçados com fibras, a fase matriz é feita a partir de metais, polímeros e cerâmicos. Matizes metálicas e poliméricas são utilizadas quando é desejável obter características dúcteis, já o uso da matriz cerâmica é restrito quando há necessidade de melhoria na tenacidade contra fraturas (CALLISTER, 2012).

2.1.4 Fase reforço

Conforme Callister (2012), os materiais utilizados como reforços são classificados de acordo com o diâmetro e com sua natureza, sendo separados em três divisões: uísqueres, fibras e arames. Na Tabela 1 são mostradas características dos principais materiais de cada um destes grupos.

Os reforços denominados de fibras são os mais utilizados em compósitos, são materiais amorfos ou policristalinos, e geralmente à base de polímeros ou cerâmicos. Possuem boas propriedades de resistência, superiores aos arames, mas inferiores aos uísqueres (CALLISTER, 2012). Dentro dos reforços de fibras, os de uso mais comuns são as fibras de vidro, carbono e aramida. Estes possuem diâmetros de 5 a 25 μm , por este motivo se tornam flexíveis e de fácil adaptação a diferentes formatos (MAZUMDAR, 2001).

Tabela 1 – Características de vários materiais utilizados como reforços

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Limite de Resistência à Tração (GPa)	Resistência Específica (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo Específico (GPa)
<i>Uísqueres</i>					
Grafite	2,2	20	9,1	700	318
Óxido de alumínio	4,0	10-20	2,5-5,0	700-1500	175-375
Carbeto de silício	3,2	20	6,25	480	150
<i>Fibras</i>					
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Carbono	1,78-2,15	1,5-4,8	0,7-2,7	228-724	106-407
Vidro-E	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Boro	2,57	3,6	1,4	400	133
<i>Arames</i>					
Tungstênio	19,3	2,89	0,15	407	21,1
Molibdênio	10,2	2,2	0,22	324	31,8

Fonte: Callister (2012)

Pelo motivo do vidro ser encontrado com facilidade e abundância, resulta com que se tornem as fibras deste material as mais baratas comercialmente entre todos os outros tipos existentes. A fibra de vidro mais utilizada em aplicações de fabricação é a do tipo 'E', composta por areia de sílica, calcário, fluorita, argila e ácido bórico. (MAZUMDAR, 2001). Essa fibra de

vidro possui baixíssima composição de sódio, resultando em uma baixa condutividade elétrica, de onde é retirada a classificação do tipo elétrica. Na Tabela 2 são verificadas algumas das fibras de vidro mais utilizadas, bem como também suas características e composição química (SHACKELFORD, 2008).

Tabela 2 – Composições de fibras de vidro de reforço

Tipo	Características	Composição (%)								
		SiO ₂	(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂
Vidro-A	Sílica de cal de soda comum	72	<1	10	-	14	-	-	-	-
Vidro-AR	Resistente a bases alcalinas	61	<1	5	<1	14	3	-	7	10
Vidro-C	Resistente à corrosão química	65	4	13	3	8	2	5	-	-
Vidro-E	Composição elétrica	54	15	17	5	<1	<1	8	-	-
Vidro-S	Alta resistência e alto módulo	65	25	-	10	-	-	-	-	-

Fonte: Shackelford (2008)

2.1.5 Compósitos de matriz polimérica (CMP)

Callister (2012) define que estes compósitos possuem uma matriz de resina polimérica combinada com fibras como reforços. É o grupo de compósitos mais utilizados em diversas aplicações por sua facilidade de fabricação, boas propriedades mecânicas e principalmente baixo custo.

Essas resinas (Tabela 3) determinam a temperatura de funcionamento do compósito. Para compósitos aplicados à maiores temperaturas, são utilizadas as resinas termofixas, as quais possuem fácil processabilidade sendo encontradas na forma líquida à temperatura ambiente. Oferecem maior estabilidade térmica e dimensional pois, uma vez curada, essas resinas não podem ser amolecidas e reprocessadas novamente. As resinas termofixas mais comuns usadas nestes compósitos são as resinas epóxi, resina de poliéster e resinas de vinis ésteres (MAZUMDAR, 2001).

Os CMP são divididos de acordo com o tipo de reforço utilizado, entre fibras de vidro, fibras de carbono e fibras de aramida, juntamente com suas aplicações e os vários tipos de resinas poliméricas disponíveis (CALLISTER, 2012).

As fibras de vidro contidas no interior de uma matriz polimérica produzem um compósito com resistências elevadas (PRFV). Apesar da facilidade na obtenção da fibra de vidro, suas aplicações são limitadas a operações com temperaturas abaixo de 200°C, ótimas para fabricação de carcaças de meios de transporte automotivo e marítimo, com principal

objetivo de reduzir o peso da estrutura e com isto aumentar a eficiência dos combustíveis (CALLISTER, 2012).

Tabela 3 – Máximas temperaturas para uso contínuo de resinas termofixas e termoplásticas

Materiais	Máxima temperatura de uso contínuo (°C)
<i>Termofixos</i>	
Ésteres vinílicos	60-150
Poliésteres	60-150
Fenólicos	70-150
Epóxi	80-215
<i>Termoplásticos</i>	
Poliestireno	50-80
Polipropileno	50-75
Poliamida	75-100
Poliéster	70-120
PEEK	120-250

Fonte: Mazumdar (2001)

2.1.6 Processos de fabricação de compósitos

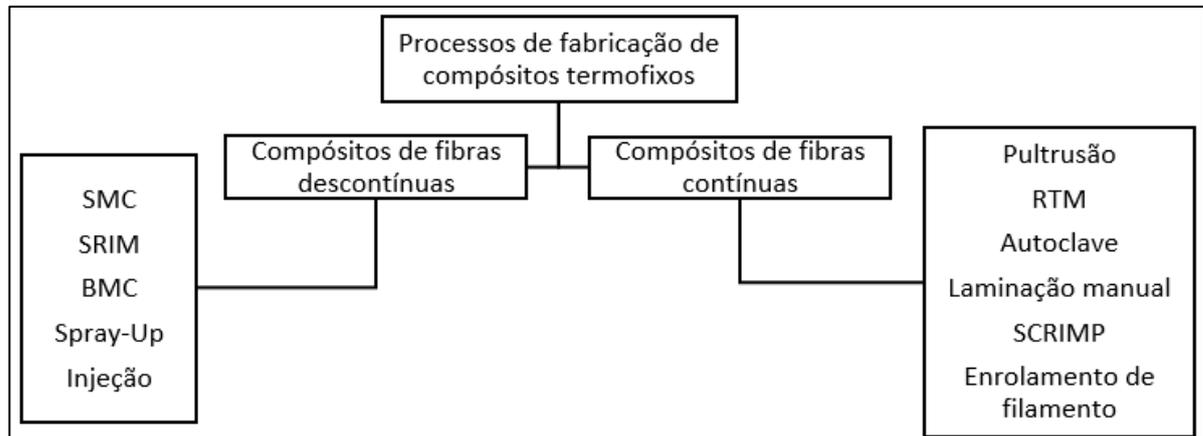
Conforme Mazumdar (2001), compósitos poliméricos reforçados com fibras possuem seus processos de fabricação divididos em duas categorias. A primeira delas é o processo de compósitos termofixos, que domina cerca de 75% do volume do mercado de compósitos. A segunda parcela do mercado é englobada pela categoria de processos de compósitos termoplásticos.

Dentro destes compósitos termofixos, as matrizes poliméricas mais comuns são as resinas epóxis, os poliésteres e os vinis ésteres. Todas estas resinas são encontradas, geralmente, na forma líquida à temperatura ambiente, fator este que facilita o processamento e a moldagem dos compósitos em relação aos termoplásticos, que, na maioria, são sólidos e necessitam calor para serem amolecidos e moldados. Além da vantagem de sua forma física, os termofixos possuem maquinários e ferramentais com um custo de investimento muito inferior aos termoplásticos (MAZUMDAR, 2001).

No ponto de análise negativo, Mazumdar (2001) destaca que os compósitos termofixos possuem um tempo elevado de cura do processamento e, conseqüentemente, uma taxa de produção mais baixa. Inclui ainda que estes compósitos, depois de curados (forma rígida) não podem mais ser reprocessados, e dificilmente reciclado para outros fins.

Vários métodos de processamento dos compósitos termofixos são aplicados na manufatura de componentes (Figura 4). Para cada processo existem diferentes técnicas de fabricação, vantagens e limitações (MAZUMDAR, 2001).

Figura 4 – Técnicas de processos de fabricação de compósitos termofixos



Fonte: Mazumdar (2001)

2.1.6.1 Laminação manual

Laminação manual é definida por Mazumdar (2001) como um processo trabalhoso totalmente manual. Consiste na aplicação de uma resina polimérica líquida ao molde, logo em seguida é inserido o reforço e é realizada a distribuição uniforme da resina em toda a fibra através de um rolo. Outras camadas de resina e reforço são aplicadas para obter a espessura desejada do produto. Após a cura e solidificação da resina à temperatura ambiente, o produto é desmoldado do molde e pode-se iniciar um novo ciclo.

2.1.6.2 Spray-Up

Spray-Up consiste em um processo barato semelhante, mas ligeiramente mais avançado, ao processo de laminação manual, modificando a aplicação manual do reforço e da resina, que neste caso é auxiliada por uma pistola. Esta pistola tem a função simultânea de picotar um conjunto de fios de fibras em mechas curtas, de mesmo tamanho e de forma contínua, juntamente pulverizando a resina polimérica com catalisador sobre o molde (MAZUMDAR, 2001).

Há possibilidade de acrescentar mantas de fibras no meio do processo para agilizar o preenchimento da superfície do molde e também é necessária a utilização manual de rolo para retirar bolhas de ar retiradas entre as mechas ou mantas e distribuir uniformemente a resina ao longo da superfície (MAZUMDAR, 2001).

2.2 PROCESSO DE FURAÇÃO

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010). Definido por Ferraresi (2014), a furação é um processo mecânico de usinagem destinado a abertura de um furo, normalmente cilíndrico, com a utilização de uma ferramenta geralmente multicortante.

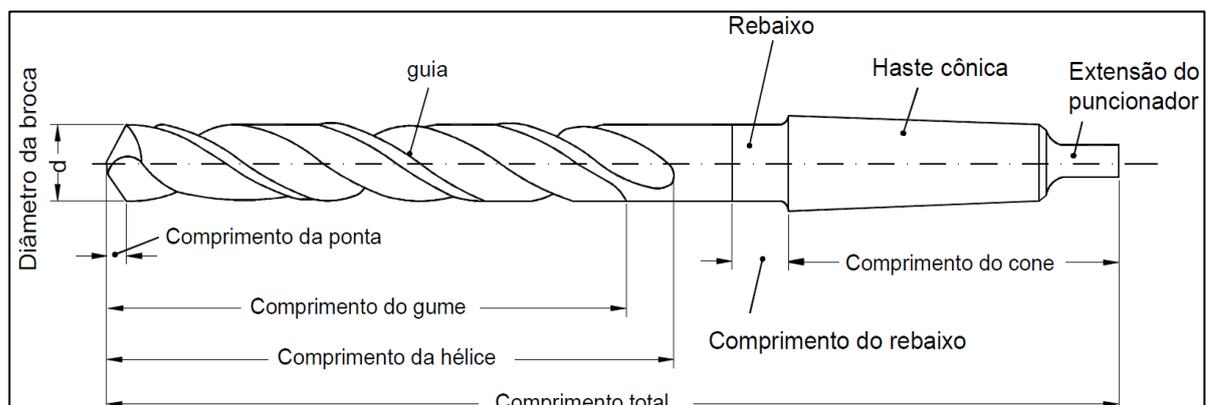
Estas ferramentas são denominadas brocas, e podem ser classificadas por seu tipo. As mais conhecidas são brocas chatas, brocas helicoidais, brocas canhão, brocas escalonadas, brocas ocas, brocas de centro, brocas com pastilha de metal duro soldadas ou intercambiáveis e as brocas com dutos para refrigeração. São selecionadas de acordo com o diâmetro do furo, a profundidade a ser usinada, as tolerâncias de forma e dimensão e o volume de produção exigido (STEMMER, 2008).

2.2.1 Broca helicoidal

De todos os tipos de brocas, as helicoidais são as mais utilizadas na execução de furos (STEMMER, 2008).

Diniz, Marcones e Coppini (2010) dividem a forma construtiva de uma broca helicoidal em diversas partes (Figura 5). O formato da haste é definido para o modo ao qual a broca será fixada na máquina, geralmente na forma cilíndrica quando fixada por meio de mandris. Para brocas de grandes diâmetros há a possibilidade de fixá-las em cone morse, garantindo maior força de fixação.

Figura 5 – Forma construtiva de uma broca helicoidal cônica



Fonte: Diniz, Marcones e Coppini (2010)

Os guias possuem as funções de guiar a broca dentro do furo quando realizada a furação e limitar ao contato mínimo da superfície da broca com a superfície do furo, gerando menor atrito nesta ação. Próximos aos guias, os canais helicoidais da broca auxiliam no

transporte dos cavacos gerados no processo para fora do furo (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

Como já menciona em sua nomenclatura, os gumes ou arestas de corte realizam o corte do material. Há dois gumes principais, geralmente com ângulo de ponta (σ) entre eles de 118° , e exercem o maior trabalho de corte. Ligando estes gumes principais existe o gume transversal, localizado na ponta da broca. Esta região absorve mais da metade da força axial de avanço e possui velocidade de corte muito baixa, sendo praticamente nula no centro do eixo da broca (STEMMER, 2008).

2.2.2 Materiais para ferramentas

Para Diniz, Marcones e Coppini (2010), uma série de fatores são considerados para a seleção do material de uma ferramenta. Influenciam na escolha o material a ser usinado, o processo de usinagem, as condições da máquina, dimensões necessárias da ferramenta, custo da ferramenta e as condições de operação.

Além destes fatores, independente do material selecionado, é indispensável que ele apresente características de dureza à quente, resistência ao desgaste e possuir uma boa tenacidade. Com estas informações, os materiais para ferramentas são agrupados em aço-rápido, metal duro, material cerâmico e diamante (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

2.2.2.1 Aço-rápido

O aço-rápido (HSS) é um aço ferramenta composto de altas ligas de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Considerado um material tenaz de elevada resistência ao desgaste e alta dureza a quente, podendo ser utilizado para operações de corte de temperatura próximas aos 600°C (KLOCKE, 2011).

Geralmente aços-rápidos resistentes à abrasão são pouco tenazes e vice-versa. Os tipos de aços rápidos conhecidos (Tabela 4) são divididos em duas categorias indicadas na classificação SAE. A categoria "T" compreende os tipos predominantes ao tungstênio, e a categoria "M" compreende os tipos predominantes ao molibdênio (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

Diversas ferramentas de aço-rápido possuem um revestimento para aplicações onde exija maior resistência da ferramenta ao desgaste. Este revestimento, normalmente nitreto de titânio (TiN), é adicionado na ferramenta pelo processo PVD, criando uma camada de elevada dureza com espessura de 1 a $4\ \mu\text{m}$. Esta camada faz com que o corte ocorra com esforços menores, devido ao seu baixo coeficiente de atrito. Logicamente ferramentas com

revestimento são mais caras que sem revestimento, mas deve-se levar em conta que a vida da ferramenta é maior e o tempo de corte é menor já que é possível o uso de maiores velocidades de corte e avanço. Assim, a utilização destas ferramentas revestidas se justifica economicamente (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

Tabela 4 – Composição e características dos aços rápidos

Tipo de aço-rápido	Classificação SAE	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	V [%]	W [%]	Mo [%]	Co [%]	Tenacidade	Resistência ao desgaste	Dureza a quente
ao W	T1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	-	Baixa	Muito boa	Muito boa
	T2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	-			
	T3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	-	-			
	T7	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	-			
	T9	1,20	0,30	0,25	4,00	4,00	18,00	-	-			
ao W-Co	T4	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	5,00	Baixa	Muito boa	Excelente
	T5	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	8,00			
	T6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	20,00	-	12,00			
	T8	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	5,00			
ao Mo	M1	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,00	-	Baixa	Muito boa	Muito boa
	M2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	-			
	M3	1,00	0,30	0,25	4,00	2,75	6,00	5,00	-			
	M4	1,30	0,30	0,25	4,00	4,00	5,50	4,50	-			
	M10	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	-	8,00	-			
ao Mo-Co	M6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	4,00	5,00	12,00	Baixa	Muito boa	Excelente
	M30	0,85	0,30	0,25	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00			
	M34	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	2,00	8,00	8,00			
	M35	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00			
	M36	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	8,00			

Fonte: Adaptado de Diniz, Marcones e Coppini (2010)

2.2.2.2 Metal duro

O metal duro é obtido através do processo da metalurgia do pó, composto de partículas duras de carbonetos de tungstênio com adição de cobalto como aglomerante. Este processo forma um produto de altíssima dureza e resistência a compressão, além de possuir elevado ponto de fusão que favorece a sua utilização em processos de usinagem que geram altas temperaturas. O metal duro é aplicado na usinagem na forma de pastilhas e ferramentas rotativas de pequenos diâmetros (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

Para brocas inteiriças de metal duro, a vida útil da ferramenta é de aproximadamente 20 vezes maior que para as de aço-rápido (SANDVIK DO BRASIL, 2005).

2.2.3 Grandezas de corte

No processo de usinagem, Ferraresi (2014) define grandezas de corte como parâmetros, diretos ou indiretos, ajustáveis na máquina para o corte de material em forma de cavaco. Estas grandezas são consequências do avanço e da penetração de corte (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

A velocidade de corte (v_c) no processo de furação é descrita como a velocidade tangencial resultante da rotação da ferramenta em torno da peça (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010). Seu valor é determinado pela Equação 1, relacionando diretamente o diâmetro do furo e a rotação da ferramenta (STEMMER, 2008).

$$v_c = \frac{\pi dn}{1000} \quad (1)$$

Onde:

v_c = Velocidade de corte [m/min];

d = Diâmetro da broca [mm];

n = Rotação da broca [rot/min].

Diniz, Marcones e Coppini (2010) descrevem o movimento avanço (f) como a distância linear percorrida paralelamente ao eixo em relação a cada rotação completa da ferramenta. Seu resultado é dado em milímetros por rotação.

Para o processo de furação, o avanço depende diretamente do tipo de material a ser usinado e do diâmetro da broca (STEMMER, 2008).

A profundidade de corte (a_p) é determinada por Diniz, Marcones e Coppini (2010) como a largura de penetração da ferramenta em relação a peça, sendo medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No processo de furação em cheio, essa profundidade é correspondente a metade do diâmetro da broca, conforme Equação 2.

$$a_p = \frac{d}{2} \quad (2)$$

Onde:

a_p = Profundidade de corte [mm];

d = Diâmetro da broca [mm].

2.2.4 Usinabilidade

Stemmer (2005) define usinabilidade como sendo a propriedade dos materiais quando usinados com ferramentas de corte. Alguns critérios são utilizados para determinar o grau de usinabilidade de um material, dentre os mais importantes se destaca a vida da ferramenta, as grandezas de força e potência e a qualidade superficial.

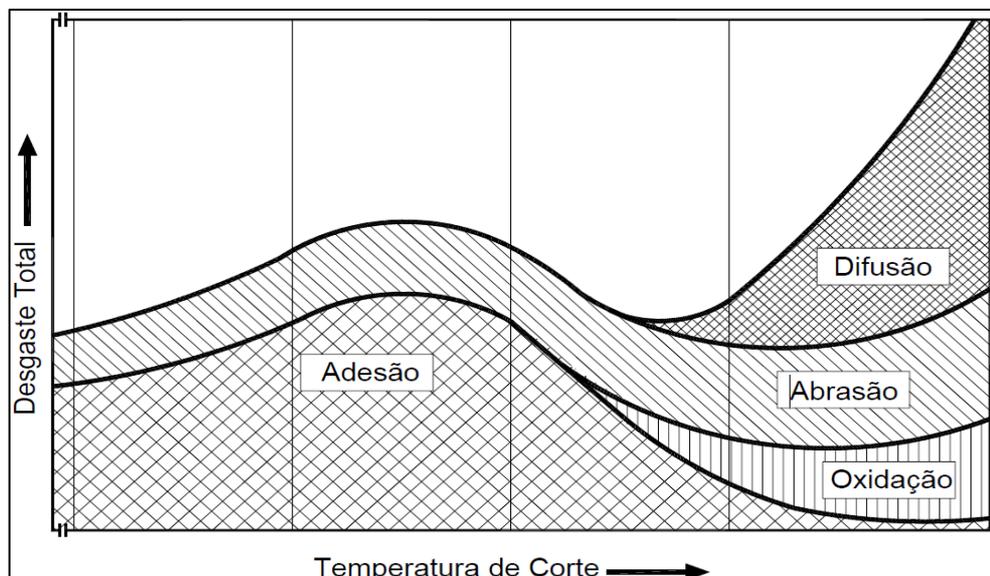
Esses critérios variam em função de fatores que dependem da máquina e equipamentos utilizados, da ferramenta de corte, do fluido de corte e do processo de usinagem selecionado (STEMMER, 2005).

2.2.5 Desgaste da ferramenta de corte

Devido aos efeitos de atrito e escorregamento da ferramenta de corte com o material, sob altas temperaturas e pressões geradas no processo de usinagem, podem ocorrer três tipos de falhas ou desgastes principais na ferramenta: lascamento do gume, desgaste no flanco e desgaste na face (STEMMER, 2005).

No caso dos desgastes, KLOCKE (2011) separa as principais causas em: abrasão mecânica, adesão, difusão e oxidação (Figura 6).

Figura 6 – Causas de desgastes no processo de usinagem



Fonte: König e Klocke (1997)

2.2.5.1 Abrasão

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Este tipo de desgaste é proveniente da presença de pequenas partículas duras do material usinado e pela alta temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

A resistência à abrasão depende principalmente da dureza do material da ferramenta. Aumentando a velocidade de corte também resulta no aumento da velocidade de desgaste da ferramenta (STEMMER, 2005).

2.2.5.2 Adesão

Quando ocorre o contato da ferramenta com o material, sob baixas temperaturas e velocidades de corte, são transferidas partículas que se soldam na superfície da ferramenta formando um gume postiço (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

O aumento do atrito e do gume postiço provoca uma maior resistência de deslizamento do cavaco até o momento em que as partículas soldadas são arrancadas, resultando no desgaste no flanco e na face da ferramenta (STEMMER, 2005).

2.2.5.3 Difusão

A difusão ocorre entre a ferramenta e o cavaco, considerado um fenômeno microscópico iniciado pela alta temperatura na zona de corte. Consiste na transferência de átomos de um material a outro, além da temperatura, depende da duração de contato e afinidade físico-química entre a ferramenta e o material a ser usinados (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

Acontece especialmente quando utilizadas velocidades de corte elevadas, gerando a diminuição da dureza da ferramenta e assim uma redução da resistência à abrasão (KLOCKE, 2011).

2.2.5.4 Oxidação

Altas temperaturas resultantes do processo de usinagem, e a presença de ar e água presentes nos fluídos de corte, geram oxidação para diversos metais. Durante o corte, esta reação forma camadas de óxidos porosos sobre a ferramenta, que facilmente são arrancadas pelo atrito e resultam no desgaste.

Uma alternativa para minimizar este desgaste é a utilização de ferramentas com cobertura de óxido de alumínio (DINIZ, MARCONES e COPPINI, 2010).

2.3 USINAGEM DE COMPÓSITO PRFV

A usinagem de compósitos de matriz polimérica é complexa devido a sua heterogeneidade, propriedades dependentes dos materiais utilizados de reforço e matriz, como a concentração, sequência de camadas, orientação, sensibilidade ao calor e abrasividade das fibras. De acordo com Durão et al. (2006), os compósitos possuem natureza não homogênea e são anisotrópicos, resultando na dificuldade de obter acabamento de usinagem comparável ao de peças metálicas.

Na usinagem ocorrem frequentemente defeitos, como delaminação, fissuras interlaminares, descolamento fibra-matriz, arrancamento de fibras e danos térmicos (DURÃO et al., 2004; GONÇALVES et al., 2011; MILATIAS, 2014).

Outro fator muito importante que deve ser levado em consideração é o desgaste excessivo das ferramentas quando utilizadas na usinagem destes compósitos, resultando na sua substituição prematura (DURÃO et al., 2004, 2006).

De acordo com pesquisas de Reis (2005), os parâmetros processuais, apesar de dependerem do material a ser usinado, apresentam influência direta na qualidade do furo, sendo esta qualidade fortemente dependente do avanço e de menor influência da velocidade de corte.

Durão et al. (2004) descrevem que o avanço deve ser o mais baixo possível dada a natureza frágil das fibras, no entanto, sem causar aquecimento exagerado na matriz do compósito.

Milatias (2014), afirma que mais da metade das aplicações em usinagem de materiais compósitos é representada na área da furação. Cita ainda que a condição perfeita para a usinagem de compósitos deve garantir a menor degradação possível e o melhor acabamento superficial.

Na furação de compósitos PRFV, Durão et al. (2006) utilizaram, para brocas de aço rápido e metal duro, velocidades de corte entre 1,5 e 40 m/min e avanços entre 0,0057 e os 2,63 mm/rot obtendo bons resultados de qualidade, já para furação de compósitos com fibra de carbono as velocidades de corte são mais elevadas. Próximos a estes parâmetros, Reis (2005) concorda com a obtenção de qualidade significativa com velocidade de corte entre 1,0 e 46 m/min e avanços entre 0,006 e os 2,63 mm/rot.

Durão et al. (2006) concluem em seus ensaios de furações, com brocas helicoidais de aço-rápido em compósitos reforçados com fibra de vidro por RTM, que são mais

adequados parâmetros de velocidade de corte na ordem de 26 m/min e avanço de 0,1 mm/rot, dentre os ensaios analisados.

Nos ensaios de furação de compósitos PRFV fabricados por laminação manual utilizados na indústria naval, Silva (2016) testa a qualidade obtida na entrada e saída dos furos realizados com brocas helicoidais de aço rápido sem revestimento possuindo ângulos de ponta de 118°, e com revestimento possuindo ângulo de ponta de 130° e 135°. Silva adota para parâmetros de corte avanços de 0,08, 0,15 e 0,3 mm/rot e velocidades de corte de 10, 28 e 57 m/min. Concluiu que as análises obtidas proporcionam melhores resultados com a broca de 118°, seguida da broca de 130°, quando utilizados baixos avanços e baixas velocidades de corte.

2.3.1 Efeitos na furação de PRFV

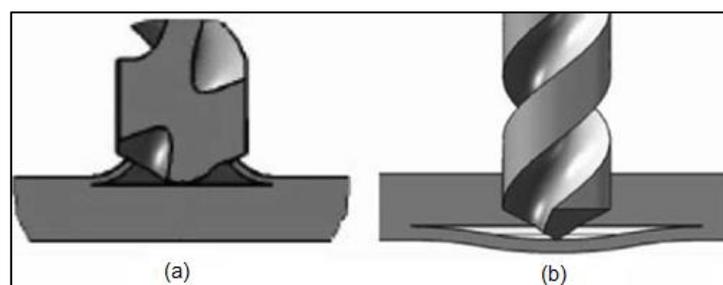
De todos efeitos causados no processo de furação dos compósitos PRFV o mais frequente e crítico é a delaminação (DURÃO et al., 2004).

Gonçalves et al. (2011), definem delaminação como o deslocamento de camadas adjacentes do compósito laminado, afetando as propriedades mecânicas e diminuindo a resistência à fadiga da peça usinada.

Existem dois tipos de delaminações (Figura 7), se o dano ocorrer no início do contato da broca com o compósito temos a delaminação à entrada, em que o material é puxado para cima em vez de ser cortado. Se o dano ocorrer quando a ponta da broca se aproximar da superfície oposta da entrada, temos a delaminação à saída, que devido a força compressiva exercida pela ponta da broca provoca a separação entre as camadas do compósito (GONÇALVES et al., 2011).

Faria (2007) conclui com os resultados de seus experimentos que a geometria da broca apresenta enorme influência sobre a delaminação. Para minimizar este efeito, o mesmo sugere diminuir o parâmetro de avanço, o qual tem maior influência na delaminação, bem como utilizar brocas de metal duro com geometria do tipo Brad & Spur.

Figura 7 – Delaminações (a) à entrada, (b) à saída



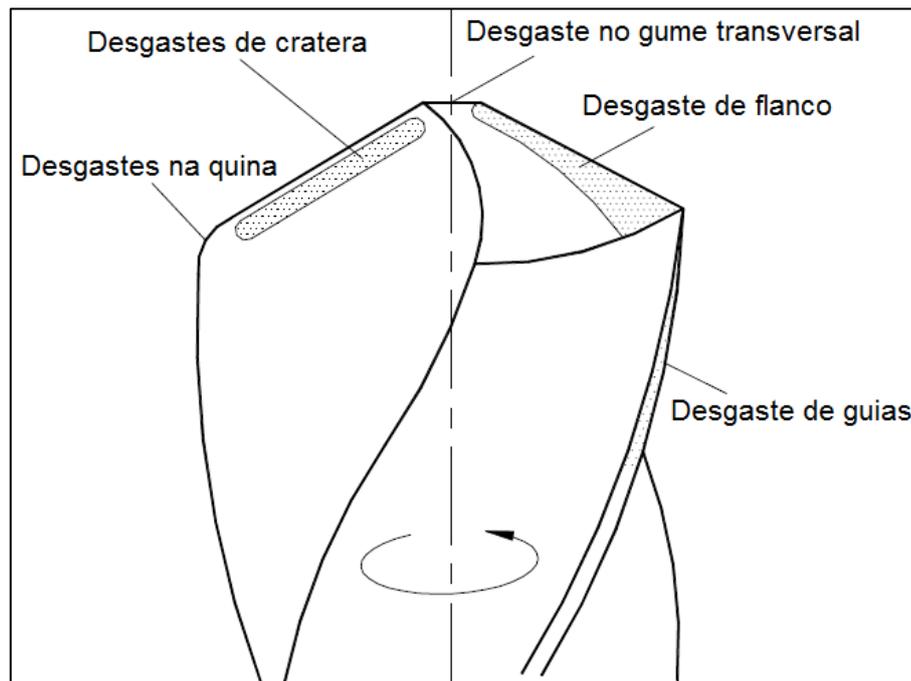
Fonte: Gonçalves et al. (2011)

2.3.2 Desgastes da broca após furação de compósitos

O desgaste das brocas (Figura 8) na furação destes materiais é consequência da natureza muito abrasiva e da baixa condutividade térmica destes compósitos, resultando em um maior aquecimento da ferramenta (DURÃO et al., 2004).

A condutividade dos compósitos PRFV é uma centena de vezes menor àquela dos metais, possuindo baixa transferência de calor através do cavaco e da peça usinada para o meio ambiente. Assim, responsabilizando em cerca de 90% do calor gerado a ser dissipado pela ferramenta, contra aproximadamente 5% na comparação de usinagem convencional de um certo metal. Na faixa entre 100 e 300°C ocorre a queima da matriz polimérica, tornando este compósito um material de baixa resistência térmica para a usinagem. Ligado a isso, também há o fato da não possibilidade de utilização de fluido de corte para refrigeração, pois o compósito absorveria parte deste fluido interferindo diretamente em seu dimensional (BORDINASSI et al., 2004).

Figura 8 – Desgastes de broca helicoidal



Fonte: König e Klocke (1997)

Ensaio realizados por Faria (2007) concluem que os desgastes ocorrem essencialmente por abrasão, não sendo encontrados vestígios de deformação plástica, lascamento, quebra ou trincas nas brocas analisadas na usinagem de compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro.

Reis (2005) observa em suas pesquisas que as brocas de aço-rápido apresentam um grande desgaste na aresta de corte e de cratera, enquanto as brocas de metal duro apresentam um desgaste mínimo na aresta de corte, na usinagem de compósitos reforçados com fibras de carbono. Analisa ainda, que o desgaste da ferramenta de corte e a presença de apraz em pó durante a operação constituem um problema para a furação dos materiais compósito.

Castillo (2005) cita que usando brocas de aço-rápido revestidas com nitreto de titânio são possíveis a utilização de velocidades de corte de até 4 vezes maiores e avanços entre 3 e 5 vezes maiores em relação às brocas sem revestimento obtendo excelentes resultados.

Em comparação à furação de aços de baixo carbono, Chiaverini (1996) aponta vantagem da utilização de brocas de aço-rápido com revestimento de nitreto de titânio às brocas sem revestimento, realizando quatro vezes mais a quantidade de furos antes da necessidade de afiação da ferramenta.

Nos ensaios de furação de placas de 1,9 a 4,1 mm de espessura em compósito epóxi reforçado com fibra de vidro, Faria (2007) constatou importante vantagem no uso de broca de metal duro com revestimento de nitreto de titânio sobre a mesma ferramenta sem revestimento. Após 10000 furos verificou-se início de desgaste abrasivo na broca sem revestimento, evidenciado pelo arredondamento da aresta principal e secundária de corte, enquanto a broca com revestimento manteve sua geometria muito próxima do original.

Durão et al. (2004) e Klocke (2011) recomendam o uso de ferramentas de metal duro para a furação de compósitos PRFV, por possuir maior resistência à abrasão que as ferramentas de aço rápido e por razões econômicas na comparação com brocas diamantadas.

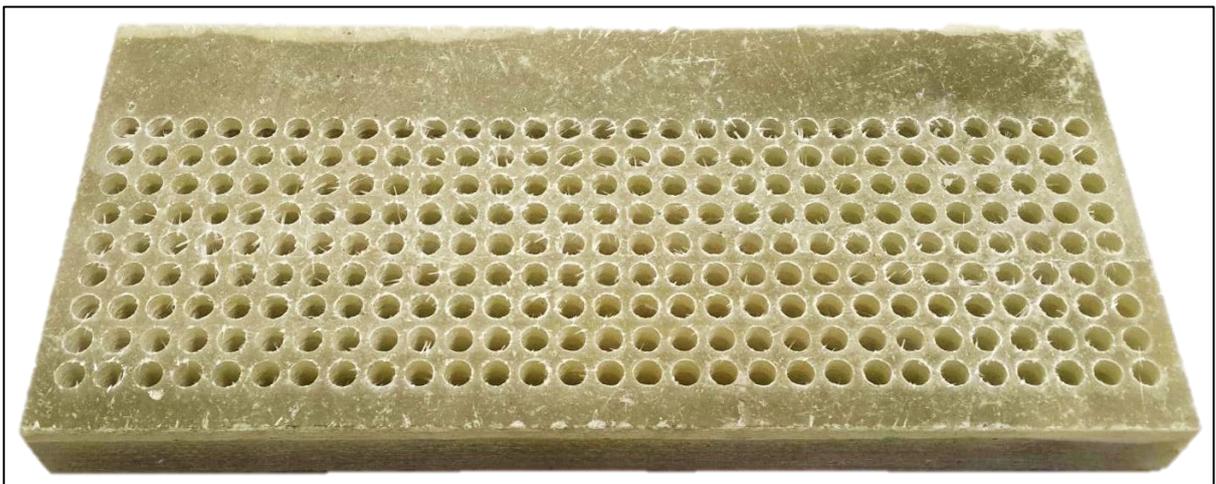
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais utilizados, entre eles, os corpos de provas, ferramentas de corte e equipamentos, bem como os métodos e parâmetros utilizados nos ensaios do experimento, a fim de satisfazer com o objetivo de analisar e comparar os desgastes das ferramentas na furação de compósitos PRFV.

3.1 CORPOS DE PROVA

As placas do compósito PRFV foram fabricados no setor de laminação da Plasmosul, pelo processo de laminação manual, com dimensões finais de 130 mm por 250 mm e espessura de 18 mm, possuindo tolerâncias de 0,5 mm, para mais ou para menos (Figura 9). Tanto o método de processo como a matéria prima, utilizados na confecção destes corpos de prova, foram idênticos aos atuais usados na confecção de peças pela empresa.

Figura 9 – Corpo de prova ensaiado no pré-teste



Fonte: O autor (2015)

Foi selecionada como matriz deste compósito uma resina polimérica termofixa de poliéster insaturada, pré-acelerada e de baixa viscosidade (Tabela 5) misturada com 1% de iniciador, peróxido de metil etil cetona (Brasnox® DM50). Após a laminação foi necessária a cura do corpo de prova de 24 horas à temperatura ambiente (entre 20 e 30°C) somadas a mais duas horas em estufa à 60°C.

Para o reforço do compósito foram utilizadas camadas de mantas de fibras de vidro, de tipo *E*, com gramagem de 450 g/m² e propriedades mecânicas de acordo com a Tabela 6. Após a cura total da placa do compósito, o mesmo foi esquadrejado nas dimensões já informadas para limpar as rebarbas existentes do processo de laminação.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e técnicas da resina UC-2095-20 UCEFLEX®

Resistência máxima à tração	14,3 MPa
Módulo de elasticidade à tração	2,8 GPa
Elongação à tração	1,25 %
Resistência máxima à flexão	77,4 MPa
Módulo de elasticidade à flexão	4,0 GPa
Dureza Barcol	51 UB
Densidade à 25°C	1,09 g/cm ³
Gel time	20 – 30 min
Tixotropia a 25°C	1,5
Viscosidade a 25°C	300 – 350 cPs

Fonte: Elekeiroz (2015)

Tabela 6 – Propriedades mecânicas da manta de fibra de vidro M710B Advantex®

	MPa (seco)	MPa (úmido)
Resistência à tração	76-96	69-83
Módulo de tração	7500-8900	5200-6200
Resistencia à flexão	165-193	130-140
Módulo de flexão	7500-8900	5300-6200

Fonte: Owens Corning (2015)

3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA

Para a usinagem dos ensaios foi utilizada uma fresadora CNC de três eixos da marca Dyna Myte, modelo DM4500 com comando numérico Mitsubishi 320M. Esta máquina dispõe de uma potência de 5,5 kW e uma árvore vertical com rotação máxima de 6000 rotações por minuto. A mesa do equipamento possui máximo deslocamento longitudinal de 500 mm (eixo X), transversal de 400 mm (eixo Y) e vertical de 500 mm (eixo Z). O cone do *spindle* desta máquina é padronizado (BT 40).

Esta máquina possui sistema de lubrificação de fluido de corte, mas não foi utilizado nos experimentos pelos motivos já levantados no capítulo anterior.

Os corpos de provas foram fixados por uma morsa parafusada à mesa da máquina, com auxílio de calços padronizados para ajustar a posição de altura. A máquina está localizada no bloco D da UCS, no centro integrado de manufatura.

3.3 FERRAMENTAS DE CORTE

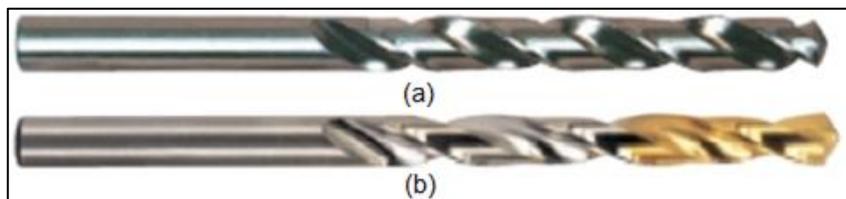
Quase toda a totalidade dos furos usinados na empresa, em peças destes compósitos, são realizadas de modo manual pelo operador, com furadeiras de fonte de energia pneumática acopladas em gabaritos de posicionamento. Desta forma não há uma

precisão dimensional elevada no furo realizado, a qual também não é exigida, descartando a utilização de brocas de metal duro pela fragilidade ao processo manual e alto custo destas ferramentas em comparação às de aço-rápido.

Por esta razão foi definido e utilizado, nos ensaios de furação, brocas helicoidais de aço-rápido, de classificação SAE M2, com diâmetro de corte de 6,0 mm, fabricadas conforme norma alemã DIN 338.

Para os experimentos foram divididas as ferramentas de corte em dois grupos principais (Figura 10), o primeiro grupo com brocas helicoidais sem revestimento, e o segundo possuindo revestimento de nitreto de titânio (TiN).

Figura 10 – Brocas helicoidais de aço-rápido (a) sem revestimento e (b) com revestimento TiN



Fonte: O autor (2016)

Ambos as brocas dos dois grupos são fabricadas pelo mesmo fornecedor e possuem geometrias semelhantes, como o ângulo de ponta (σ) de 118° , ângulo de hélice entre 20° e 30° e comprimento total da broca de 93 mm, sendo 57 mm de comprimento de corte.

Antes dos ensaios as brocas foram identificadas, as marcações foram realizadas com auxílio de um lápis eletrônico. Na haste da broca foi informado o número de sequência da ferramenta (A, RA1, B, RB1, C, RC1), já nos flancos de corte dos gumes foram realizados dois tipos de marcações, sendo marcado um ponto para um dos flancos e dois pontos para o outro flanco. Estes pontos demarcados serviram com o objetivo de serem os pontos de origem para verificar as medições dos desgastes ocorridos nas brocas durante os ensaios.

A fixação das brocas ao CNC se deu por meio do uso de pinças, as mesmas padronizadas conforme o cone *spindle* da máquina.

3.4 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte, velocidade de corte (v_c) e avanço (f), foram definidos tomando como base as informações coletadas na revisão bibliográfica, bem como também a partir de dados dos pré-testes realizados e informações de chão-de-fábrica.

Na Tabela 7 contemplam os parâmetros definidos para os ensaios. Todas as furações do experimento foram realizadas considerando furos passantes, com profundidade do furo de 18 mm correspondente a três vezes o diâmetro da broca (resultando em furação

curta). Definiu-se uma distância padrão de 9,0 mm entre cada centro dos furos, sendo deixada uma espessura de parede de 3 mm a cada furação.

Tabela 7 – Parâmetros de corte para ensaios de furação

Identificação da ferramenta	Revestimento	Velocidade de corte (v_c) (m/min)	Avanço (f) (mm/rot)
Broca A e RA1	Sem revestimento	40 (2122 rpm)	0,2
Broca B e RB1	TiN		
Broca C e RC1		80 (4244 rpm)	

Fonte: O autor (2015)

3.5 MEDIÇÃO DE DESGASTES

Inicialmente foram analisados os gumes de corte das brocas na condição de novas. Após, para as medições de desgastes das ferramentas durante dos ensaios, as mesmas foram avaliadas em intervalos de quantidade de furos, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Intervalo de medição de desgastes de ferramentas

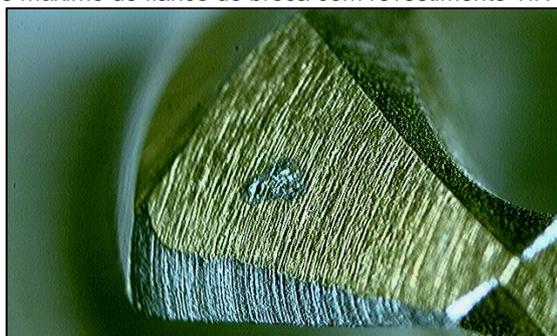
Ferramentas	Intervalo de furos															
Brocas A e RA1	nova	1	3	5	10	20	30	40	50	60						
Brocas B e RB1	nova	1	3	5	10	20	30	40	50	60	70	90	120	180	240	300
Brocas C e RC1	nova				10		30			60		90	120	180		

Fonte: O autor (2016)

Para a obtenção de imagens foi utilizado um microscópio trinocular da marca Entex, acoplado com uma câmera digital CCD, modelo MDCE-5A, possibilitando ampliações máximas de até 45 vezes. Em todas as análises a ampliação utilizada foi de quinze vezes.

Posteriormente foram mensurados os desgastes com o auxílio do software *ScopePhoto*, limitando a vida da ferramenta e o término dos ensaios quando obtido um desgaste máximo de flanco (VB_{max}) de 0,6 mm, ou superior a este valor, em pelo menos um dos gumes (Figura 11). Ambos os equipamentos e software estão situados no bloco D, sendo de posse da UCS.

Figura 11 – Desgaste máximo de flanco de broca com revestimento TiN ensaiada no pré-teste



Fonte: O autor (2015)

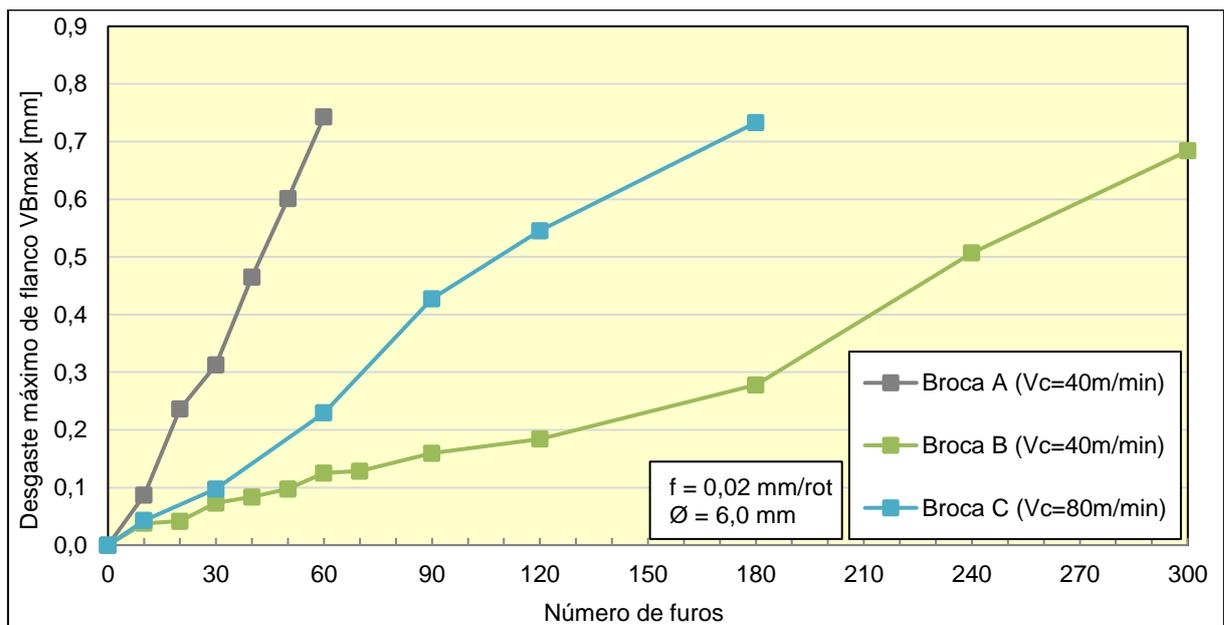
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, seguidos por análises. São mostrados quais os desgastes ocorridos nas ferramentas utilizadas na furação dos corpos de provas do material específico, além de comparado os desempenhos destas diferentes ferramentas testadas em função a estes desgastes.

4.1 DESGASTE DE FLANCO MÁXIMO

O gráfico da Figura 12 descreve os comportamentos dos desgastes de flanco máximo das brocas A, B e C, ensaiadas utilizando como parâmetros um avanço de 0,2 mm/rot. e velocidades de corte igual a 40 e 80 m/min.

Figura 12 – Resultados de desgastes de flanco máximo



Fonte: O autor (2016)

Analisando as curvas de desgastes de flanco máximo, nota-se que a broca A, a qual não possui revestimento, sofreu um desgaste rápido em comparação às demais brocas que possuem revestimento, chegando a apenas 50 furos quando alcançado o limite de fim de vida da ferramenta definido em 0,6 mm. Em contrapartida, a broca B, com revestimento de nitreto de titânio, que foi ensaiada com os mesmos parâmetros da broca A (sem revestimento) obteve os melhores resultados quanto ao número de furos até atingir seu final de vida, alcançando aproximadamente 270 furos.

Os resultados da broca C (também com revestimento de nitreto de titânio), a qual foi ensaiada mantendo o avanço idêntico aos outros ensaios, mas dobrando a velocidade de corte para 80 m/min, mostrou-se favorável quando comparada com a broca sem revestimento (A), já que alcançou pouco mais de 140 furos até o limite de vida da ferramenta.

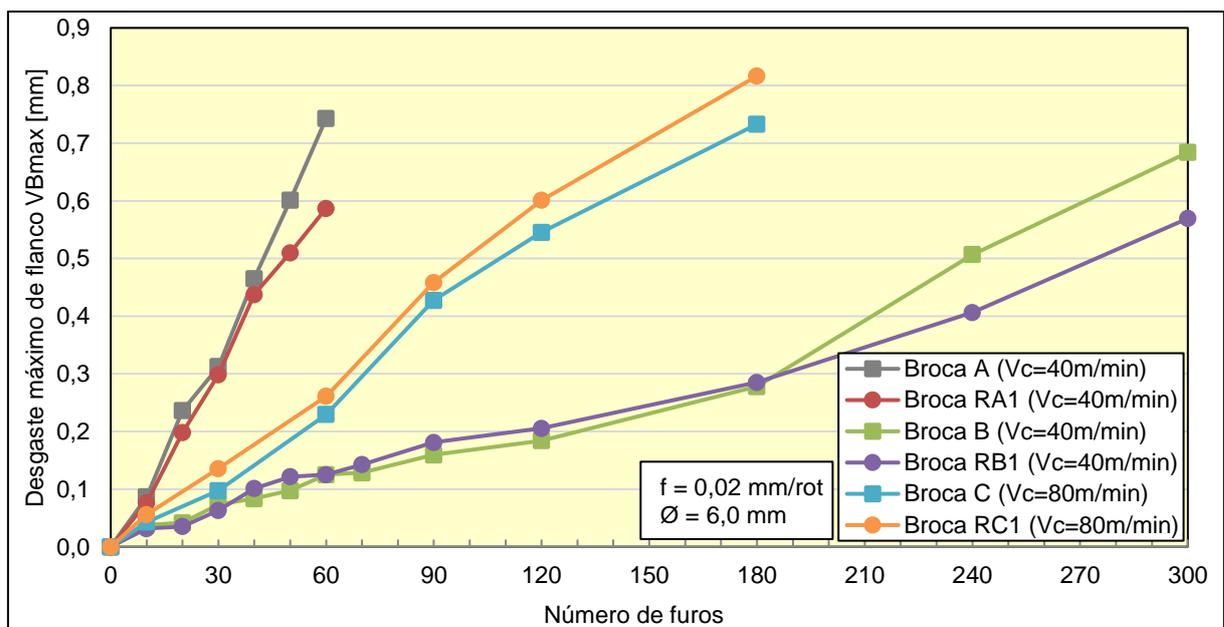
Pode-se afirmar também que até o trigésimo furo realizado com as brocas B e C (brocas idênticas com revestimento de nitreto de titânio, diferenciando-as nos ensaios pela velocidade de corte) há um comportamento muito similar entre os desgastes ocorridos de flanco.

Comparando todos os ensaios, os melhores resultados obtidos foram constatados com a utilização da broca helicoidal de aço rápido com revestimento de nitreto de titânio e parâmetro de velocidade de corte de 40 m/min.

4.2 CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS

Analisando o comportamento dos desgastes nas ferramentas ensaiadas, nota-se pelo gráfico da Figura 13, uma boa repetitividade dos resultados das réplicas RA1, RB1 e RC1 respectivamente com relação aos ensaios das brocas A, B e C. Desta forma, com o objetivo de simplificar os ensaios, decidiu não ser necessária a realização de mais ensaios com novas réplicas, reduzindo a quantidade de ferramentas ensaiadas.

Figura 13 – Repetitividade dos resultados de desgastes de flanco



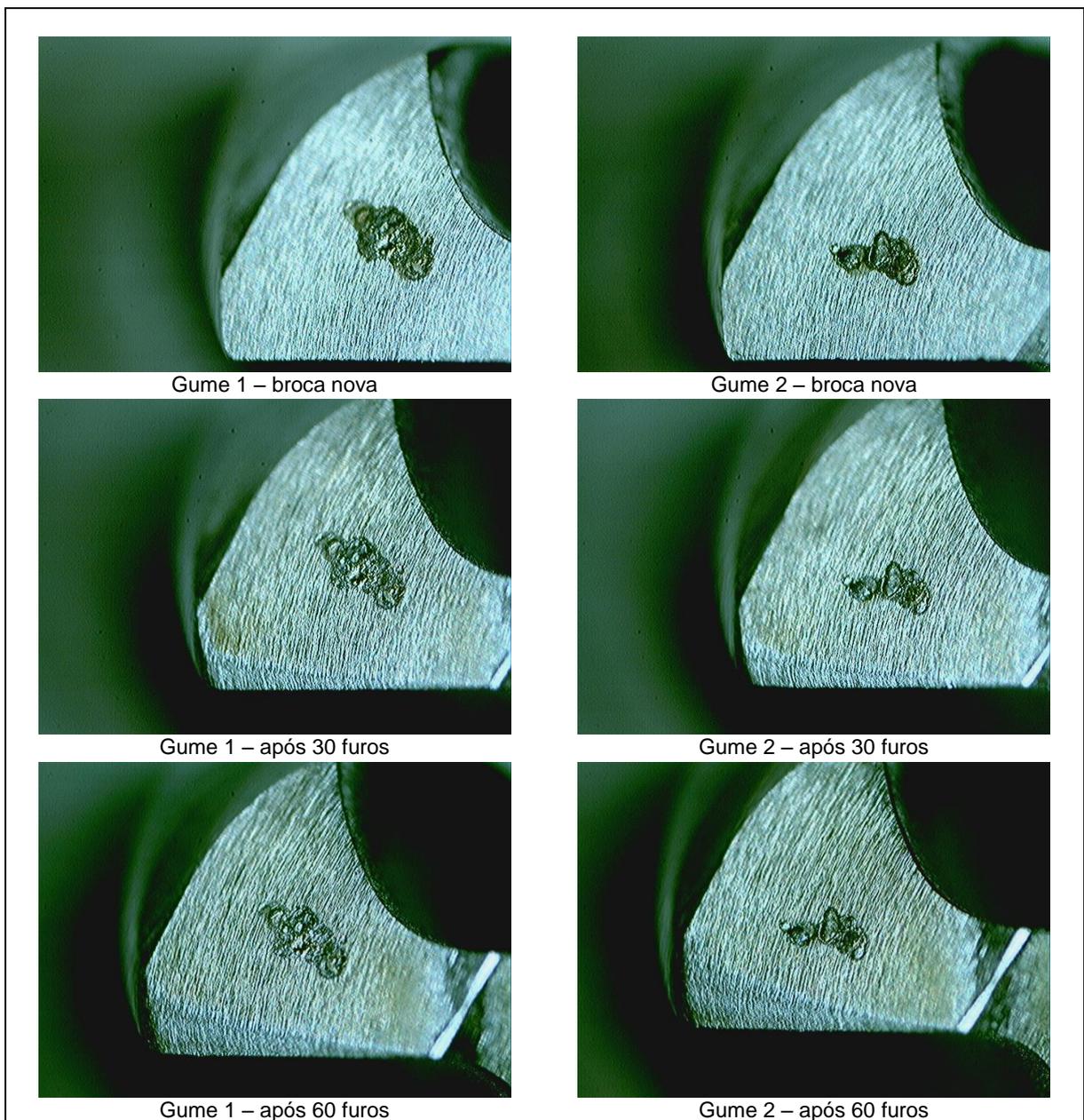
Fonte: O autor (2016)

4.3 ANÁLISE DOS DESGASTES DA FERRAMENTA

Entre os ensaios realizados e imagens coletadas, foi possível identificar como causas dos desgastes das ferramentas unicamente a abrasão.

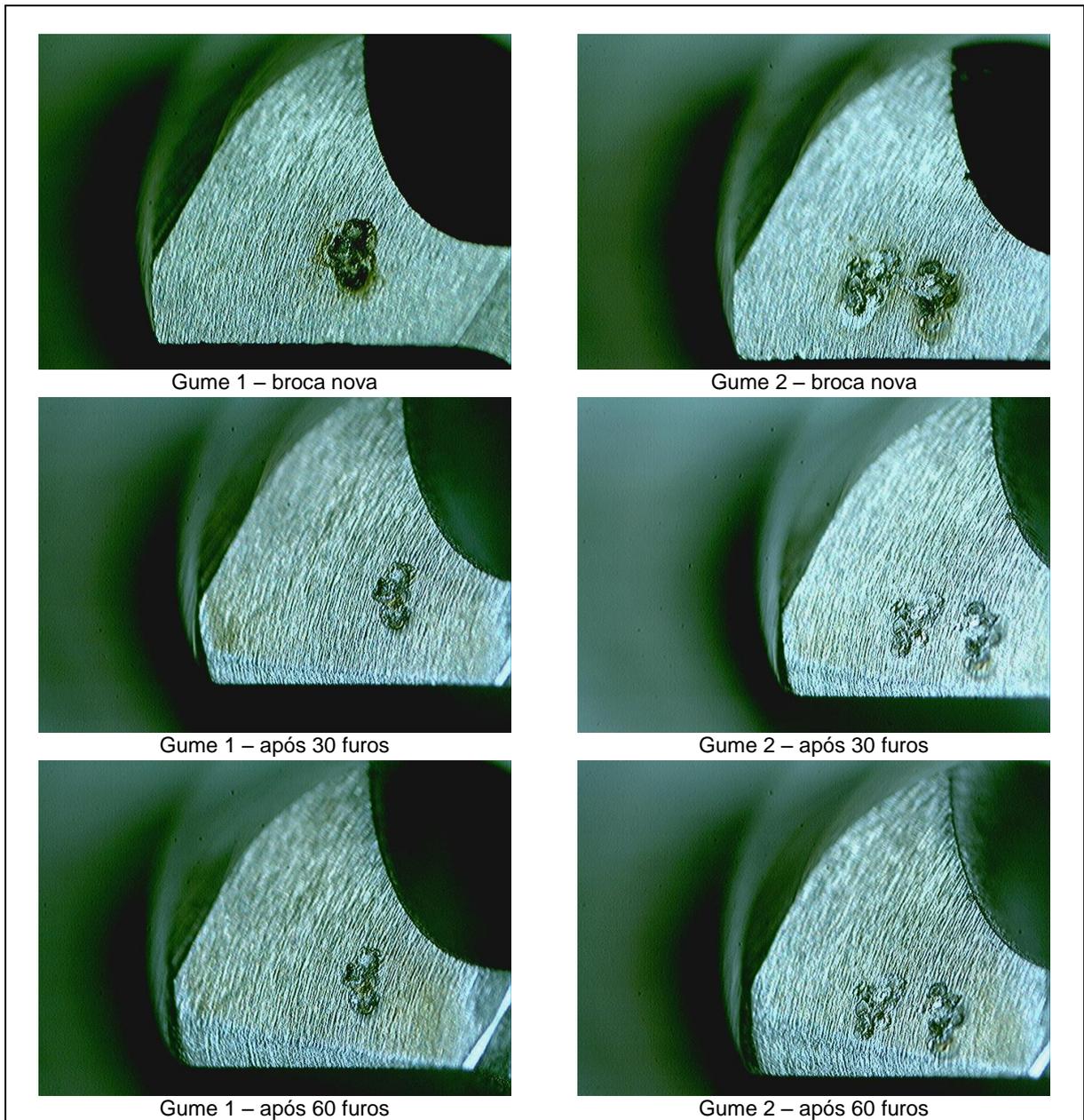
Nos ensaios com as brocas que não possuem revestimento, A e RA1, notou-se um desgaste bastante uniforme (Figuras 14 e 15) até o fim da vida das ferramentas, podendo ser visualizada esta abrasão a partir do terceiro furo.

Figura 14 – Desgastes analisados na broca A



Fonte: O autor (2016)

Figura 15 – Desgastes analisados na broca RA1



Fonte: O autor (2016)

Nos ensaios com as brocas B e RB1 é possível notar o início do desgaste de abrasão a partir do quinto furo. Diferentemente dos desgastes ocorridos nas brocas sem revestimento, estes desgastes não ocorrem de maneira tão uniforme, o que pode ser notado a partir do furo de número 50 até o final dos ensaios (Figuras 16 e 17). Percebe-se também nos ensaios, que a camada de revestimento de nitreto de titânio começa a ser removidas dos gumes entre os furos de números 20 e 40.

Figura 16 – Desgastes analisados na broca B

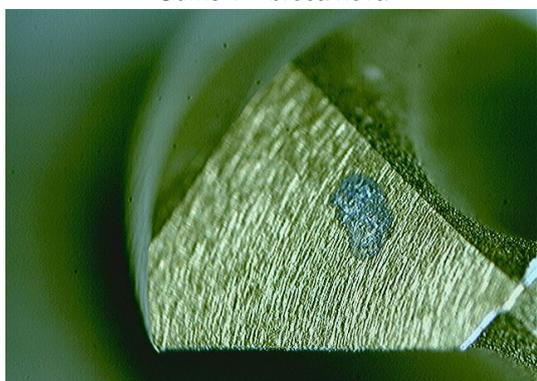
(continua)



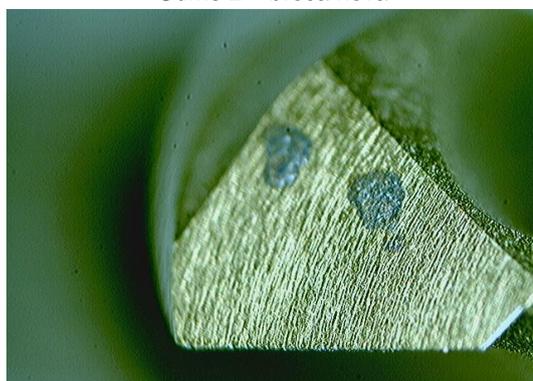
Gume 1 – broca nova



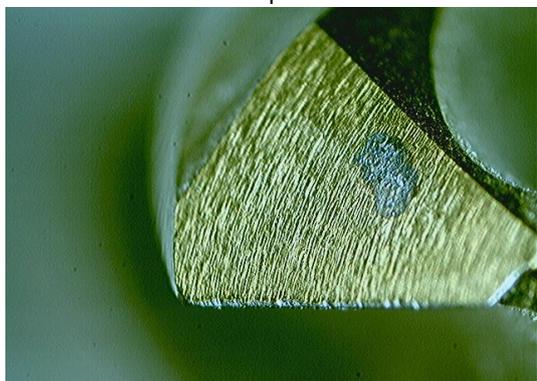
Gume 2 – broca nova



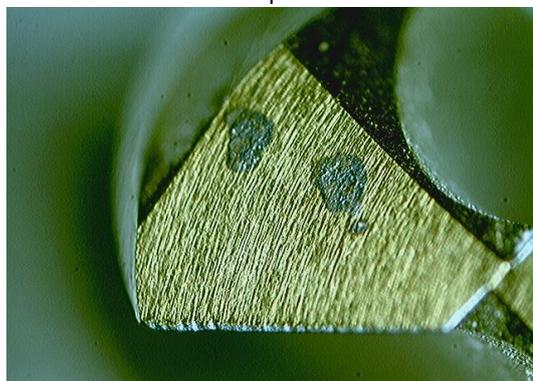
Gume 1 – após 30 furos



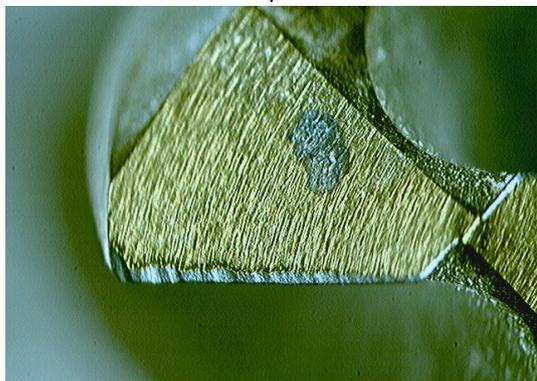
Gume 2 – após 30 furos



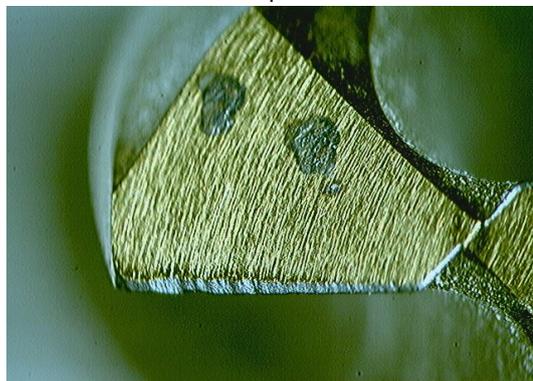
Gume 1 – após 90 furos



Gume 2 – após 90 furos

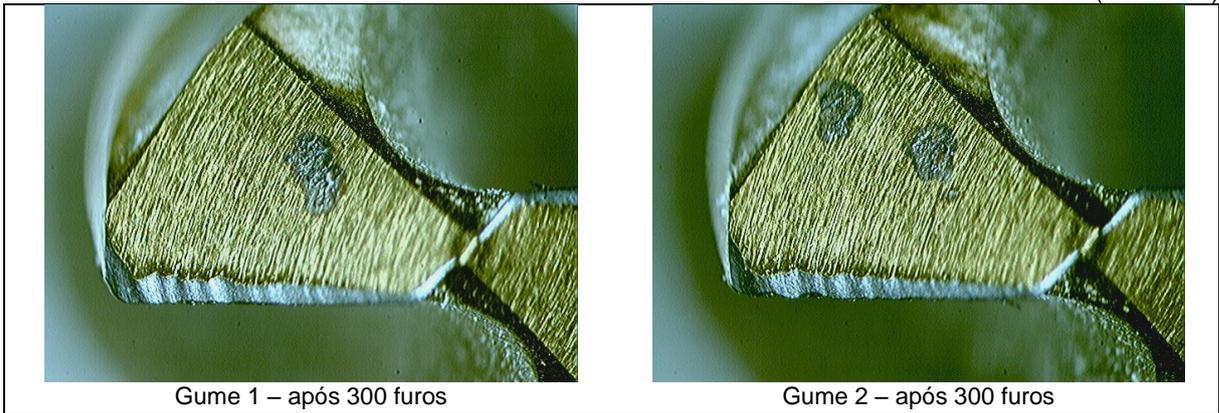


Gume 1 – após 180 furos



Gume 2 – após 180 furos

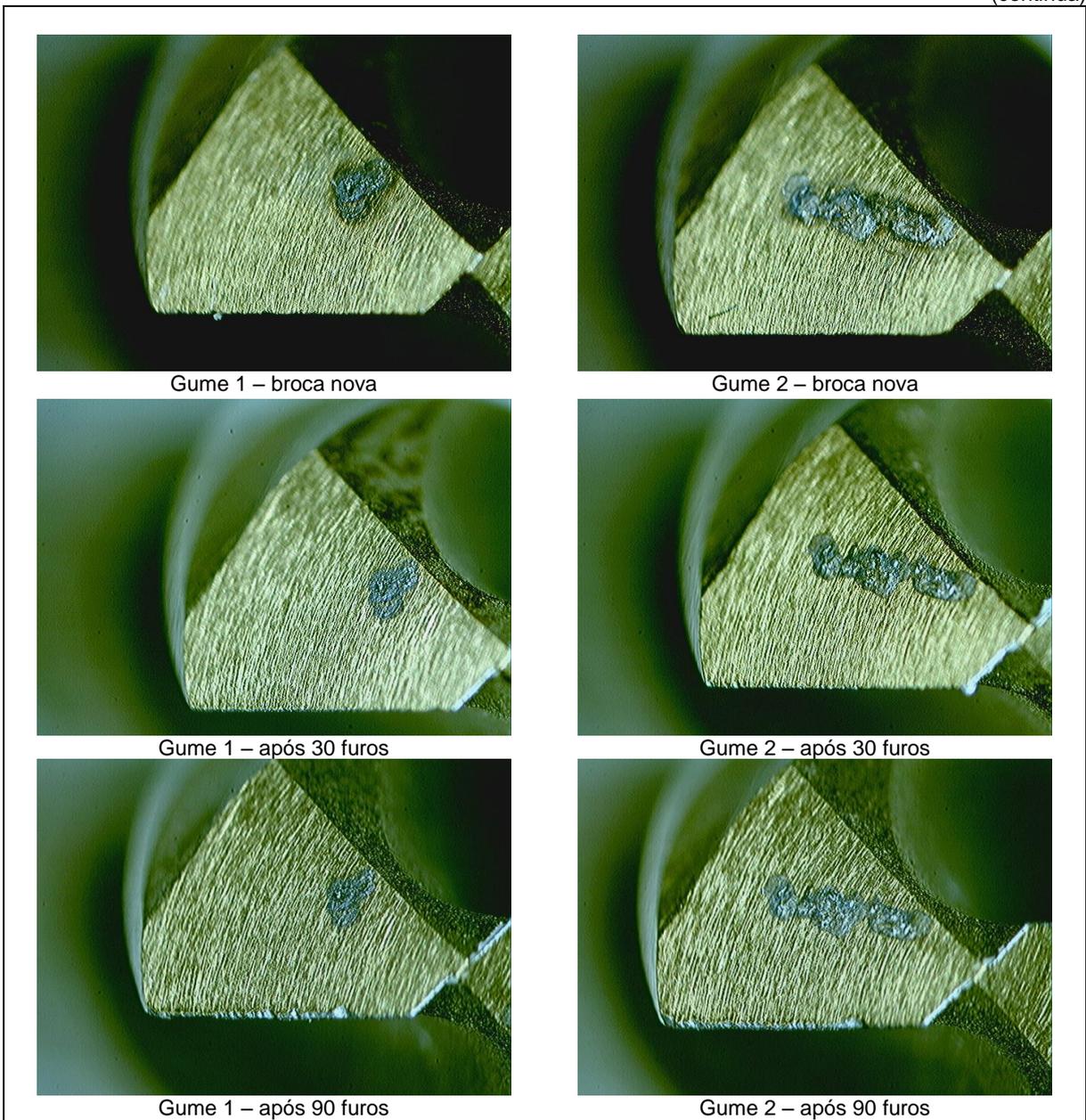
(conclusão)



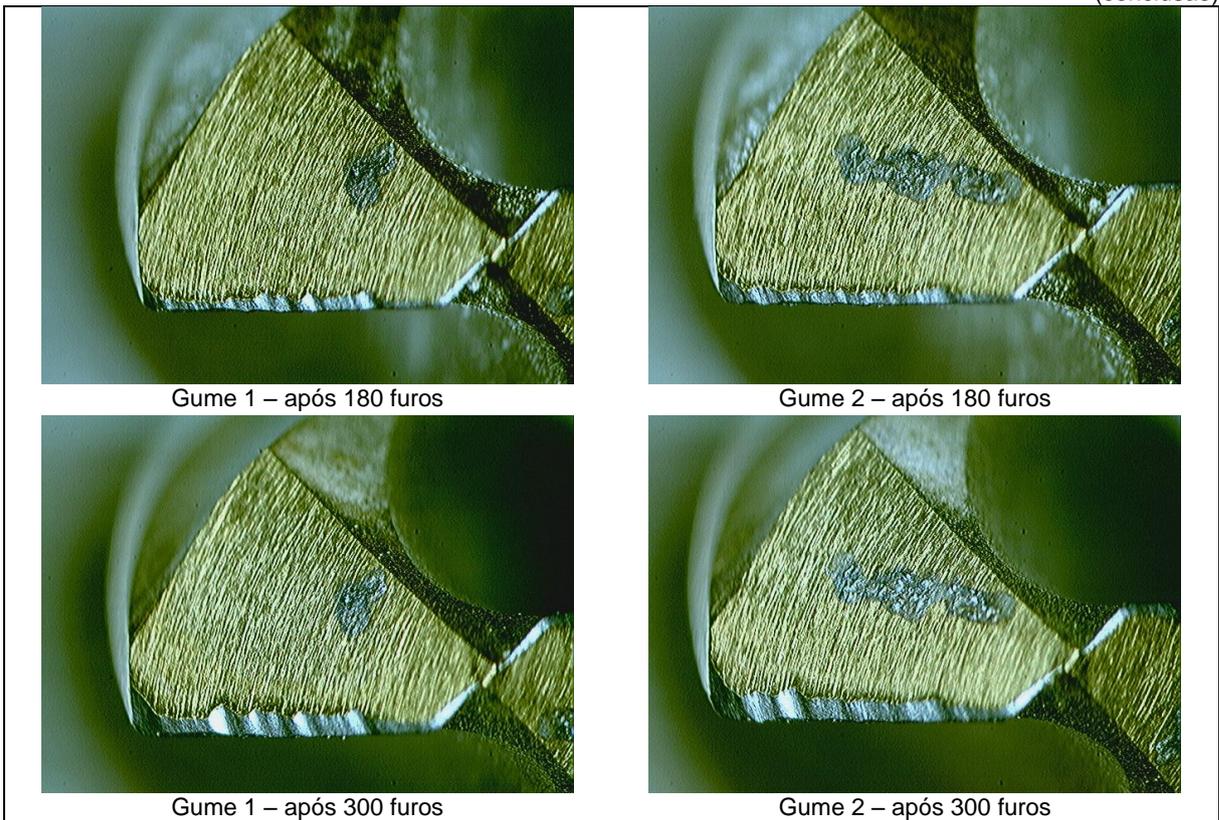
Fonte: O autor (2016)

Figura 17 – Desgastes analisados na broca RB1

(continua)



(conclusão)

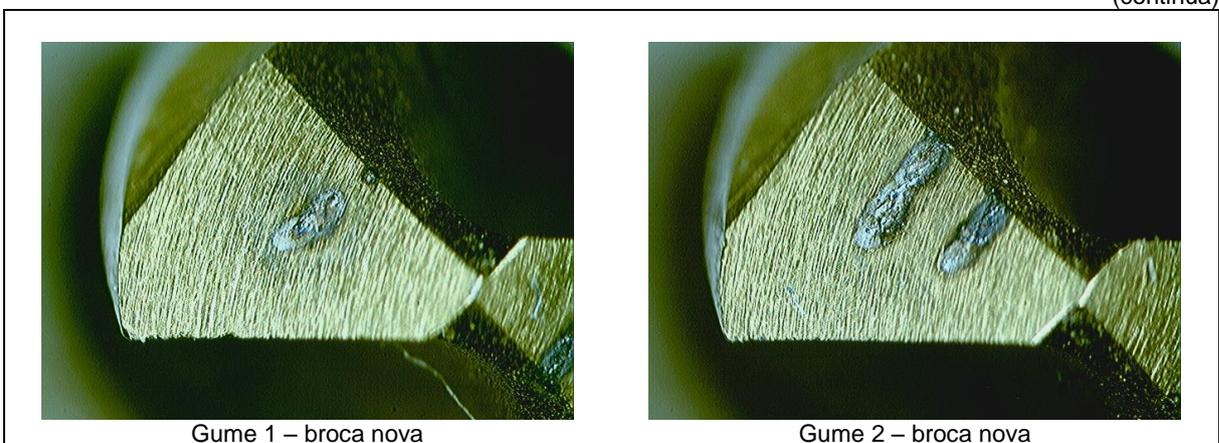


Fonte: O autor (2016)

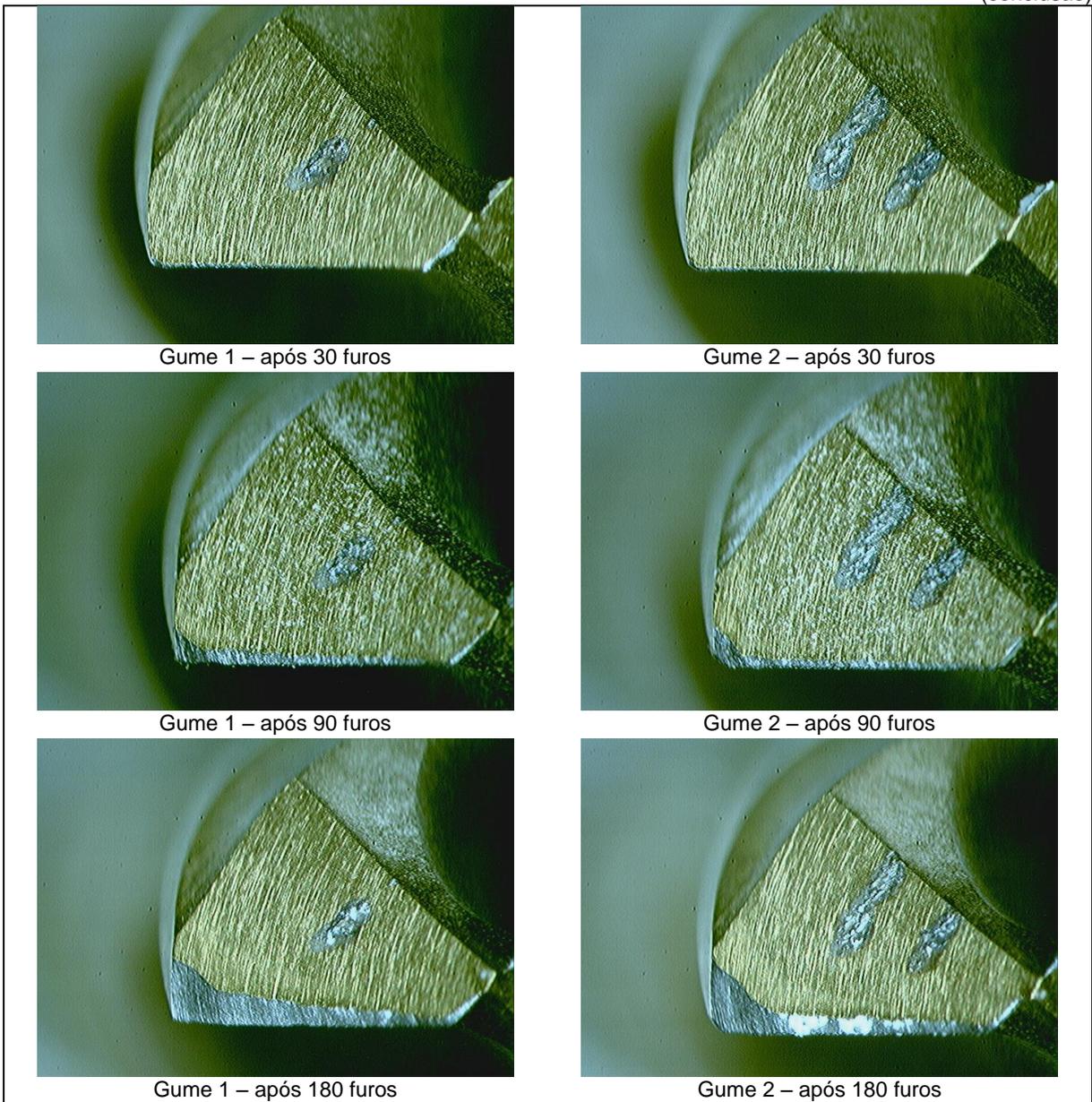
Por fim, nas Figuras 18 e 19 pode-se verificar que os desgastes por abrasão ocorridos nas brocas com revestimento de nitreto de titânio, C e RC1, são semelhantes quanto à uniformidade dos desgastes ocorridos nas brocas sem revestimentos. Percebe-se também que a camada de revestimento visivelmente começa a ser removidas dos gumes entre os furos de números 10 e 30 até o final dos ensaios.

Figura 18 – Desgastes analisados na broca C

(continua)



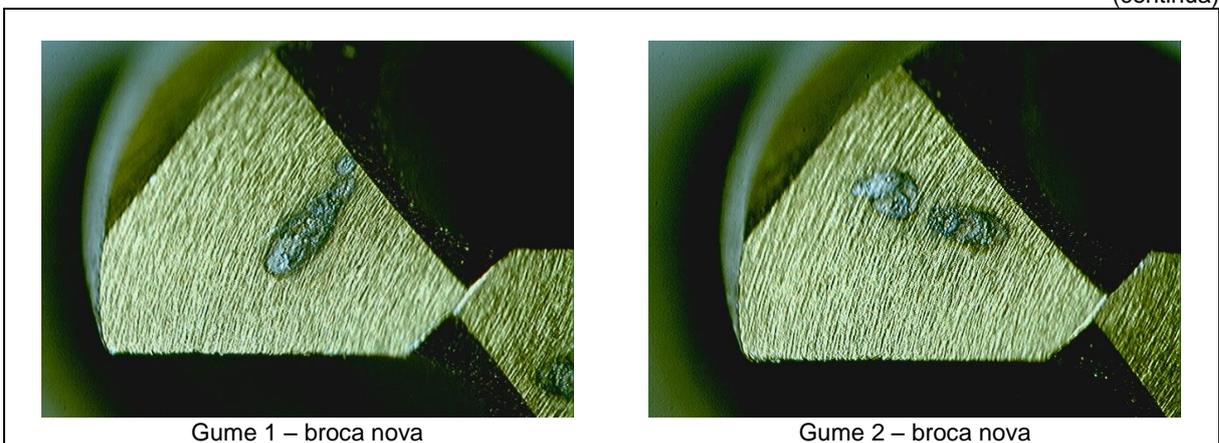
(conclusão)



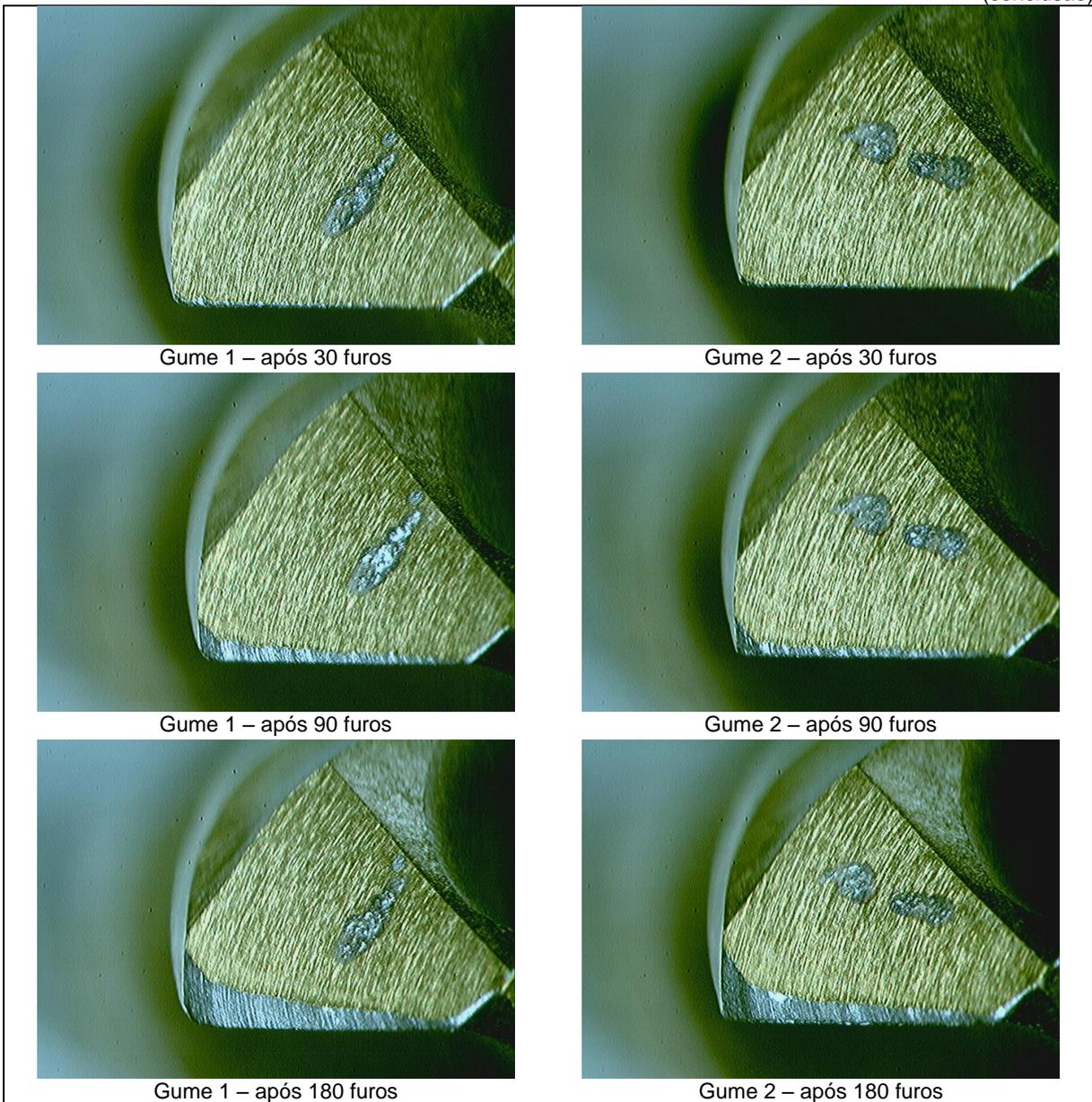
Fonte: O autor (2016)

Figura 19 – Desgastes analisados na broca RC1

(continua)



(conclusão)



Fonte: O autor (2016)

Verifica-se em algumas das imagens capturadas, dos gumes na condição de brocas novas, que há micro defeitos no gume de corte. Estes defeitos podem estar atrelados a características de fabricação destas brocas de aço rápido. Os mesmos não influenciaram os resultados obtidos nos ensaios.

4.4 ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA

Durante a realização dos ensaios de furação do compósito, verificou-se que ocorreram efeitos de delaminações nos corpos de prova, em especial, delaminação à saída, como visualizado na Figura 20. Estes efeitos ocorreram em todos os ensaios, independente

da broca utilizada, não sendo possível notar diferenças visíveis quando assim comparados (sem auxílio de equipamentos). Estes danos podem ter relação direta com as forças de corte, decorrentes do processo e principalmente atrelados às características do material.

Figura 20 – Efeito de delaminação à saída apresentada nos corpos de prova



Fonte: O autor (2016)

Nos corpos de provas pode-se verificar também a ocorrência de arrancamento de fibras, possivelmente influenciados pelos mesmos motivos já comentados. Não foram detectados danos térmicos ou fissuras.

5 CONCLUSÃO

Inicialmente, conclui-se sobre a elevada abrasividade do compósito utilizado, a qual possui fibras de vidro (material mais duro em comparação ao aço rápido) ocasionando unicamente desgaste por abrasão nas ferramentas ensaiadas, fator pelo qual gera-se a necessidade de substituição prematura destas ferramentas como abordado na revisão bibliográfica por Durão et al. (2004).

Observa-se que, na prática da empresa, os equipamentos utilizados para obtenção da grande maioria dos furos de peças fabricadas com estes compósitos não possuem ajustes de variação para a rotação da ferramenta, por consequência também não há variação na velocidade de corte. Somando estas informações com os resultados dos ensaios realizados, conclui-se que utilizando a broca B, obtém-se os melhores resultados e rendimentos, em número de furos usinados, superior a cinco vezes à utilização da broca A, também confirmando as afirmações de Chiaverini (1996) e Diniz, Marcones e Coppini (2010).

Em casos de utilização de equipamentos com possibilidade de variação da rotação da ferramenta, conclui-se que ainda há vantagem no uso de brocas com revestimento de TiN sobre as brocas sem revestimento, como afirmado na revisão bibliográfica por Castillo (2005). Todas estas informações são verificadas na utilização da broca C, dobrando a velocidade de corte, há aproximadamente o dobro do rendimento no número de furos comparado à broca A.

Além do apontamento acima, é necessário frisar que aumentando a velocidade de corte há vantagem no tempo de corte, o qual é reduzido, ocasionando maior produção de peças em um mesmo período de tempo.

Na relação da comparação dos ensaios com as brocas B e C conclui-se que o rendimento das brocas é maior utilizando velocidades de corte menores, como no caso do ensaio a 40 m/min. Esta conclusão encaixa-se dentro das afirmações feitas por Durão et al. (2006), Reis (2005), Silva (2016) e Stemmer (2005).

Pode-se concluir que a razão do desgaste precoce da broca C comparada a broca B está relacionada diretamente ao maior atrito e efeitos de temperatura gerado no processo, o qual, conforme Bordinassi et al. (2004) é, em elevada porcentagem, dissipada para a ferramenta e não ao cavaco ou corpo de prova.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de dar continuidade às pesquisas sobre o assunto deste trabalho, seguem abaixo propostas:

a) analisar e comparar os defeitos de delaminação ocorridos nos corpos de provas, relacionados a cada geometria de ferramenta ensaiada e dados de parâmetros de corte utilizados, atrelados com os resultados de acabamentos superficiais dos furos;

b) analisar a viabilidade econômica da substituição de ferramentas, verificando custo final da utilização de cada geometria de ferramenta com determinado parâmetro de corte na produção de peças, levando em consideração custo da ferramenta, custo do tempo de processo e atendimento à qualidade superficial dos furos;

c) realizar novos ensaios, verificando a relação das forças de corte resultantes em cada ensaio comparadas a qualidade obtida nos respectivos furos.

REFERÊNCIAS

- ABRATE, Serge. Machining of Composite Materials. In: MALLICK, P.K. **Composites Engineering Handbook**. New York: Marcel Dekker, p. 777–809, 1997
- ALVAREZ, Alexandre A. et al. Avaliação da delaminação na furação de materiais compósitos com matriz de resina epóxi modificada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Itatiaia. **Anais...** . Itatiaia: ABCM, 2013.
- ANDRADE, Óscar N. G. **Estudo de delaminação em compósitos de matriz polimérica**. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6176**: brocas helicoidais. Rio de Janeiro, 1978.
- BUDAN, Dummi A. et al. Influence of fiber volume reinforcement in drilling GRFP laminates. **Journal of Engineering Science and Technology**. Selangor, v. 6, n. 6, p. 733-744, dec. 2011
- BORDINASSI, Ed C. et al. Investigações sobre o processo de furação. In: **Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação**, 2004, São Paulo. Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação, 2004.
- CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CASTILLO, Willian J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com broca de metal-duro com canais retos**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **Parallel shank twist drills, jobber series**. DIN 338, 2006.
- DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES, Francisco C.; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Artliber, 2010.
- DURÃO, Luís. M. P. et al. Maquinagem de compósitos de matriz polimérica. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. Madri, v. 10, n. 2, p. 59-67, maio 2006.
- DURÃO, Luís. M. P. et al. Estudo da furação de laminados carbono-epóxico com diferentes brocas. In: CONGRESSO 4^{as} JORNADAS POLITÉCNICAS DE ENGENHARIA, 2004, Porto. **Anais...** Porto: ISEP, 2004.
- DURÃO, Luís. M. P. et al. Drilling Damage in Composite Material. **Materials**. Basel, v. 7, n. 5, p. 3802-3819, maio 2014.
- ELEKEIROZ. **Resinas de poliéster**. Disponível em: <<http://www.elekeiroz.com.br/PT/produtos/Paginas/especificacoes.aspx>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

FARIA, Paulo E. de. **Estudo sobre a furação de compósitos de resina epóxi reforçado com fibras de vidro**. 2007. 231 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blücher, 2014.

GONÇALVES, Daniel J. S. **Avaliação de ferramentas e condições de corte na furação de laminados compósitos**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

GONÇALVES, Daniel J. S. et al. Avaliação de ferramentas na furação de laminados compósitos. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 23, n. 1/2, p. 109-113, jan. 2011.

JESSY, K. et al. Influence of different cooling methods on drill temperature in drilling GFRP. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. London, v. 76, n. 1/4, p. 609-621, jan. 2015.

KLOCKE, Fritz. **Manufacturing Processes 1: cutting**. 1. ed. RWTHedition, 2011.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5. ed. Berlin: Springer, 1997.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

MILATIAS, Guilherme. Introdução aos materiais compósitos. **O Mundo da Usinagem**, São Paulo, v. 1, n. 102, p.14-20, dez. 2014. Mensal.

OWENS CORNING. **Mantas de fibra picada**. Disponível em: <www.owenscorning.com.br/pt-br/compositos-produtos-produto?id=71>. Acesso em: 27 out. 2015.

PASCAULT, Jean-Pierre et al. **Thermosetting polymers**. New York: Marcel Dekker, 2002.

PINTO, Kelly N. C. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

REIS, Pedro E. V. dos. **Furação de materiais compósitos de matriz polimérica**. 2005. 230 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

REZENDE, Bruna A. et al. EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA FURAÇÃO DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador. **Anais...**. Salvador: ABCM, 2015.

SANDVIK DO BRASIL. **Manual técnico de usinagem**. São Paulo, Sandivick, 2005.

SANTOS, Carlos E. F. **Estudo e caracterização do processo de usinagem do compósito GLARE**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SILVA, Jhonatan A. **ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO EM COMPÓSITO COM MATRIZ DE POLIÉSTER REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, Jhonatan A. Furação de compósito com matriz de poliéster reforçado com fibras de vidro utilizado na indústria naval. **Manufatura em Foco**. Florianópolis, v. 1, n. 23, p. 26-34, jan./fev. 2016.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de corte I**. 6.ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 4.ed. Florianópolis: UFSC, 2008.