

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Jeferson Alecsander Rigo**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FURAÇÃO DO AÇO SAE 1012 COM BROCA DE**  
**METAL-DURO SEM REVESTIMENTO E COM FLUIDOS SEMISSINTÉTICOS**

Passo Fundo

2015

**Jeferson Alecsander Rigo**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FURAÇÃO DO AÇO SAE 1012 COM BROCA DE  
METAL-DURO SEM REVESTIMENTO E COM FLUIDOS SEMISSINTÉTICOS**

Orientador: Prof. Dr. Luis Airton Consalter

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo  
2015

Jeferson Alecsander Rigo

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA FURAÇÃO DO AÇO SAE 1012 COM BROCA DE METAL-DURO SEM REVESTIMENTO E COM FLUIDOS SEMISSINTÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 28 de agosto de 2015.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Luis Airton Consalter  
Orientador

Professor Doutor André João de Souza  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor José Antônio Portella  
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Nilson Luis Maziero  
Universidade de Passo Fundo

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha família, em especial à minha esposa Luiza, pelo companheirismo e aos meus pais João e Marlene, pelo exemplo de vida que sempre me deram.

Ao Professor e orientadores neste trabalho, Prof. Dr. Luiz Airton Consalter, pela dedicação e empenho durante todo o período.

Ao Prof. Dr. José Antônio Portella, pelo auxílio na abordagem estatística dos resultados obtidos.

Aos colegas da equipe técnica dos Laboratórios da Engenharia Mecânica da UPF, pelo empenho e apoio dado em todas as atividades necessárias à conclusão do trabalho de pesquisa.

À Universidade de Passo Fundo, pela disponibilização dos laboratórios, equipamentos e equipe de apoio, possibilitando assim a realização desse trabalho de pesquisa.

À empresa ARWI de Caxias do Sul, RS pelo apoio no fornecimento das brocas e no óleo *Superedge 6552* da CASTROL, além das informações técnicas necessárias ao desenvolvimento desse trabalho.

À empresa CASA DOS LUBRIFICANTES de Caxias do Sul, RS pelo apoio no fornecimento do óleo *Cutting Oil 351*, além das informações técnicas necessárias ao desenvolvimento desse trabalho.

À empresa STARA S.A. Filial Carazinho, RS pela disponibilização da matéria-prima para os corpos de prova utilizados na realização desse trabalho de pesquisa.

## RESUMO

O desempenho de brocas no processo de furação depende da combinação de uma série de fatores, como o material da peça a ser furado, material da broca e uso de recobrimentos, condições e fluidos de corte utilizados, entre outros. Com base nessas variáveis, esse trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de brocas de metal-duro sem revestimento na furação do aço SAE 1012, com o uso de dois fluidos de corte semisintéticos. Foram feitos experimentos de furação, sendo a quebra da ferramenta, o critério de final de vida utilizado. Os experimentos foram repetidos para os dois fluidos com o uso de três velocidades de corte. As velocidades adotadas foram a mínima e máxima recomendadas para a broca, além de uma terceira velocidade média entre os valores anteriores. Para cada velocidade e fluido foram feitas três repetições de experimentos. Os resultados foram avaliados estatisticamente demonstrando que não houve diferença entre os fluidos na quantidade total de furos feitos. No comparativo entre as velocidades, independente do fluido utilizado, a menor velocidade de corte resultou em maior desempenho, quando comparada às demais condições. Na interação entre fluido e velocidade, ficou evidenciado que o resultado para cada fluido depende da velocidade, assim como, o resultado para cada velocidade depende do fluido utilizado. O principal mecanismo de desgaste foi a aderência, com consequente lascamento das arestas, que resultou na destruição da geometria da ponta da broca. O mecanismo de abrasão também foi observado, porém, não influenciou diretamente nos resultados.

Palavras-chave: Fluidos de Corte; Usinabilidade; Desgaste de Brocas.

## **ABSTRACT**

The drills performance at the drilling process depends on the combination of a series of factors like the material of the piece to be drilled, the material of the drill and the use of overlaying, conditions and cut fluids used, amongst others. Based on these variables this study has the goal of analysing the hard metal drills without covering performance at the SAE 1012 steel drilling, using two semisynthetic cut fluids. Drilling tests were performed, with the tool breaking being the end of life criteria used. The tests were repeated on both fluids using three different cutting speeds. The speeds adopted were the minimum and maximum recommended for the drill in addition to a third medium speed between the previous values. To each speed and fluid three series of tests were performed. The results were statistically evaluated showing that there was no difference between the fluids regarding the total number of holes created. Comparing the speeds, regardless of the fluid used, the lower cutting speed resulted in higher performance when compared to the other conditions applied. During the interaction between the fluid and the speed it was demonstrated that the result for each fluid depends on the speed as well as the result for each speed depending on the fluid used. The main wear mechanism was the adherence with posterior edge chipping which resulted in the destruction of the drill edge shape. The abrasion mechanism was also observed, although, it did not directly affect the results.

Key words: Cut Fluid; Machinability; Drill Wear.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Geometria da ponta da broca helicoidal .....	20
Figura 2	Região de deformações de material (a). Fluxo de cavaco periférico (b).....	21
Figura 3	Desgaste de flanco de brocas para $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot	22
Figura 4	Desgaste de flanco de brocas para $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.....	23
Figura 5	Desgastes em brocas .....	24
Figura 6	Desgastes em brocas helicoidais .....	24
Figura 7	Desgaste de flanco (a). Desgaste de flanco secundário (b). Desgaste de flanco na aresta transversal (c) (d) .....	25
Figura 8	Aresta postiça de corte .....	26
Figura 9	Lascamento na periferia em (a) e lascamento na aresta principal em (b) .....	27
Figura 10	Curva de desgastes para diferentes fluidos .....	29
Figura 11	Desgaste na ferramenta com aplicação do fluido de corte em jorro (a); Desgaste na ferramenta com aplicação do fluido de corte a 15 MPa (b) .....	30
Figura 12	Valores de desgaste de ponta .....	31
Figura 13	Aspecto da superfície da ferramenta com material aderido .....	31
Figura 14	Aspecto da superfície da ferramenta após decapagem .....	32
Figura 15	Interfaces de contato ferramenta – peça – cavaco .....	36
Figura 16	Direções possíveis de aplicação do fluido .....	37
Figura 17	Geometria da broca .....	28
Figura 18	Leitura no refratômetro .....	42
Figura 19	Corpo de prova .....	43
Figura 20	Fixação do corpo de prova .....	45
Figura 21	Sequência de furação .....	46
Figura 22	Análise de variância .....	52

Figura 23	Media das raízes dos números de furos para cada fluido .....	52
Figura 24	Media das raízes dos números de furos para cada velocidade .....	53
Figura 25	Gráfico das médias da raiz quadrada do número de furos para cada velocidade .....	53
Figura 26	Comparativo dos fluidos para velocidade de 67 m/min .....	54
Figura 27	Comparativo dos fluidos para velocidade de 74,5 m/min .....	54
Figura 28	Comparativo dos fluidos para velocidade de 82 m/min .....	54
Figura 29	Gráfico das médias da raiz quadrada do número de furos para as velocidades em cada fluido .....	55
Figura 30	Geometria da ponta da broca. (a) Flanco principal, (b) Flanco secundário, (c) Face.....	56
Figura 31	Adesão na superfície principal de folga durante os primeiros furos para a $v_c$ de 67 m/min e $f_n$ de 0,031 mm/rot. (a1) – furo n.º. 5, (a2) – furo n.º. 10 e (a3) – furo n.º. 15, para aresta de corte n.º. 1. (b1) – furo n.º. 5, (b2) – furo n.º. 10 e (b3) – furo n.º. 15 para aresta de corte n.º. 2. .	57
Figura 32	Adesão na superfície principal de folga durante os primeiros furos para a $v_c$ de 67 m/min e $f_n$ de 0,031 mm/rot. (a1) – furo n.º. 25, (a2) – furo n.º. 50 e (a3) – furo n.º. 100, para aresta de corte n.º. 1. (b1) – furo n.º. 25, (b2) – furo n.º. 50 e (b3) – furo n.º. 100 para aresta de corte n.º. 2. ....	58
Figura 33	Superfície principal de folga após decapagem. (a1) – aresta de corte n.º. 1. (b1) aresta de corte n.º. 2 .....	60
Figura 34	Lascamentos nas arestas principais de corte. (a) e (b) – aresta de corte n.º. 1. (c) aresta de corte n.º. 2 .....	61
Figura 35	Linha de desgaste na aresta principal de corte 2 e micro lascamentos..	62
Figura 36	Micro lascamentos. (a) – Quina da ferramenta. (b) Aresta principal de corte .....	63
Figura 37	Superfície secundária de folga para a $v_c$ de 67 m/min e $f_n$ de 0,031 mm/rot. (a) – furo n.º. 100 para a aresta de corte n.º. 1, (b) – furo n.º. 100 para a aresta de corte n.º. 2. ....	64
Figura 38	Quina da aresta de corte 2 para o furo de número 100 .....	64
Figura 39		

	Face da ferramenta. (a) – furo n° 100, para aresta de corte n° 1. (b) –	65
Figura 40	furo n° 100 para aresta de corte n° 2 .....	
	Evolução das avarias na superfície principal de folga para a $v_c$ de 67	
	m/min e $f_n$ de 0,031 mm/rot. (a) – ferramenta nova. (b) – furo n° 520.	
	(c) – furo n° 1040. (d) – furo n° 2080. (e) furo n° 3016. (f) – furo n°	66
	4056.....	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fluidos utilizados na furação do ferro fundido .....	28
Tabela 2	Parâmetros de corte da broca .....	39
Tabela 3	Concentrações por aplicação .....	39
Tabela 4	Características técnicas .....	40
Tabela 5	Indicação de uso do fluido .....	40
Tabela 6	Características técnicas .....	41
Tabela 7	Diluição para cada aplicação .....	41
Tabela 8	Análise química do material .....	42
Tabela 9	Concentração dos fluidos .....	44
Tabela 10	Distribuição e resultados dos ensaios .....	49
Tabela 11	Raiz quadrada dos números de furos .....	51
Tabela 12	Limites unilaterais de F ao nível de 5% de probabilidade $n_1 =$ número de graus de liberdade do numerador, $n_2 =$ número de graus de liberdade do denominador .....	81

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Alumínio
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
AlCrN	Nitreto de Cromo - Alumínio
Al-Si	Alumínio - Silício
B	Boro
C	Carbono
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CV	Coefficiente de variação
CVD	Chemical Vapor Deposition
DMS	Diferença mínima significativa
EP	Estrema pressão
Fe	Ferro
FEAR	Faculdade de Engenharia e Arquitetura
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MQF	Mínima quantidade de fluido
MLQ	Mínima quantidade de lubrificante
NaOH	Hidróxido de Sódio
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
NTM	Núcleo de Tecnologia Mecânica
P	Fósforo
Pb	Chumbo

PVD	Physical Vapor Deposition
S	Enxofre
SAE	Society of Automotive Engineers
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
Ti6Al4V	Liga de Titânio – Alumínio- Vanádio
TiALN	Nitreto de Alumínio – Titânio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
UPF	Universidade de Passo Fundo
V	Vanádio
W	Tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Avanço da ferramenta, mmm/rot
Cm	Largura do desgaste da aresta de corte transversal, mm
Crf	Concentração da Emulsão Pelo Refratômetro, %
Ct	Altura do desgaste da aresta de corte transversal, mm
D	Diâmetro da Broca, mm
$f_n$	Avanço por rotação, mm/rotação
Frf	Fator de Correção do Produto Para Refratômetro
HB	Escala de dureza
KW	Desgaste de cratera, mm
L	Comprimento a ser furado, mm
Lr	Leitura Direta no Refratômetro
MPa	Mega Pascal
MW	Desgaste da guia lateral, mm
Pm	Largura do lascamento, mm
Pt	Altura do lascamento, mm
T	Tempo de Corte, min
v	Velocidade de Corte, m/min
VB	Desgaste de flanco médio, mm
VBmax	Desgaste de flanco máximo, mm
Vc	Desgaste de ponta, mm
$v_c$	Velocidade de corte, m/min
W	Desgaste de quina, mm
X	Eixo de Deslocamento Longitudinal, mm
Y	Eixo de Deslocamento Transversal, mm
Z	Eixo de Deslocamento em Altura, mm

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1. Justificativa .....	16
1.2. Objetivo geral .....	17
1.3. Objetivos específicos .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1. Usinabilidade do Aço ABNT 1012.....	19
2.2. Processo de furação.....	19
2.3. Revestimentos para metal-duro.....	21
2.4. Desgastes e avarias.....	23
2.4.1. Desgaste de flanco .....	25
2.4.2. Aresta postíça de corte .....	26
2.4.3. Lascamento e quebra da aresta.....	26
2.5. Aderência como principal mecanismo.....	27
2.6. Critério de fim de vida .....	33
2.7. Fluidos de corte .....	33
2.8. Métodos e direções de aplicação do fluido de corte e efeitos.....	35
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
3.1. Máquina-ferramenta.....	38
3.2. Ferramenta de corte.....	38
3.3. Fluidos de corte .....	39
3.4. Material ensaiado e corpo de prova .....	42
3.5. Preparo da emulsão.....	43
3.6. Sistema de fixação do corpo de prova.....	44
3.7. Fixação da ferramenta .....	45
3.8. Experimentos preliminares .....	45
3.9. Experimento de furação .....	46
3.10. Imagens dos resultados .....	47
<b>4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1. Experimentos preliminares .....	48

<b>4.2. Experimentos e resultados estatísticos.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3. Avaliação da geometria da ponta da broca .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4. Considerações finais .....</b>	<b>67</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>68</b>
<b>6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO A – RESULTADOS ESTATÍSTICOS GERADOS PELO SOFTWARE SISVAR PARA O NÚMERO DE FUROS FEITOS.....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO B - RESULTADOS ESTATÍSTICOS GERADOS PELO SOFTWARE SISVAR PARA A RAIZ QUADRADA DO NÚMERO DE FUROS FEITOS.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO C – TABELA DE LIMITES UNILATERAIS DE F .....</b>	<b>81</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Justificativa

Na indústria de usinagem de peças, a busca por melhores processos, tempos de corte reduzidos e melhores rendimentos de ferramentas, são ações estratégicas para manter a competitividade e proporcionar crescimento em um mercado cada vez mais concorrido. Esse fato está demonstrado pelas relações de mercado atuais, onde a demanda de produtos usinados está focada em baixos *lead times* e preços reduzidos em função de volumes de produção cada vez maiores. Além disso, há uma tendência em vários segmentos industriais, de transformar as plantas fabris em montadoras dedicadas em seus produtos finais, transferindo todo o processo produtivo de transformação para empresas terceirizadas e quarteirizadas. Como resultado, há uma grande demanda por fornecedores que atendam essa produção de forma eficaz.

Sabe-se que um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria é o de furação, e que um elevado percentual das peças produzidas possuam um ou mais furos. Nos últimos anos tem-se notado uma evolução nos equipamentos de furação, que há algumas décadas eram somente furadeiras manuais, e hoje abrem espaço para modernos centros de usinagem e de furação controlados por comando numérico. A possibilidade de posicionar dezenas de peças em um dispositivo na mesa da máquina e furá-las sem a necessidade da intervenção do operador, faz com que o tempo total de usinagem seja bastante reduzido, além da possibilidade de utilizar máquinas com mais de um pallet de fixação de peças. Com todo esse avanço tecnológico nos equipamentos, torna-se necessário um esforço em desenvolver novas técnicas de usinagem, novas ferramentas e fluidos de corte capazes de suportar adequadamente as condições severas a que são submetidos.

Atualmente, o processo de furação está migrando para o uso de brocas helicoidais de metal-duro, em substituição às antigas brocas helicoidais de aço rápido que limitam o desempenho do processo. O aço rápido como material para ferramentas, limita as velocidades de corte em valores que dificilmente ultrapassam 30 m/min para a maioria dos materiais usinados nas indústrias, em decorrência da temperatura na região do corte, que facilmente chega à temperatura de revenimento do aço rápido, que é da ordem de até 650°C.

O metal-duro como ferramenta não apresenta tal limitação a temperaturas inferiores a faixa de 800 - 1000°C, sendo aplicado ao processo com velocidades de corte da ordem de 10 vezes superiores aos aços rápidos. Com a maior produtividade das brocas de metal-duro, torna-se imprescindível o controle dos desgastes, e conseqüentemente, do tempo de parada de máquina para a troca de ferramenta, antes que ocorra a falha catastrófica.

O fluido de corte atua diretamente no rendimento das brocas de metal-duro. Em condições normais de uso, na maioria das vezes elas são substituídas devido ao desgaste de flanco elevado. Resultados de testes práticos nas indústrias mostram que a simples substituição da marca do fluido de corte por um de melhores características lubrificantes, anti-vaporizantes, melhor molhabilidade, entre outros, resultam em um aumento na vida útil da ferramenta, com conseqüentes ganhos à produção. Mesmo tendo um custo significativo, esses fluidos têm comprovado uma melhor relação custo/benefício quando avaliados o desgaste da ferramenta, tempos parados para sua substituição, custo com reafiação e recobrimento, além da diminuição do consumo de fluido no período. Óleos tecnicamente melhores proporcionam uma melhor lubricidade do meio, evaporam menos e necessitam menores taxas de reposição, mantendo a concentração da emulsão inalterada.

O uso de um fluido lubrificante com melhores características técnicas, possibilita a otimização nos dados de corte utilizados, como o avanço e a velocidade de corte, com menores níveis de desgaste e maior vida útil da ferramenta. Assim, obtêm-se ganhos significativos tornando os produtos usinados mais competitivos no mercado.

## **1.2. Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho é analisar o desempenho de brocas de metal-duro sem revestimento na furação de aço dúctil SAE 1012, com dois fluidos de corte semissintéticos.

## **1.3. Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral proposto nesse trabalho, é necessário o atendimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar e avaliar o comportamento de desgaste e/ou avarias em brocas de metal-duro na usinagem de aço dúctil;

- b) Avaliar os efeitos de dois fluidos comerciais no desempenho da furação de aço dúctil com broca de metal-duro;
- c) Verificar estatisticamente os parâmetros velocidade de corte e fluido sobre o desempenho da furação.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Usinabilidade do Aço ABNT 1012**

O aço ABNT 1012 é designado pela *American Iron and Steel Institute* (AISI) e *Society of Automotive Engineers* (SAE) como um aço-carbono comum. Os teores de Silício e Manganês não podem ultrapassar 0,6% e 1,65%, respectivamente, com teores máximos de Alumínio, Cobre e Chumbo nos seguintes percentuais: 0,1%, 0,3% e 0,35%. Já o Boro deve ter um teor mínimo de 0,0005%. Ainda, elementos como Selênio, Telúrio e Bismuto podem ser adicionados para melhorar as características de usinabilidade e ainda assim o aço 1012 permanece no grupo dos aços-carbono, [Chiaverini, 2002].

O fator metalúrgico predominante com relação à usinabilidade é a dureza desse aço. O baixo carbono, a baixa dureza e a alta ductilidade, provocam redução da vida da ferramenta e acabamento superficial ruim, muito em função da tendência à formação de aresta postiça de corte. Outro fator relevante é a dificuldade de controlar a forma do cavaco. Materiais com ductilidade elevada se deformam com facilidade na superfície de saída da ferramenta, com tendência à formação de cavacos longos, [Diniz et al., 2013].

Experimentos feitos em torneamento de aço dúctil mostraram que a vida da ferramenta aumenta quando o ângulo de folga cresce de 1° a 5° pela diminuição da área de atrito em contato com a peça. Valores superiores a 5° fragilizam a cunha de corte, aumentando a chance de ocorrer uma fratura. Ao variar o avanço, com e sem a presença de fluido lubrificante, os experimentos mostraram que, quanto maior foi o avanço, menor foi o percurso de avanço, em função da elevação da temperatura. O uso de fluido lubrificante reduziu o desgaste da ferramenta, prolongando a sua vida útil, [Júnior et al., 2011].

### **2.2. Processo de furação**

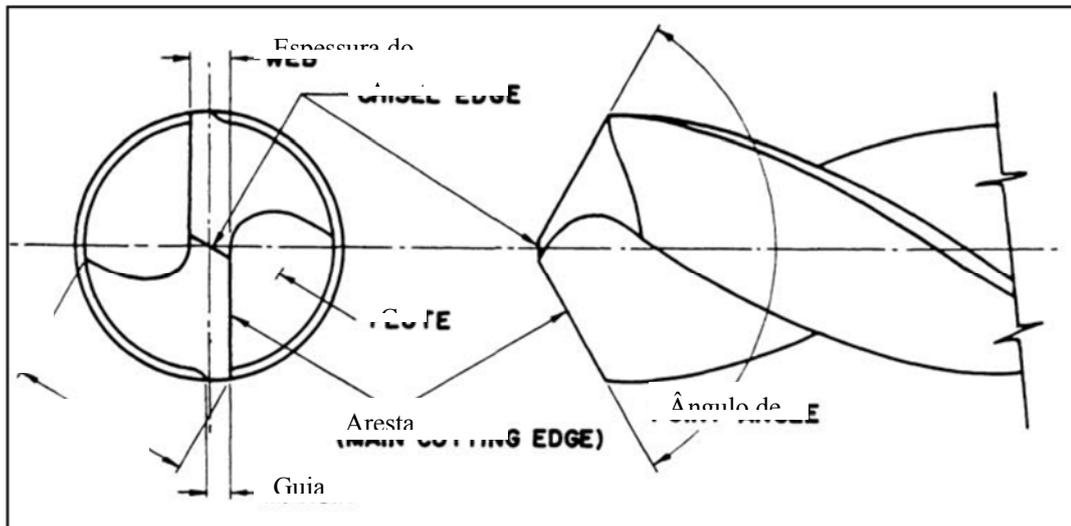
Na indústria manufatureira, o processo de furação por usinagem é um dos mais utilizados, sendo que a maioria das peças possui pelo menos um furo. A grande maioria desses furos não vem acabada dos processos anteriores, como na fundição e o forjamento. Assim, tais furos têm que ser usinados com pré-furo, em cheio ou alargados pelo processo de furação. Esses

fatos tornam o processo de furação de relevante importância na indústria e alvo de frequentes estudos de melhoria e otimização, [Diniz et al., 2013].

Alguns fatores devem ser levados em consideração no processo de furação para obter os resultados esperados. Fatores geométricos como o diâmetro do furo, profundidade, tolerância de forma e dimensional são comumente controlados durante a operação. Condições como velocidade de corte variável ao longo da aresta de corte, variando de zero no centro da broca até uma velocidade máxima periférica, fluido de corte nas funções lubrificante e refrigerante e acesso à aresta de corte durante a furação, bem como o transporte do cavaco pelos canais helicoidais, apresentam importantes resultados quando tratados de forma eficaz, [Stemmer, 1995].

Os principais elementos geométricos da broca helicoidal são as duas arestas de corte principais, aresta transversal, canal helicoidal de saída do cavaco, guias laterais e ângulo de ponta, como mostra a figura 1. As duas arestas principais removem material de forma eficiente, enquanto a aresta transversal provoca um esmagamento do material, resultando em erros geométricos dos furos, associado a altas pressões de corte, [Smith, 2008].

Figura 1 - Geometria da ponta da broca helicoidal.

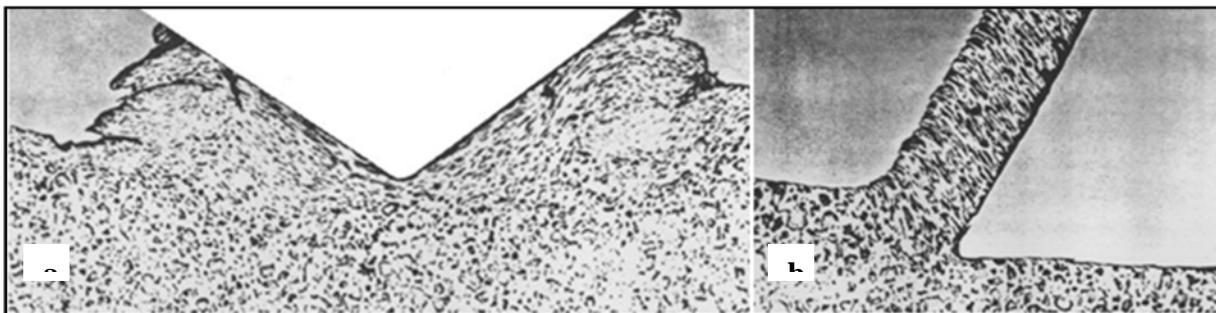


Fonte: adaptada de Oxford Jr., (1955) apud Smith, (2008).

A figura 2 (a) mostra a penetração da broca na região da aresta transversal, formando uma cunha com intensa deformação, o que torna o processo de remoção de material bastante ineficiente. O material da peça nessa região é extrudado e empurrado para o canal helicoidal,

juntamente com os cavacos gerados pelas arestas principais. A figura 2 (b) mostra uma micrografia da formação e fluxo do cavaco nas regiões periféricas da broca, onde as velocidades de corte são máximas, [Smith, 2008].

Figura 2 - Região de deformações de material (a). Fluxo de cavaco periférico (b).



Fonte: Oxford Jr., (1955) apud Smith, (2008).

### 2.3. Revestimentos para metal-duro

As camadas de revestimento possuem espessura pequena, na ordem de até 0,012 mm, e provocam um aumento na resistência ao desgaste na superfície das ferramentas, sendo que o núcleo da ferramenta permanece tenaz. Assim, é possível aumentar significativamente a vida das ferramentas, [Diniz et al., 2013].

Fu e Batchelor (2000), ao pesquisarem sobre os recobrimentos e suas aplicações mais eficazes, concluíram que há diferentes mecanismos de desgaste aplicados à superfície. Tais revestimentos devem atuar na melhora do desempenho da ferramenta por induzir uma tensão de compressão residual, diminuir o coeficiente de fricção, aumentar a dureza superficial, tornar a superfície quimicamente estável e reduzir a rugosidade superficial. Para isso, deve-se levar em conta as propriedades intrínsecas a cada material utilizado nos recobrimentos, como: densidade, propriedades mecânicas e químicas e capacidade de aderência ao substrato.

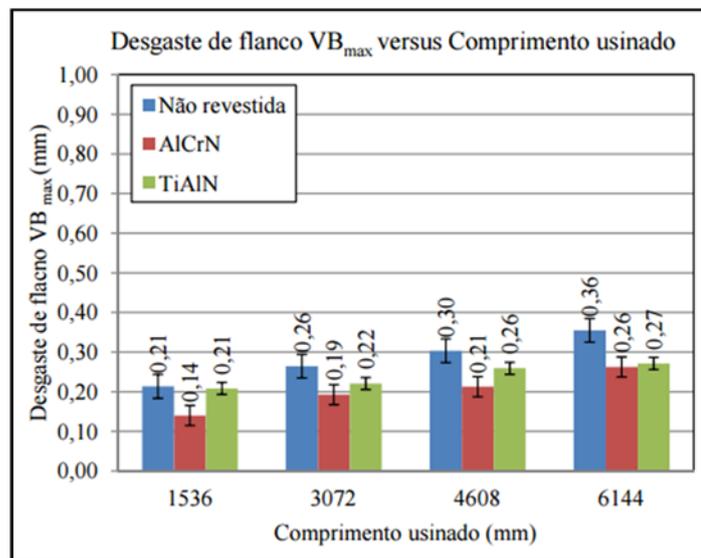
Os processos de recobrimentos de metal-duro podem ser definidos como Deposição Química de Vapor (CVD), sigla da nomenclatura em inglês *Chemical Vapor Deposition*, onde a cobertura é gerada por reações químicas às temperaturas de 700-1050°C, ou por Deposição Física de Vapor (PVD), do inglês *Physical Vapor Deposition*, onde as temperaturas de formação são de 400-600°C, relativamente baixas se comparadas ao método anterior, [Sandvik, 2010].

O processo CVD consiste em uma câmara com elevadas temperaturas, onde as ferramentas são colocadas em seu interior e gases são fornecidos, ocorrendo uma reação química que resulta em uma camada de revestimento sobre a superfície das ferramentas. Filmes de diamante,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiC e TiN, são os revestimentos normalmente aplicados por esse processo, [Machado et al., 2011].

O processo PVD consiste em uma câmara com vácuo em temperaturas da ordem de até  $500^\circ\text{C}$  e gases que, quando vaporizados, se depositam sobre as ferramentas. Camadas de TiC, TiN, TiCN, TiAlN, além da possibilidade da combinação multicamadas, [Sandvik, 2010].

Marques (2012), em seu estudo comparativo do rendimento de brocas helicoidais de aço rápido na furação do ferro fundido nodular GGG50, demonstrou os ganhos obtidos no comprimento usinado, quando utilizados recobrimentos por PVD, em comparação ao processo onde a ferramenta não estava revestida. A figura 3 mostra os valores de desgaste  $\text{VB}_{\text{max}}$  para os comprimentos usinados de 1536 mm, 3072 mm, 4608 mm e 6144 mm, respectivamente, para uma broca não revestida, uma broca revestida com AlCrN e uma broca revestida com TiAlN. A velocidade de corte utilizada foi de 25 m/min e o avanço foi de 0,15 mm/rot.

Figura 3 - Desgaste de flanco de brocas para  $v_c = 25$  m/min e  $f_n = 0,15$  mm/rot.

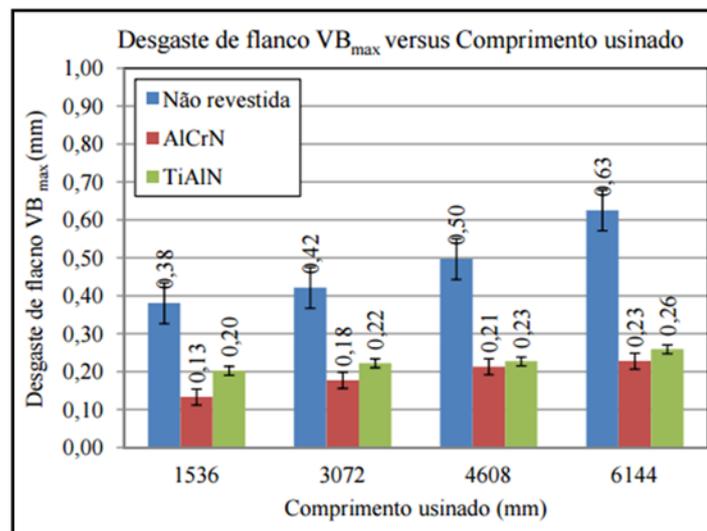


Fonte: Marques, (2012).

Os resultados mostraram que para o mesmo comprimento usinado, os desgastes médios para as brocas revestidas, ao final do experimento foram de aproximadamente 32% menores quando comparados à broca não revestida. Essa diferença entre brocas revestidas e não

revestidas é aumentada quando os dados de corte se elevam, acentuando as condições de desgaste na região de corte. Ao aumentar a velocidade de corte para 35 m/min, o desgaste ocorrido nas brocas sem revestimento foi bastante acentuado, chegando aos limites da falha catastrófica. As brocas revestidas não tiveram mudanças consideráveis nos desgastes, principalmente pela resistência às temperaturas elevadas. Ao final do experimento, as brocas revestidas, apresentaram desgastes médios, aproximadamente 61% menores que as brocas não revestidas. Entre as brocas revestidas, o revestimento de AlCrN apresentou melhores resultados, quando comparado ao revestimento de TiAlN, em todas as condições ensaiadas. A figura 4 mostra os resultados.

Figura 4 - Desgaste de flanco de brocas para  $v_c = 35$  m/min e  $f_n = 0,15$  mm/rot.

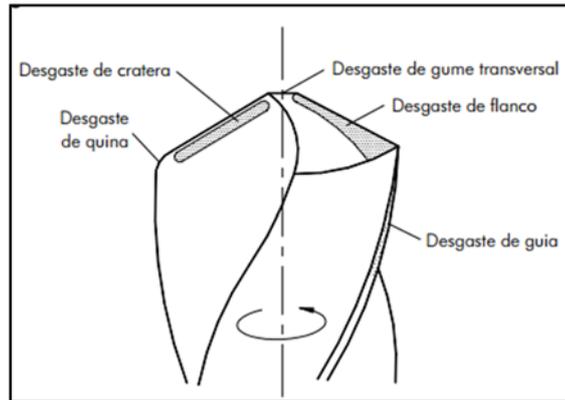


Fonte: Marques, (2012).

## 2.4. Desgastes e avarias

Brinksmeier (1990) apresenta as principais formas de desgastes que se formam na ponta da ferramenta, que são os desgastes de flanco e de cratera na face. A figura 5 mostra que os desgastes podem ocorrer nas guias laterais, na aresta transversal e nas arestas principais.

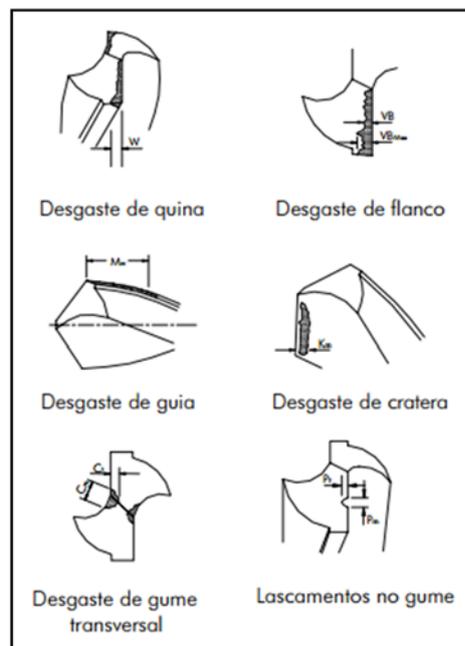
Figura 5 - Desgastes em brocas.



Fonte: adaptada de Brinksmeier, (1990).

Kanai et al., (1978) apud Hong, (1993) em experimentos de furação com brocas helicoidais, identificaram e quantificaram os diferentes tipos de desgastes, como mostra a figura 6. São eles: VB – desgaste de flanco médio; VBmax. – desgastes de flanco máximo; Mw – desgaste da guia lateral; W – desgaste de quina; Kw – desgaste de cratera; Ct – Altura do desgaste da aresta de corte transversal; Cm – largura do desgaste da aresta de corte transversal; Pt – altura do lascamento e Pm – largura do lascamento.

Figura 6 - Desgastes em brocas helicoidais.



Fonte: adaptada de Kanai et al., (1978) apud Hong, (1993).

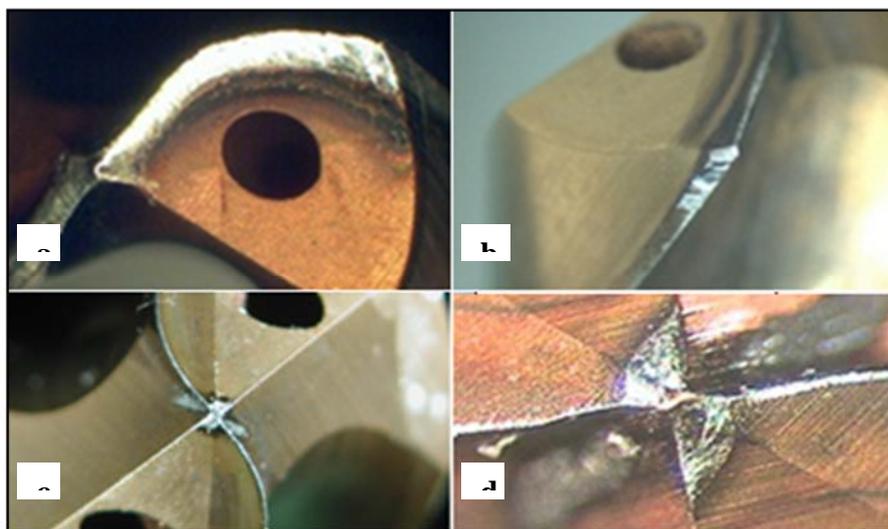
A Sandvik, 2010, diz que para cada tipo de material de ferramenta, há um tipo de desgaste ou avaria predominante, e que deve ser tratado com maior cuidado, a fim de se obter melhores vidas da ferramenta. Os desgastes e avarias são os seguintes:

### 2.4.1. Desgaste de flanco

O desgaste de flanco tem origem abrasiva sendo agravado por constituintes endurecidos do material da peça. É o desgaste mais comum e o primeiro a acontecer devido ao contato ferramenta/peça desde o primeiro instante de corte. Também é o desgaste menos indesejável entre todos os demais, pelo fato de poder ser controlado e proporcionar uma vida de ferramenta estável e constante ao longo do tempo.

O desgaste de flanco é causado principalmente pelo uso de velocidades de corte muito altas, falta de refrigeração ou refrigeração inadequada e classes de ferramenta pouco resistentes ao desgaste e tenacidade elevada. A figura 7 mostra o desgaste de flanco principal em (a), o desgaste de flanco secundário em (b) e o desgaste de flanco na aresta transversal em (c) e (d).

Figura 7 - Desgaste de flanco (a). Desgaste de flanco secundário (b). Desgaste de flanco na aresta transversal (c) (d).

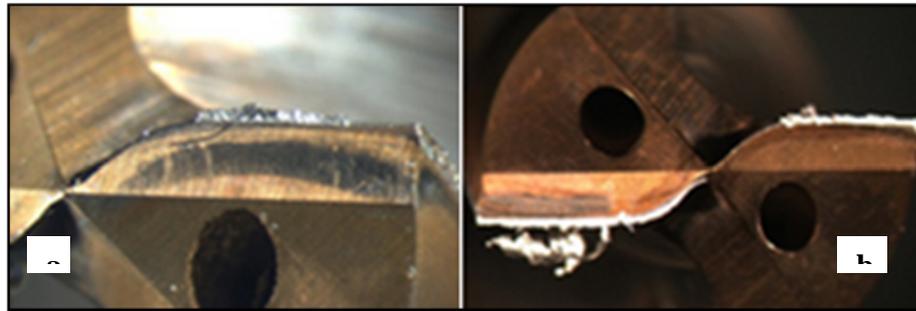


Fonte: Sandvik, (2010).

### 2.4.2. Aresta postiça de corte

A aresta postiça de corte origina-se pela aderência do material da peça sobre a superfície de saída de cavaco próximo à aresta de corte. É influenciada por baixas velocidades de corte, que resultam em temperaturas de corte baixas, possibilitando o encruamento do material e mantendo um tempo de contato entre cavaco e ferramenta suficiente para que ocorra a aderência. Sua ocorrência predominante é em materiais com maior capacidade de deformação plástica, como aços de baixo teor de carbono, alumínio e aços inoxidáveis. A figura 8 mostra o material da peça aderido na aresta de corte em (a) e (b).

Figura 8 - Aresta postiça de corte.

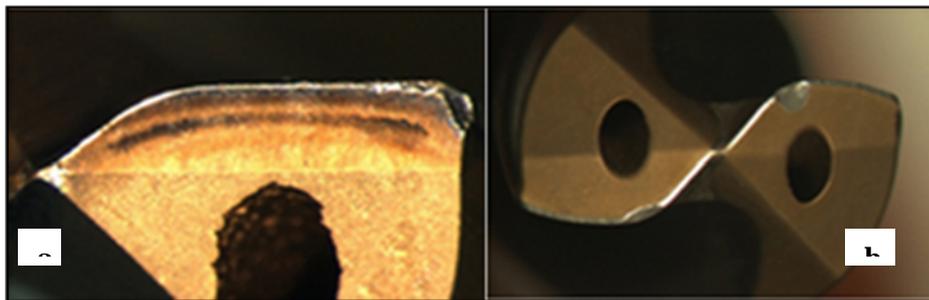


Fonte: Sandvik, (2010).

### 2.4.3. Lascamento e quebra da aresta

O lascamento e a quebra ocorrem em função de uma sobre carga na ferramenta que resulta em tensões de tração levando a sua ruptura. Entre as principais causas estão o uso de avanços muito altos, vibrações, desgastes excessivos, o martelamento de cavacos e a inclusão de areia no material da peça. Na usinagem onde já exista um pré-furo, a condição de entrada da broca é bastante severa, principalmente no primeiro contato das arestas da broca com a borda do furo já feito na peça, onde a pressão sobre a ferramenta é pontual. A figura 9 mostra o lascamento na periferia da broca em (a) e sobre a aresta principal de corte em (b).

Figura 9 - Lascamento na periferia em (a) e lascamento na aresta principal em (b).



Fonte: Sandvik, (2010).

## 2.5. Aderência como principal mecanismo

Machado et al. (2011), explica que o fenômeno da aderência ou adesão, também convencionalmente chamado de *attrition*, ocorre quando se tem duas superfícies metálicas em contato sob cargas de tensão ou compressão. Este fenômeno pode estar presente com ou sem a formação de aresta postiça de corte. Sua ocorrência é predominante em baixas velocidades de corte e baixos avanços. O principal agente causador da aderência é o fluxo irregular de material que passa pelas superfícies de saída ou de folga da ferramenta. Esse fluxo acaba arrastando consigo fragmentos microscópicos da superfície da ferramenta.

De acordo com estudos realizados por Zeilmann e Weingaertner (2007), há uma dificuldade na medição dos desgastes e na identificação de lascamentos nas arestas principais de corte e nas guias de brocas no processo de furação, quando na presença de material aderido nessa região. Nos experimentos realizados na furação de ligas de titânio Ti6Al4V sob diferentes métodos de aplicação de fluidos de corte, ferramentas com e sem revestimentos, e ainda variação da velocidade de corte, verificou-se maiores rendimentos nas situações em que houve aumento da lubrificação na região do corte. Na comparação entre os processos MQF com aplicação externa e aplicação pelo centro da ferramenta, o segundo apresentou maior vida útil da ferramenta em função da formação de um filme lubrificante nas arestas e guias da broca em profundidades maiores de furação. No método de aplicação externo, o fluido teve dificuldades de chegar à ponta da broca para furos maiores que uma vez o diâmetro. Os resultados obtidos na comparação de brocas com e sem revestimentos, verificou-se que a presença dos revestimentos não alterou significativamente os níveis de aderência no processo de aplicação externa do fluido, devido à falta de lubrificação no interior do furo. Já na aplicação de fluido de

corde em abundância sobre a região de corte, verificaram-se resultados menos satisfatórios em relação ao MQF. Tal fato deve-se a ocorrência do resfriamento brusco da broca ao sair do furo pelo excesso de fluido. Assim, devido à ocorrência de trincas com origem térmica, houve maior desgaste das ferramentas. A alteração da velocidade de corte não provocou mudanças significativas na quantidade de material aderido.

Já nos experimentos realizados por Calza et al., (2007), onde foram realizados furos com brocas de aço rápido em aço ferramenta, considerado de difícil usinagem, obteve-se resultados sobre a quantidade de material aderido na ferramenta ao variar o fluido de corte. Foram utilizados fluido em abundância, mínima quantidade de lubrificante e a seco para avaliar a vida das brocas. As verificações em microscópio mostraram que quanto maior era a ação lubrificante do fluido, menos material aderiria na ferramenta. Por ordem de maior aderência, a usinagem a seco foi a primeira por não apresentar nenhuma ação lubrificante. Em segundo, a aplicação de MQL com uma quantidade mínima de lubrificante, e em terceiro, com menor aderência, a emulsão com 10% de óleo na mistura.

Segundo Bossardi (2008), em seu trabalho comparativo entre fluidos de corte semissintéticos na furação de ferro fundido vermicular, a presença de óleo mineral no meio lubri-refrigerante aumentou a vida útil das ferramentas. Foram utilizados três fluidos de corte semissintéticos, como mostra a tabela 1. Além de um quarto experimento feito a seco.

Tabela 1 - Fluidos utilizados na furação do ferro fundido.

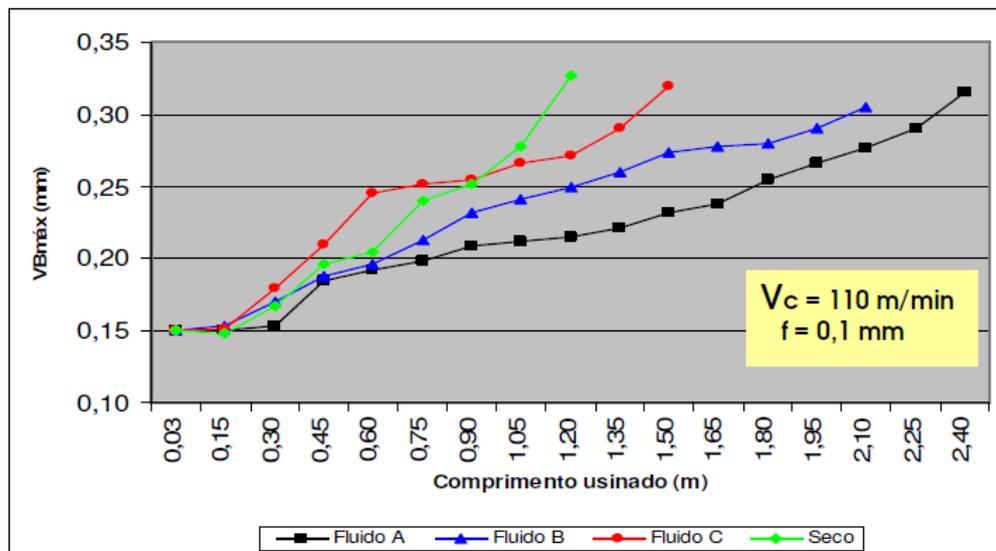
<b>Meio Lubrirrefrigerante</b>	<b>Óleo Base</b>	<b>Aditivos</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>PH</b>	<b>Concentração</b>
A	Óleo mineral (35%) + éster (10%)	Aditivo EP (10%)	0,978	9,0 a 9,5	8%
B	Óleo mineral (50%)	Aditivo EP (5%)	1,020	9,0	8%
C	Polímero (20%)	Sem aditivo EP	1,011	9,0 a 9,4	8%

Fonte: adaptada de Bossardi, (2008).

Os resultados de vida das ferramentas com a utilização de cada um dos fluidos são mostrados na figura 10, utilizando como critério de final de vida, o desgaste máximo de flanco igual a 0,30 mm. Os fluidos A e B apresentaram melhores resultados quando comparados aos

fluidos C e a seco, devido à presença de óleo mineral e aditivo de extrema pressão. O fluido C por não apresentar óleo mineral e nenhum aditivo de extrema pressão, apresentou comportamento inferior. Mas ainda assim, superou o resultado da usinagem a seco que não possuía nenhuma característica lubrificante. Na usinagem a seco, o excesso de aderência de material na ponta da broca, praticamente impossibilitou a medição dos desgastes.

Figura 10 - Curva de desgastes para diferentes fluidos.

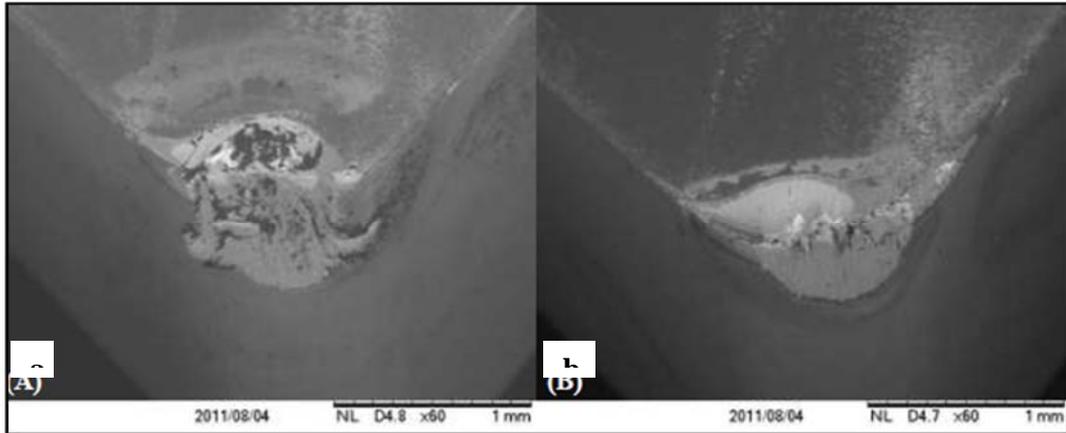


Fonte: Bossardi, (2008).

Naves e Silva (2011) constataram em seus experimentos na usinagem de aço inoxidável 316 no processo de torneamento, que a pressão do fluido lubrificante aplicado à região de corte, alterou o desgaste da ferramenta devido a quantidade de material aderido. Foram testados os meios a seco, jorro e pressões a 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa. Os experimentos consistiram em usinar um volume de aproximadamente 250 cm<sup>3</sup> de material em cada condição de aplicação do fluido com insertos de metal-duro da classe K. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte de 300 m/min, avanço de 0,2 mm/rot. e profundidade de corte de 1 mm. O fluido de corte utilizado foi uma emulsão com óleo de base vegetal em concentração de 5%. Na avaliação das ferramentas em um microscópio eletrônico de varredura, verificou-se que o principal mecanismo de desgaste foi a aderência. Para a medição dos desgastes, as ferramentas foram avaliadas em microscópio Stereo a um aumento de 60 vezes, onde se verificou o desgaste de ponta Vc. A figura 11 (a) mostra o desgaste da ponta da ferramenta com a aplicação do fluido

em jorro. A figura 11 (b) mostra o desgaste da ponta da ferramenta para o fluido aplicado a 15 MPa.

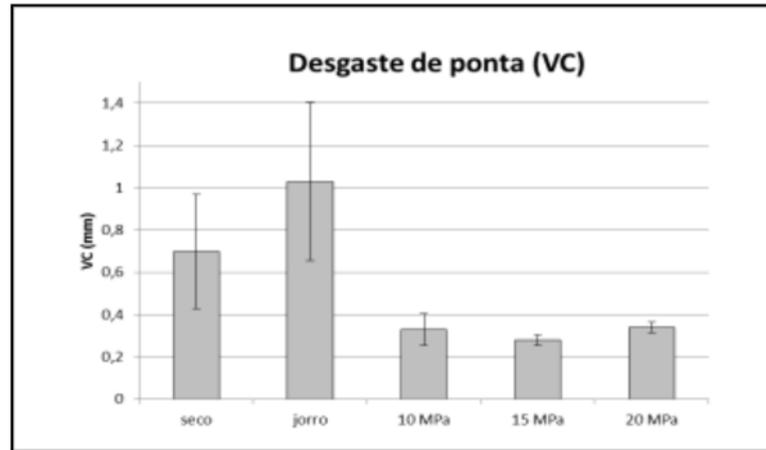
Figura 11 - Desgaste na ferramenta com aplicação do fluido de corte em jorro (a); Desgaste na ferramenta com aplicação do fluido de corte a 15 MPa (b).



Fonte: Naves e Silva, (2011).

Os menores desgastes ocorridos foram com a utilização do fluido em alta pressão, que tiveram resultados mais satisfatórios quando comparados com os meios a seco e jorro. Entre as três pressões aplicadas, a pressão de 15 MPa obteve menor desgaste de ferramenta. O autor explica esse resultado pelo fato do fluido ser aplicado sob pressão na região de saída do cavaco, formando uma cunha hidráulica entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Os cavacos obtidos nessas condições de pressão foram do tipo segmentado em forma de lascas ou pedaços. Para as condições de usinagem a seco e jorro, a forma dos cavacos foram do tipo contínuo com forma emaranhada. A figura 12 mostra os desgastes para cada condição de aplicação do fluido.

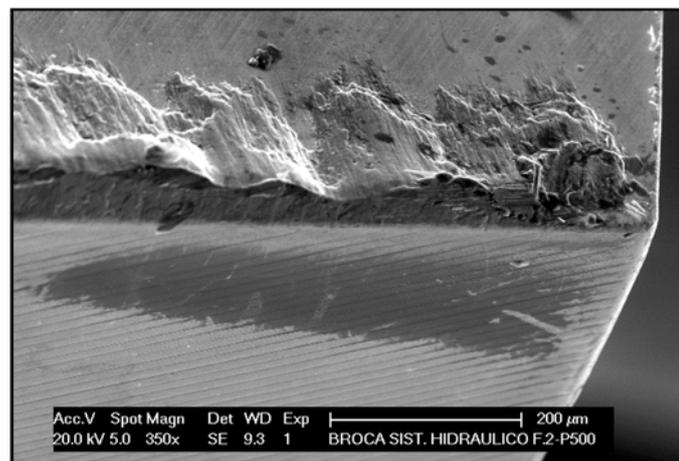
Figura 12 - Valores de desgaste de ponta.



Fonte: Naves e Silva, (2011).

Costa et al., (2010) obtiveram resultados conclusivos sobre a influência do processo de decapagem de brocas helicoidais, para retirar material aderido à região de corte durante experimentos de furação. Foram furados blocos de liga Al-Si com brocas de metal-duro onde se verificou a dificuldade da medição dos desgastes em função do material da peça aderido à ferramenta. A figura 13 mostra a imagem da aresta da ferramenta aumentada 350 vezes em microscópio eletrônico de varredura, aonde pôde-se perceber a presença de material aderido. A análise química feita nesse material comprovou que era realmente Al-Si aderido.

Figura 13 - Aspecto da superfície da ferramenta com material aderido.

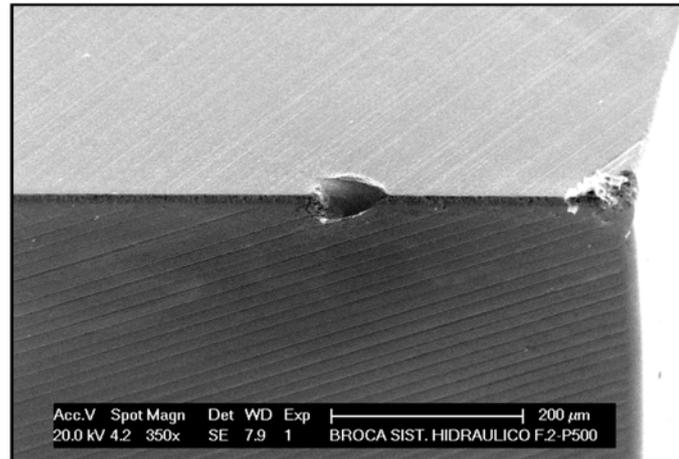


Fonte: Costa et al., (2010).

Após fazer um processo de decapagem em solução aquosa com 10% de NaOH, durante 24 horas, pôde-se perceber as avarias causadas na ponta da ferramenta sem a presença de

material aderido. A figura 14 mostra a ponta da ferramenta ampliada 350 vezes que continha lascamentos na aresta, antes escondidos pela adesão.

Figura 14 - Aspecto da superfície da ferramenta após decapagem.



Fonte: Costa et al., (2010).

Os autores compararam a circularidade, cilindricidade e a rugosidade dos furos, avaliando-os a cada 100 repetições até o total de 500 furos. No primeiro experimento, o material aderido não foi removido da ponta da broca, no segundo experimento, a cada parada para avaliação, o material aderido era removido por decapagem. Observou-se que a circularidade e a cilindricidade não apresentou diferenças significativas na comparação dos dois métodos. Tal fato foi justificado devido à adesão ser física e não química, tornando facilitada a constante remoção do material aderido ao longo dos furos. Ao analisar a rugosidade, os furos feitos com decapagem da ferramenta apresentaram valores médios de rugosidade menores, quando comparados aos furos sem decapagem.

Ao ensaiar brocas de aço rápido na furação de ferro fundido nodular, Santos et al., (2013), demonstraram a influência da camada de revestimento da ferramenta, através do número de furos feitos até o final de vida da ferramenta. Foram ensaiadas brocas sem revestimento e nitretadas a plasma. As brocas nitretadas a plasma fizeram 174 furos, contra 96 furos das brocas não revestidas para o mesmo critério de final de vida, que foi o desgaste de flanco de 0,15 mm. O ganho foi de aproximadamente 81% e pôde ser explicado, principalmente, pela redução da quantidade de material aderido à ferramenta, em função do baixo coeficiente de atrito do revestimento.

## 2.6. Critério de fim de vida

O critério mais utilizado para determinar a vida da broca é o comprimento total furado durante toda a sua vida antes da re-afiação. Ao longo do tempo, os desgastes aparecem predominantemente na quina, entre a aresta principal e secundária de corte. Nesse ponto o diâmetro é maior e é onde ocorrem as maiores velocidades de corte. Também ocorre um desgaste na aresta transversal de corte, principalmente se o avanço for exagerado.

Com o aumento dos desgastes, tem-se um aumento gradativo da força de avanço e do momento torçor aplicado sobre a ferramenta. É mais comum fazer o controle do final de vida da broca por um aumento de 30 a 35% no momento torçor, onde as máquinas mais comuns possuem um dispositivo para desligar o motor quando esse número é alcançado, [Ferraresi, 1972].

Para o cálculo do comprimento furado em função da velocidade de corte, é utilizada a seguinte equação:

$$L = \frac{T.a.1000.v}{\pi.D} \quad (01)$$

Onde:

L = comprimento a ser furado (mm);

T = tempo de corte (min);

a = avanço da ferramenta (mm/rot);

v = velocidade de corte (m/min);

D = diâmetro da broca (mm).

## 2.7. Fluidos de corte

De acordo com Astakhov (2006), os fluidos de corte são classificados em cinco categorias: óleos de corte integrais, óleos emulsionáveis em água, fluidos sintéticos, fluidos semissintéticos e nitrogênio líquido. Já de acordo com as pesquisas de Mamidi e Xavier (2014), os fluidos são classificados em duas categorias de base que são: fluidos a base de óleo, incluídos os óleos integrais, óleos solúveis e os óleos à base de prata e fluidos químicos que são os óleos sintéticos e semissintéticos.

Krar e Oswald (1991), dizem que as principais funções dos fluidos de corte são promover a adequada lubrificação e refrigeração da região do corte. O controle da ferrugem, durabilidade do fluido e vida da ferramenta prolongada também são características de bons fluidos.

Testes de laboratório têm comprovado a importância do controle da temperatura na vida da ferramenta. Em um determinado experimento, com a redução da temperatura de 510°C para 482°C, a vida da ferramenta passou de 19,5 para 99 minutos. As principais fontes de geração de calor durante a usinagem são a deformação plástica do material e o atrito do cavaco com a face da ferramenta. A deformação plástica que ocorre à frente da ferramenta é responsável por dois terços a três quartos do calor gerado no processo. A água é o melhor agente redutor de temperatura dos fluidos. Quando aplicado em abundância e a baixas pressões, toda a área da usinagem é recoberta pelo fluido, que ajuda na retirada dos cavacos.

A deformação plástica do material da peça ocorre ao longo do plano de cisalhamento e o calor gerado é proporcional ao seu comprimento. A maneira de reduzir o comprimento do plano de cisalhamento, sem modificar o ângulo da saída do cavaco, é reduzir o atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. A lubrificação atua principalmente nessa interface através da formação de um filme lubrificante. Reduzindo o atrito e conseqüentemente, o calor gerado, a vida da ferramenta torna-se maior.

Çakır et. al., (2007), após pesquisa, dizem que a seleção adequada dos fluidos de corte depende do tipo de processo utilizado, do material da peça e do material da ferramenta de corte. Os efeitos da refrigeração são os mais importantes, reduzindo a temperatura da ferramenta e aumentando sua vida útil, além de, diminuir a temperatura da peça, resultando em maior precisão dimensional. Os efeitos da lubrificação reduzem o atrito do cavaco com a ferramenta, provocando menor aderência na usinagem de materiais dúcteis, além de resultar melhores rugosidades na superfície usinada. Outro fator importante é a rápida retirada do cavaco da região do corte, reduzindo a temperatura na ferramenta e na peça. No processo de furação, normalmente feito a baixas velocidades de corte e por possuir uma forma de cavaco variável, utiliza-se emulsões de óleo mineral com adição de enxofre e/ou aditivos de cloro. Assim, é reduzido o coeficiente de atrito e, conseqüentemente, o calor gerado no processo. Para a usinagem de aços, são utilizadas emulsões a altas pressões e para usinagens com ferramentas de metal-duro, características refrigerantes são prioritárias devido às altas temperaturas geradas na ponta da ferramenta.

Astakhov (2006) diz que os fluidos semissintéticos são concentrados com até 25% de óleo adicionado à mistura, e que formam uma emulsão bastante fina, quando diluídos em água, se parecendo, muitas vezes com uma solução. O óleo é adicionado para melhorar a lubricidade do fluido.

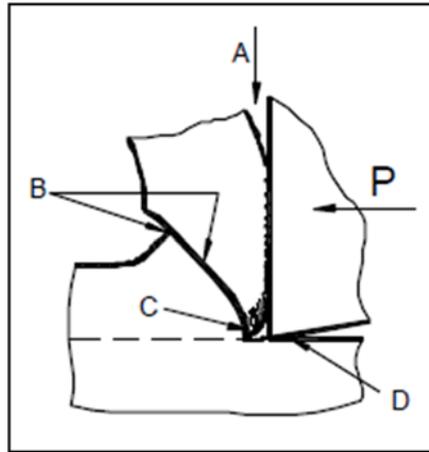
Mamidi e Xavier (2014) relatam que os fluidos de corte semissintéticos são um híbrido de óleos solúveis e sintéticos, em concentrações médias de 2 a 30% de óleo mineral, em um concentrado que posteriormente será diluído em água. A maioria dos semissintéticos é sensível ao calor e as moléculas de óleo se juntam em torno da ferramenta, fornecendo maior lubricidade, enquanto a emulsão refrigera. Possuem um alto teor de emulsionante, fazendo com que o óleo fique suspenso em pequenos glóbulos. Esse fato torna o fluido translúcido e diminui a quantidade de luz refratada.

Mamidi e Xavier (2014) também relacionam as principais vantagens e desvantagens do uso de fluidos semissintéticos. Como vantagens, são citadas uma vasta gama de aplicações de usinagem, longa vida útil, fácil manutenção, boa sedimentação, propriedades de limpeza, reduzida formação de névoa e espuma, boa refrigeração e lubrificação, bom controle microbiano, relativamente não tóxico, não inflamável e bom controle de corrosão. As desvantagens citadas são a facilidade de contaminação por outros fluidos da máquina, a ocorrência de espuma, a facilidade da dureza da água afetar a sua estabilidade, além de poder causar dermatite no operador.

## **2.8. Métodos e direções de aplicação do fluido de corte e efeitos**

Astakhov (2006) mostra na figura 15 as interfaces de contato “A” entre o cavaco e a ferramenta, e “D”, entre a ferramenta e a peça, bem com, o plano de cisalhamento que vai da região “C” até “B”. O resultado da aplicação do fluido de corte na região “AD” depende bastante da frequência de formação do cavaco, como consequência da velocidade de corte. Assim, quanto maior for a velocidade de corte, menor deve ser a viscosidade do fluido, para que penetre nas interfaces de contato entre o cavaco e ferramenta. Nota-se uma baixa eficiência da ação do fluido nas regiões “A” e “D”, quando o mesmo é aplicado por simples inundação. Sob altas pressões, a vida da ferramenta aumenta e as forças de corte reduzem significativamente.

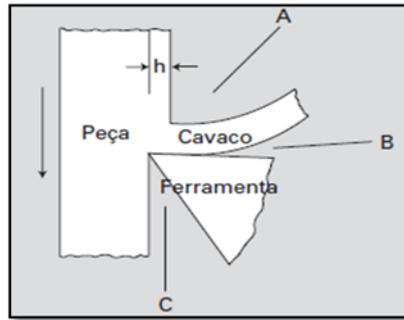
Figura 15 - Interfaces de contato ferramenta – peça – cavaco.



Fonte: Astakhov, (2006).

Os principais métodos de aplicação dos fluidos são a mínima quantidade de lubrificante de 1 a 5 bar, o sistema a alta pressão até 163 bar e o jorro à baixa pressão. Quanto à direção de aplicação do fluido, a figura 16 mostra as três possibilidades. Em “A”, o fluido é aplicado sobre o cavaco, normalmente pelos métodos de jorro à baixa pressão ou de MQF. Essa direção apresenta ineficiência quando cavacos emaranhados são formados, pela dificuldade de acesso do fluido à região do corte, porém, são os mais utilizados pela simplicidade do sistema de aplicação das máquinas ferramentas. A aplicação em “B” é utilizada com sistemas de alta pressão, uma vez que o fluido é aplicado contra o fluxo de cavaco, favorecendo sua quebra, e com maior facilidade de penetração na interface de contato cavaco-ferramenta. A aplicação em “C” é utilizada quando há a necessidade de redução do desgaste de flanco, e a melhora no acabamento superficial da peça usinada, [Machado et. al., 2011].

Figura 16 - Direções possíveis de aplicação do fluido.



Fonte: Machado et. al., (2011).

Mamidi e Xavier (2014) mostram que no processo de furação, o fluido de corte pode ser aplicado por canais no centro da ferramenta, principalmente em furações profundas, para que chegue diretamente nas arestas de corte, retirando o cavaco pelos canais helicoidais da ferramenta.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Núcleo de Tecnologia Mecânica (NTM) da Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEAR) da Universidade de Passo Fundo (UPF).

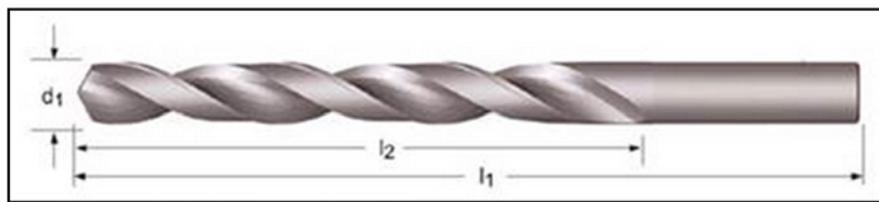
#### 3.1. Máquina-ferramenta

A máquina utilizada foi um centro de usinagem vertical da marca ROMI, modelo D800 com 15 kw de potência no motor principal e cursos dos eixos x, y e z de 800, 530 e 580 mm, respectivamente. O cabeçote vertical possui cone ISO 40 e a rotação máxima é de 7500 rpm. Os avanços dos eixos são de até 30 m/min e a bomba do sistema de fluido de corte possui vazão de 20 l/min com 7 bar de pressão.

#### 3.2. Ferramenta de corte

Foram utilizadas brocas helicoidais de metal-duro sem revestimento e sem refrigeração interna, modelo R100 de 4 mm de diâmetro, da marca DORMER. A geometria da broca é mostrada na figura 17 e possui  $d_1$  igual a 4 mm. O ângulo de ponta é de  $120^\circ$ ,  $l_1$  igual a 75,0 mm e  $l_2$  igual a 43,0 mm. A capacidade de furação é de até quatro vezes o diâmetro de corte e produz furos com tolerância H12, [Dormer, 2014].

Figura 17 - Geometria da broca.



Fonte: Dormer, (2014).

De acordo com o fabricante, a indicação dos parâmetros de corte para as condições de furação de aços estruturais com percentual de carbono de 0,1% e resistência à tração inferior a

700 MPa, dureza inferior a 125 HB, furos cegos, com refrigeração externa e uso de emulsão como fluido de corte, são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de corte da broca.

	<b>Velocidade de corte (m/min)</b>	<b>Avanço (mm/rot)</b>
Mínimo	67	0,019
Máximo	82	0,031

Fonte: adaptada de Dormer, (2014).

### 3.3. Fluidos de corte

Foram utilizados dois fluidos de corte no desenvolvimento dessa pesquisa. O fluido de corte número 1 utilizado para os testes foi um óleo semissintético *Cutting oil 351* produzido pela CASA DOS LUBRIFICANTES. As partículas emulsionadas desse fluido, que contem óleo mineral, possuem tamanhos reduzidos e a solução resulta em uma microemulsão translúcida, ao invés de leitosa. Sendo uma microemulsão, está menos sujeita ao ataque bacteriano. Esse fluido é indicado para uso em sistemas centralizados ou reservatórios individuais de máquinas operatrizes na usinagem de metais ferrosos e não ferrosos. [Casa dos lubrificantes, 2014].

O fabricante recomenda o uso de misturadores automáticos. Na ausência, fazer a mistura manual e agitar continuamente. Para reposição no tanque, nunca usar óleo concentrado sobre a emulsão em uso e sempre adicionar emulsão sobre emulsão. As concentrações de aplicação do produto são mostradas na tabela 3.

Tabela 3 - Concentrações por aplicação.

<b>Operações</b>	<b>Percentual</b>
Torneamento / fresamento	4-8%
Roscamento / alargamento	6-12%
Retificação / corte plasma / laser	2%
Serramento / furação	4-8%

Fonte: adaptada de Casa dos Lubrificantes, (22014).

O índice de refração do fluido é de 1,46, como mostra a tabela 4, além de outras características técnicas do produto.

Tabela 4 - Características técnicas.

<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação</b>	<b>Valor</b>
Aspecto	M-0116	Visual	Âmbar
Aparência da emulsão	M-0228	-	Transparente
pH da emulsão 2,5%	M-0166	8,0 / 9,5	8,5
Corrosão ferro fundido 5%	M-0315	DIN 51360/81	0/0
Espuma (segundos)	M-0228	Máx. 25	20"
Densidade a 25°C (g/cm³)	M-0146	ASTM D-1298/85	0,980
Índice de refração	M-0191	-	1,46

Fonte: adaptada de Casa dos Lubrificantes, (2014).

O fluido de corte número 2 utilizado para os testes foi um óleo semissintético *Superedge 6552* fabricado pela CASTROL. O fabricante indica o uso em sistemas centralizados ou reservatórios individuais de máquinas operatrizes para os materiais indicados na tabela 5, [Castrol, 2008].

Tabela 5 - Indicação de uso do fluido.

	<b>Ferro fundido</b>	<b>Aço carbono</b>	<b>Aço inox</b>	<b>Alumínio e ligas</b>	<b>Metais amarelos</b>
Retificação	XX	XX	X	X	X
Fresamento / torneamento	XX	XX	XX	XX	X
Furação	XX	XX	XX	XX	X
Roscamento / Alargamento	XX	XX	XX	XX	X
Brochamento	XX	XX	X		X

Fonte: adaptada de Castrol, (2008).

As características típicas do produto são mostradas na tabela 6. O fabricante relata que podem ocorrer pequenas variações em cada caso porque os dados fornecidos são baseados nas médias dos resultados de testes.

Tabela 6 - Características técnicas.

	<b>Unidade</b>	<b>Método</b>	<b>Valor</b>
Aparência		Visual	Líquido âmbar
Densidade a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 4052	1,020
Aparência		Visual	Leitosa
pH (5%)		MCB 02	9,0
Fator de correção		MCB 62	1,1

Fonte: adaptada de Castrol, (2008).

Também são indicadas as concentrações de diluição da emulsão para alguns materiais como mostra a tabela 7.

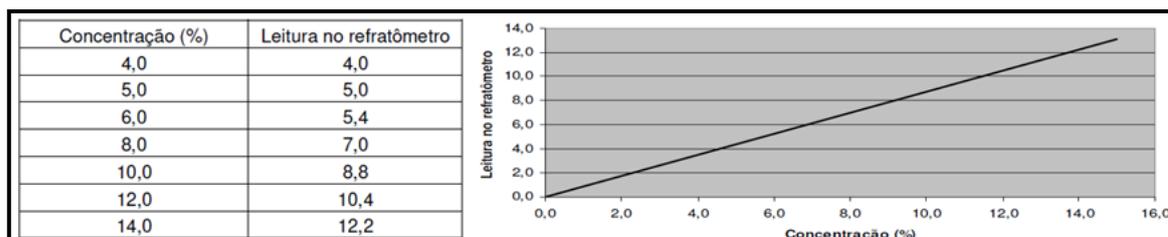
Tabela 7 - Diluição para cada aplicação.

<b>Operações</b>	<b>Alumínio e ligas</b>	<b>Metais amarelos</b>	<b>Aços e ligas</b>	<b>Ferro fundido</b>
Torneamento / fresamento	5-8%	5-8%	5-8%	5-8%
Retificação	6-7%	4-5%	5-6%	5-6%
Roscamento e alargamento	6-12%	6-12%	6-12%	6-12%
Geração de engrenagens	6-8%	6-8%	7-12%	5-8%
Brochamento	7-10%	7-10%	8-15%	6-10%
Retífica	4-6%	4-6%	-	5-8%
Furação profunda	7-10%	6-8%	7-12%	5-8%
Centro de usinagem	5-8%	5-8%	6-8%	5-7%

Fonte: adaptada de Castrol, (2008).

A leitura da concentração da emulsão através do refratômetro está correlacionada com a real quantidade de mistura de fluido em água, através dos dados da figura 18. A tabela na esquerda da figura mostra o percentual de concentração de fluido na coluna 1 e o percentual lido no refratômetro na coluna 2. O comportamento da leitura é uma reta que à medida que a concentração aumenta, o percentual lido afasta-se do percentual real da concentração, demonstrado no gráfico ao lado direito da figura. Os dados mostram que o índice de refração varia de 1,0 para uma concentração de 4% de óleo, até 1,15 para uma concentração de 14% de óleo.

Figura 18 - Leitura no refratômetro.



Fonte: Castrol, (2008).

### 3.4. Material ensaiado e corpo de prova

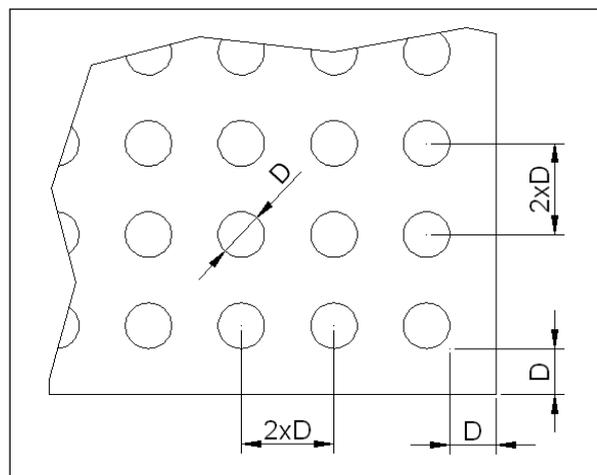
O material utilizado para fabricação dos corpos de prova foram chapas de aço SAE 1012 laminadas com 12,7 mm de espessura. A composição química do aço é mostrada na tabela 8, obtida através de análise química com três repetições, resultando nos valores médios de concentração de cada elemento. O equipamento utilizado foi um espectrômetro de medição ótica da marca OXFORD. A dureza média do material, obtida através de um durômetro da marca HECKERT, na escala HB, foi de 111,41, obtida a partir de 3 amostras. O aço utilizado nos experimentos foi submetido à tração para avaliar a resistência ao escoamento e tração. Foram ensaiadas quatro amostras retiradas do sentido longitudinal e quatro amostras retiradas do sentido transversal dos corpos de prova para furação. Não houve diferença significativa nos resultados obtidos com relação ao sentido que as amostras foram retiradas. A tensão de escoamento média encontrada foi de 204,34 MPa, e a tensão máxima de tração foi de 321,43 MPa. Para os experimentos foi utilizado uma máquina universal de ensaio de tração da marca SCHENCK, modelo Upm 200, com capacidade de 200 N / 20T.

Tabela 8 - Análise química do material.

Elemento	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
%	99,2	0,143	0,0151	0,471	0,0184	0,0142	0,04
Elemento	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
%	0,003	0,003	0,0452	0,001	0,0048	0,0104	0,0032
Elemento	V	W	Pb	Sn	B	Ca	-
%	0,0051	0,015	0,0077	0,0010	0,0006	0,0005	-

De acordo com Boehs [ca.1990], para brocas de diâmetro menores que 8 mm, a distância entre os furos deve ser igual a  $2xD$ , onde “D” é o diâmetro da broca. A distância dos furos até a borda do corpo de prova deve ser também “D”. A figura 19 mostra o desenho do corpo de prova com as furações planejadas. As dimensões do corpo de prova são de 250 mm de comprimento com 26 furos e 220 mm de largura com 22 furos. Todas as chapas foram fresadas nas duas faces para ter removidas as irregularidades da laminação. As espessuras resultantes dos corpos de prova variaram de 11,5 mm até 12 mm.

Figura 19 - Corpo de prova.



### 3.5. Preparo da emulsão

Para o enchimento do tanque da máquina com cada um dos fluidos de corte, foram feitas limpezas no tanque e posterior tratamento com bactericida. Após a limpeza e descontaminação, o tanque foi cheio com a emulsão na concentração específica para os experimentos. Nos três primeiros dias, o sistema de refrigeração permaneceu ligado para manter o fluido em agitação e homogeneizar a mistura. A cada dia foram feitas leituras do índice de refração com o auxílio de um refratômetro para verificar o percentual de óleo na emulsão. Se detectado alguma alteração no percentual, a correção era feita e no dia seguinte, realizada nova verificação.

Os fabricantes dos fluidos de corte utilizados nesse trabalho, indicam o uso de 4 a 8 % de óleo na mistura para operações gerais de furação. No entanto, as condições de furação aplicadas são consideradas severas com relação à grande probabilidade de aderência do material da peça sobre a broca. Esse fato é justificado pela utilização de brocas de metal-duro sem

revestimento e sem refrigeração interna na furação de aço extremamente dúctil. Nesse contexto, os fabricantes recomendaram a utilização de percentuais de óleo próximos ao limite superior às indicações técnicas. A concentração adotada foi de 7,3% de óleo para os dois fluidos. A tabela 9 mostra as concentrações utilizadas e seus respectivos valores de leitura no refratômetro. Como os índices de refração não são iguais para os diferentes fluidos, resultam em valores de leitura também diferentes para que se mantenha o mesmo percentual de óleo na mistura. O tempo de realização dos experimentos com cada um dos fluidos foi de aproximadamente três meses. A cada início de semana, a concentração da mistura era verificada e corrigida, quando necessário. Em todas as verificações, a diferença encontrada foi inferior a 5% em relação ao valor de referência, na leitura do refratômetro.

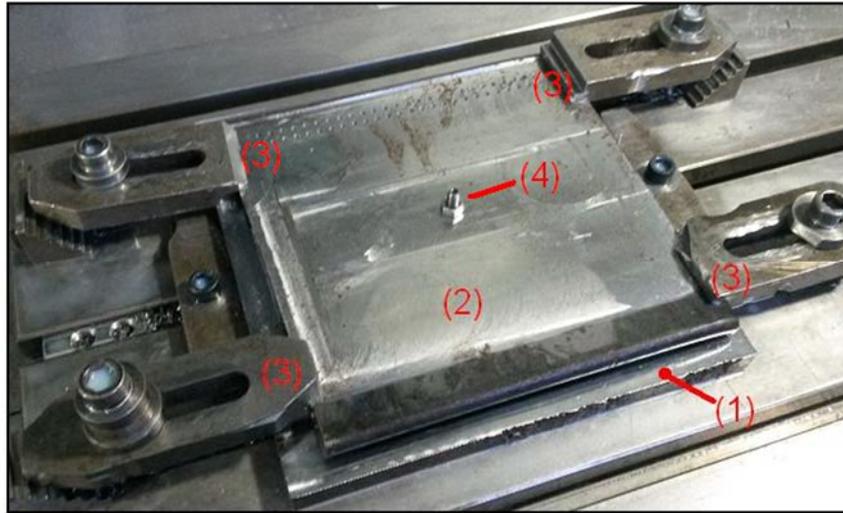
Tabela 9 - Concentração dos fluidos.

	Concentração de óleo na emulsão (%)	Índice de refração	Leitura no refratômetro
Fluido 1	7,3	1,46	5
Fluido 2	7,3	1,1	6,6

### 3.6. Sistema de fixação do corpo de prova

Os corpos de prova foram fixados sobre uma base de aço retificada e fixados com o auxílio de quatro grampos nas extremidades e um parafuso central. A figura 20 mostra o sistema de fixação. A base de apoio é indicada na figura pelo número 1. O corpo de prova em 2, os grampos de fixação em 3 e o parafuso central em 4. Devido à espessura fina dos corpos de prova, foi colocado o parafuso central para assegurar uma fixação rígida. Os corpos de prova foram centralizados na máquina, através do furo central e guiados no parafuso, fixado na base, presa à mesa da máquina.

Figura 20 - Fixação do corpo de prova.



### 3.7. Fixação da ferramenta

As brocas foram fixadas em um cone BT 40 balanceado para 7000 rpm e uma pinça ER40 com batimento máximo de 0,005 mm. A cada fixação de uma nova broca, o batimento radial do conjunto montado na máquina, foi medido com o auxílio de um relógio apalpador. Em todas as medições o batimento máximo foi inferior a 0,008 mm. O comprimento em balanço da broca foi o menor possível e igual para todos os testes. A broca possui comprimento total de 75 mm e 43 mm de comprimento do canal helicoidal. Assim o comprimento em balanço foi de 44 mm.

### 3.8. Experimentos preliminares

Testes iniciais de furação foram feitos com valores de velocidade de corte e avanço superiores aos valores indicados pelo fabricante para se determinar os melhores parâmetros de corte a serem utilizados nos experimentos definitivos.

O primeiro teste foi feito com a elevação da velocidade de corte para 120 m/min, permanecendo o avanço máximo indicado pelo fabricante de 0,031 mm/rot.

O segundo teste foi feito com a elevação do avanço para 0,1 mm/rot, permanecendo a velocidade de corte máxima indicada pelo fabricante de 82 m/min.

O terceiro teste foi feito com um aumento do avanço intermediário entre o limite indicado para a broca e o valor de 0,1 mm/rot. O avanço utilizado foi de 0,07 mm/rot.

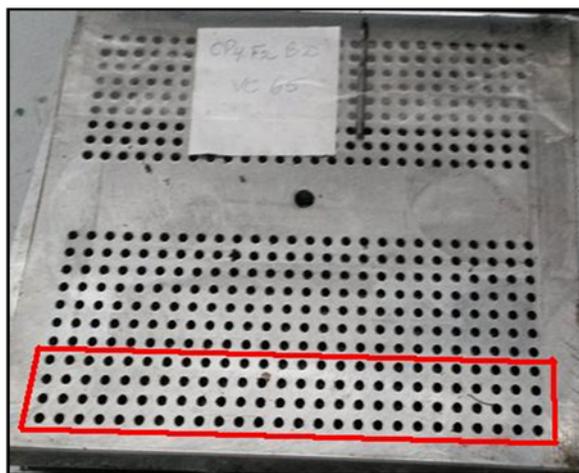
O quarto teste foi feito com a elevação simultânea da velocidade de corte para 120 m/min e o avanço para 0,1 mm/rot.

### 3.9. Experimento de furação

Para cada um dos fluidos de corte, as brocas foram ensaiadas em três condições de velocidade de corte. Foram utilizadas velocidades de corte máxima e mínima indicadas pelo fabricante. A terceira condição foi uma velocidade de corte média entre a mínima e a máxima. O avanço utilizado foi o máximo indicado pelo fabricante que é de 0,031 mm/rot. Para cada velocidade de corte foram feitas três repetições. As furações foram feitas até a partição da broca devido ao cisalhamento por torção. A profundidade dos furos foi de 10 mm que é 2,5 vezes o diâmetro da broca. Essa profundidade foi estabelecida em função da espessura dos corpos de prova que variavam entre 11,5 e 12 mm, resultando assim, em furos não passantes.

As furações foram feitas em seqüências de 26 furos ao longo do eixo X da máquina. A cada linha de furação, a máquina retornava à coordenada X zero e se deslocava 8 mm no eixo Y, para então, executar nova furação. A figura 21 mostra o corpo de prova já furado e no detalhe, na parte inferior da figura, a seqüência de furação com quatro repetições de 26 furos. A parte superior da figura mostra a identificação do corpo de prova e a broca utilizada após sua quebra.

Figura 21 - Sequência de furação.



### **3.10. Imagens dos resultados**

As imagens para avaliação da ponta das brocas foram feitas com o auxílio de um estéreo microscópio binocular, da marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C, com aumento máximo de cinquenta vezes. Para a avaliação detalhada dos desgastes e avarias ocorridos, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca TESCAN, modelo VEGA LM3, com ampliação máxima de trezentas mil vezes, com análise de espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS), da marca OXFORD.

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Experimentos preliminares

Os experimentos preliminares de furação foram feitos com objetivo de elevar as condições de corte da broca ao extremo. Era esperado que esse aumento provocasse desgastes ou avarias acentuadas em um menor tempo de corte, e que reduzisse o tempo de execução dos experimentos. O critério utilizado para elevação dos dados de corte foi de utilizar, dados aplicados a uma broca de mesmo diâmetro, porém com recobrimento e canais internos para passagem do fluido de corte. Brocas com essas características são amplamente utilizadas na indústria com bons índices de produtividade e valores comumente utilizados de velocidade de corte da ordem de 120 m/min e avanço de 0,1 mm/rot.

O primeiro teste feito com a elevação da velocidade de corte para 120 m/min, e com o avanço máximo indicado pelo fabricante de 0,031 mm/rot, não apresentou resultados satisfatórios. Nessas condições, a broca quebrou antes dos cinquenta furos iniciais. Isso pode ser explicado pela temperatura excessiva gerada na ponta da ferramenta e pela dificuldade do acesso do fluido a essa região, associado à falta de recobrimento, o que aumenta o coeficiente de atrito, gerando mais calor.

No segundo teste feito com a elevação do avanço para 0,1 mm/rot, e velocidade de corte máxima indicada pelo fabricante de 82 m/min, a broca quebrou antes dos trinta furos iniciais. Isso pode ser explicado pela excessiva espessura do cavaco que encontrou dificuldades de ser retirado pelos canais helicoidais devido à falta de lubrificação e alto coeficiente de atrito provocado pela falta de recobrimento na ferramenta. Como consequência, o aumento do momento torçor provocou a quebra da ferramenta.

O terceiro teste foi feito com um aumento do avanço intermediário entre o limite indicado para a broca e o valor de 0,1 mm/rot, o avanço utilizado foi de 0,07 mm/rot. Nessa condição não houve alteração no resultados em comparação ao teste anterior.

No quarto teste feito com a elevação simultânea da velocidade de corte para 120 m/min e o avanço para 0,1 mm/rot, a quantidade de furos também não foi superior a cinquenta.

## 4.2. Experimentos e resultados estatísticos

Com base nesses resultados, não foi possível intensificar os desgastes e avarias, bem como reduzir os tempos dos experimentos através do aumento dos parâmetros de corte acima dos valores recomendados pelo fabricante. Assim, os dados de corte utilizados ficaram dentro dos limites indicados pelo fabricante.

A Tabela 10 mostra os valores obtidos durante os experimentos realizados com os dois fluidos de corte testados. Foi avaliado o número de furos feitos com cada uma das velocidades de corte, bem como o número de metros lineares furados.

Tabela 10 - Distribuição e resultados dos experimentos.

Fluido	v <sub>c</sub> (m/min)	N	Comprimento		Fluido	v <sub>c</sub> (m/min)	N	Comprimento	
			Nº de furos	furado (m)				Nº de furos	furado (m)
Fluido de corte 1 – Cutting Oil 351	67	1	1904	19,040	Fluido de corte 2 – Superedge 6552	67	1	4092	40,920
		2	1668	16,680			2	2296	22,960
		3	1878	18,780			3	2221	22,210
	Média		1816,7	18,167	Média		2869,7	28,698	
	74,5	1	1748	17,480	74,5	1	951	9,510	
		2	1693	16,930		2	842	8,420	
		3	1642	16,420		3	656	6,560	
	Média		1694,3	16,943	Média		816,3	8,163	
	82	1	1569	15,690	82	1	1292	12,920	
		2	1090	10,900		2	867	8,670	
		3	1219	12,190		3	1174	11,740	
	Média		1292,7	12,928	Média		1111	11,110	
Média total		1601,2	16,012	Média total		1599	15,990		

O delineamento experimental empregado para a análise estatística dos dados foi um Fatorial 3 x 2, com 5% de significância, tendo como variáveis três velocidades de corte e dois fluidos. Os resultados foram analisados com o software livre SISVAR da Universidade Federal de Lavras. O embasamento teórico foi obtido através de Vieira (1999).

A primeira análise feita com o número de furos obtidos em cada uma das condições de fluidos e velocidades de corte, de acordo com a tabela 10, resultou em um coeficiente de

variação de 33%. Essa elevada variabilidade fez com que os dois fluidos se apresentassem estatisticamente iguais, através do teste de Tukey. Essa variabilidade foi justificada pelo número de furos obtidos com a broca três, para a velocidade de corte de 74,5 m/min e com o fluido 2, que apresentou valor abaixo dos demais. Também pode ser explicada pelo número de furos obtidos pela broca 1, para a velocidade de corte de 67 m/min, com o fluido 2, que apresentou um valor bem acima das demais condições. Ao analisar o desdobramento dos fluidos dentro de cada nível de velocidade, observou-se que não houve diferença significativa. Ao analisar o desdobramento da velocidade de corte dentro de cada nível de fluido, as velocidades de 74,5 m/min e 82 m/min não apresentaram diferenças significativas entre si, mas a velocidade de 67 m/min apresentou melhor rendimento com o uso do fluido 2. Todos os resultados discutidos acima são mostrados no anexo A, através do relatório gerado pelo software.

Em função do alto coeficiente de variação, os resultados estatísticos apresentados não foram conclusivos sobre as diferentes velocidades de corte e fluidos, por apresentarem números muito fora de um padrão normal de distribuição de valores. Na busca de melhores resultados, optou-se pelo uso de uma transformação de dados dentro do software. Optou-se pela raiz quadrada dos valores dos furos, que fez com que os valores se aproximassem de uma distribuição normal, como mostra a tabela 11. Os resultados completos gerados pelo software podem ser vistos no anexo B.

Tabela 11 – Raiz quadrada dos números de furos.

<b>Fluido</b>	<b>v<sub>c</sub> (m/min)</b>	<b>N</b>	<b>Raiz quadrada</b>	<b>Fluido</b>	<b>v<sub>c</sub> (m/min)</b>	<b>N</b>	<b>Raiz quadrada</b>
		1	43,63			1	63,97
	67	2	40,84		67	2	47,92
		3	43,36			3	47,13
	Média		42,60		Média		53
Fluido de corte 1 – Cutting Oil 351		1	41,80	Fluido de corte 2 – Superedge 6552		1	30,84
	74,5	2	41,15		74,5	2	29,02
		3	40,52			3	25,61
	Média		41,16		Média		28,49
		1	39,61			1	35,94
	82	2	33,01		82	2	29,44
		3	34,91			3	34,26
	Média		35,85		Média		33,22
Média total			39,87	Média total			38,24

Na análise feita no software com as raízes quadradas dos números de furos, o coeficiente de variação obtido foi de 11,6%, valor aceitável para uma distribuição de dados com resultados significativos. A figura 23 mostra a análise de variância gerada pelo software com o coeficiente de variação.

Para os fluidos, de acordo com o teste F, onde o número de grupos é igual a 2 e o número de observações é igual a 18, o F tabelado  $F_{0,05}(1;12)$  foi igual a 4,75, de acordo com a tabela de limites unilaterais de F, ao nível de significância de 5%, que é mostrada na tabela 12 do anexo C. Como resultado, o F calculado, que foi igual a 0,586, mostrado na figura 23, foi menor que o F tabelado, não existindo diferença significativa entre os níveis do fator fluido, considerando a variável número de furos feitos até a quebra da ferramenta.

Para as velocidades de corte, onde o número de grupos é igual a 3 e o número de observações é igual a 18, o F tabelado  $F_{0,05}(2;12)$  foi igual a 3,89. Como resultado, o F calculado, que foi igual a 16,817, mostrado na figura 23, foi maior que o F tabelado, existindo diferença significativa entre os níveis do fator velocidade, considerando a variável número de furos feitos até a quebra da ferramenta.

Para a interação fluido x velocidade, onde o número de grupos é igual a 6 e o número de observações é igual a 18, o F tabelado  $F_{0,05}(5;12)$  foi igual a 3,11. Como resultado, o F calculado, que foi igual a 9,792, mostrado na figura 22, foi maior que o F tabelado, existindo

interação significativa entre os níveis dos fatores fluido e velocidade, ao nível de significância de 5%. Assim, houve uma importante constatação de que o número de furos feitos com cada fluido depende da velocidade de corte, bem como, o número de furos feitos para cada velocidade de corte depende do fluido utilizado.

Figura 22 – Análise de variância.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fluido	1	12.005000	12.005000	0.586	0.4589
Velocidade	2	689.586100	344.793050	16.817	0.0003
Fluido*Velocidade	2	401.534033	200.767017	9.792	0.0030
erro	12	246.038467	20.503206		
Total corrigido	17	1349.163600			
CV (%) =	11.59				
Média geral:	39.0533333	Número de observações:	18		

Fonte: adaptada do software SISVAR.

O teste de Tukey feito para a comparação dos dois fluidos, mostrado na figura 23, não apresentou diferença significativa entre as médias de números de furos para os dois fluidos. A diferença entre as medias foi inferior a diferença mínima significativa que foi de 4,65.

Figura 23 – Media das raízes dos números de furos para cada fluido.

Teste Tukey para a FV Fluido		
DMS: 4,6507672536753 NMS: 0,05		
Média harmonica do número de repetições (r): 9 Erro padrão: 1,50934884987444		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	38.236667	a1
Cutting Oil 351	39.870000	a1

Fonte: adaptada do software SISVAR.

Na análise das medias para cada uma das velocidades de corte, as velocidades de 82 m/min e 74,5 m/min, não apresentaram diferenças significativas entre si. Já para a velocidade

de 67 m/min, o resultado foi superior a diferença mínima significativa de 6,98. O número de furos obtidos na velocidade de 67 m/min foi 38,5% superior ao obtido na velocidade de 82 m/min e, 37,3% superior ao obtido na velocidade de 74,5 m/min. A figura 24 mostra os resultados para as velocidades.

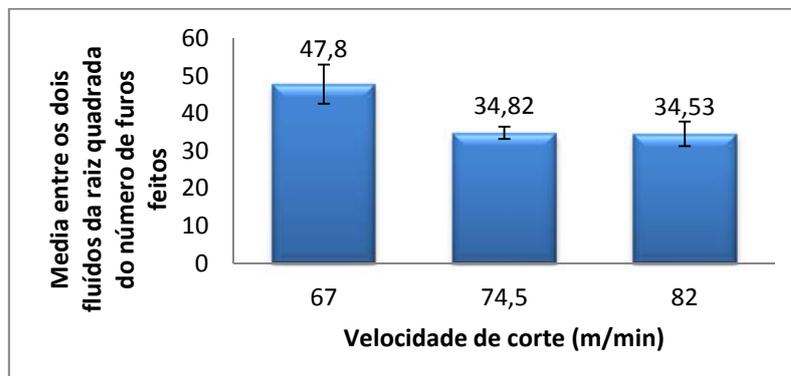
Figura 24 – Media das raízes dos números de furos para cada velocidade.

Teste Tukey para a FV Velocidade		
DMS: 6,9779932519292 NMS: 0,05		
Média harmonica do número de repetições (r): 6 Erro padrão: 1,84856726302451		
Tratamentos	Médias	Resultados do teste
82	34.530000	a1
74,5	34.825000	a1
67	47.805000	a2

Fonte: adaptada do software SISVAR.

A figura 25 mostra o gráfico das médias para cada velocidade de corte, onde a velocidade de 67 m/min resultou em 37,9% de furos a mais quando comparada a média das outras duas velocidades.

Figura 25 – Gráfico das médias da raiz quadrada do número de furos para cada velocidade.



No desdobramento dos fluidos para cada velocidade, a diferença mínima significativa foi de 8,06. Para a velocidade de 67 m/min, o fluido 2 Superedge 6552 teve uma diferença significativa de 24,4% a mais de furos feitos em comparação ao fluido 1 Cutting oil 351, como

mostra a figura 26. Para a velocidade de 74,5 m/min, o fluido 1 teve uma diferença significativa de 44,5% a mais de furos feitos em comparação ao fluido 2, como mostra a figura 27. Já para a velocidade de 82 m/min, não houve diferença, sendo que a variação foi inferior a diferença mínima significativa, como mostra a figura 28. O gráfico da figura 29 mostra os resultados comparativos.

Figura 26 – Comparativo dos fluidos para velocidade de 67 m/min.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Cutting Oil 351	42.603333	a1
Superedge 6552	53.006667	a2

Fonte: adaptada do software SISVAR.

Figura 27 – Comparativo dos fluidos para velocidade de 74,5 m/min.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	28.490000	a1
Cutting Oil 351	41.160000	a2

Fonte: adaptada do software SISVAR.

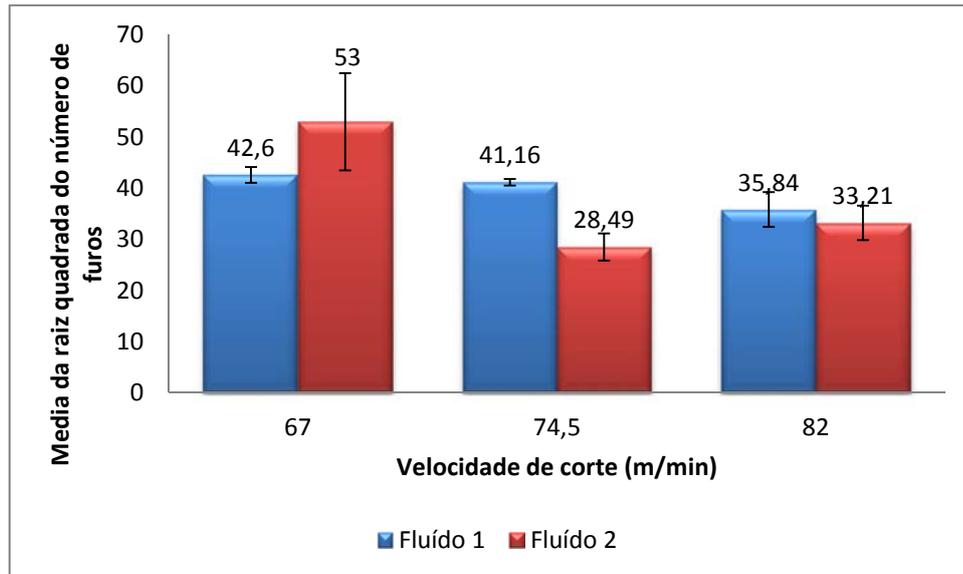
Figura 28 – Comparativo dos fluidos para velocidade de 82 m/min.

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	33.213333	a1
Cutting Oil 351	35.846667	a1

Fonte: adaptada do software SISVAR.

A figura 30 mostra o gráfico das médias de furos feitos para as velocidades de corte, com cada um dos fluidos, onde o fluido 2 apresentou resultados melhores apenas na menor velocidade. Para as velocidades superiores, o fluido 1 teve melhores resultados que o fluido 2.

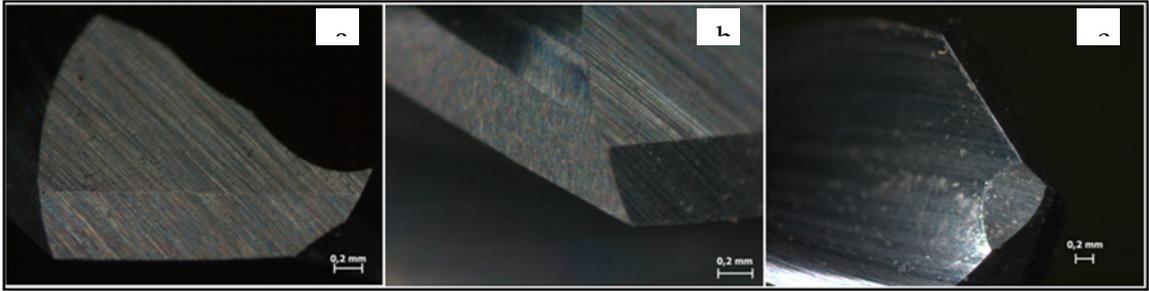
Figura 29 – Gráfico das médias da raiz quadrada do número de furos para as velocidades em cada fluido.



### 4.3. Avaliação da geometria da ponta da broca

A avaliação da geometria da ponta da broca foi feita na superfície de folga principal, superfície de folga secundária e face da ferramenta, para as duas arestas cortantes, denominadas aresta 1 e aresta 2. A figura 30 mostra respectivamente as três superfícies analisadas, antes do início das furações. Em (a) é mostrada a aresta principal de corte e a superfície principal de folga com um aumento de 40 vezes. Em (b) é mostrada a superfície secundária de folga e a quina da ferramenta, com um aumento de 50 vezes. E em (c), a face da ferramenta, com um aumento de 25 vezes. As imagens foram feitas em um Stereo microscópio. Essas imagens da geometria da ponta da broca ainda nova foram utilizadas como referência no comparativo dos desgastes e avarias após as furações.

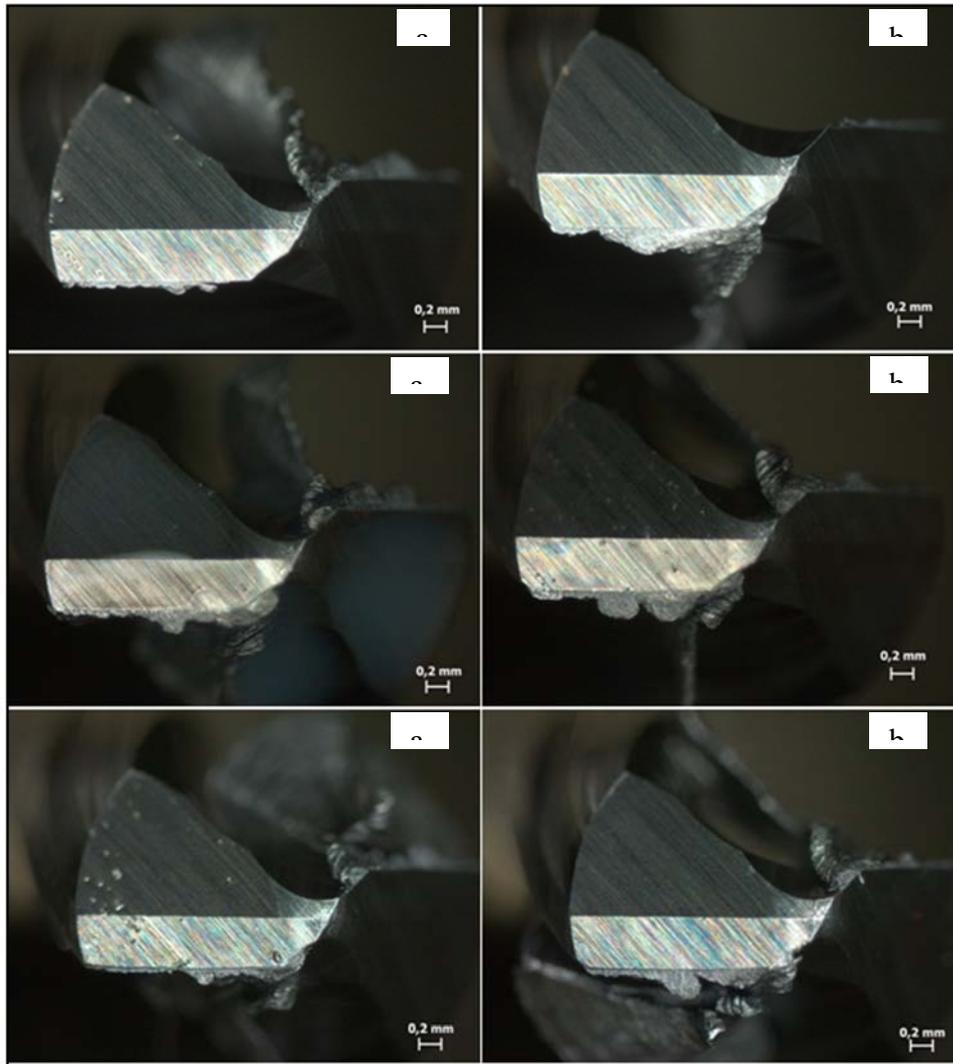
Figura 30 – Geometria da ponta da broca. (a) Flanco principal, (b) Flanco secundário, (c) Face.



Imagens foram feitas nas ferramentas quando já efetuados os furos iniciais de número 5, 10, 15, 25, 50 e 100 de uma broca para caracterizar o tipo de desgaste ou avaria predominante. As imagens foram feitas para as duas arestas de corte e mostram as superfícies de folga principal, de folga secundária e face da ferramenta. A figura 31 mostra em (a1) (a2) e (a3) a superfície principal de folga da aresta de corte número 1, para os furos de número 5, 10 e 15, respectivamente. Em (b1) (b2) e (b3) a superfície principal de folga da aresta de corte número 2, para os furos de número 5, 10 e 15, respectivamente.

Figura 31 – Adesão na superfície principal de folga durante os primeiros furos para a  $v_c$  de 67 m/min e  $f_n$  de 0,031 mm/rot. (a1) – furo n°. 5, (a2) – furo n°. 10 e (a3) – furo n°. 15, para

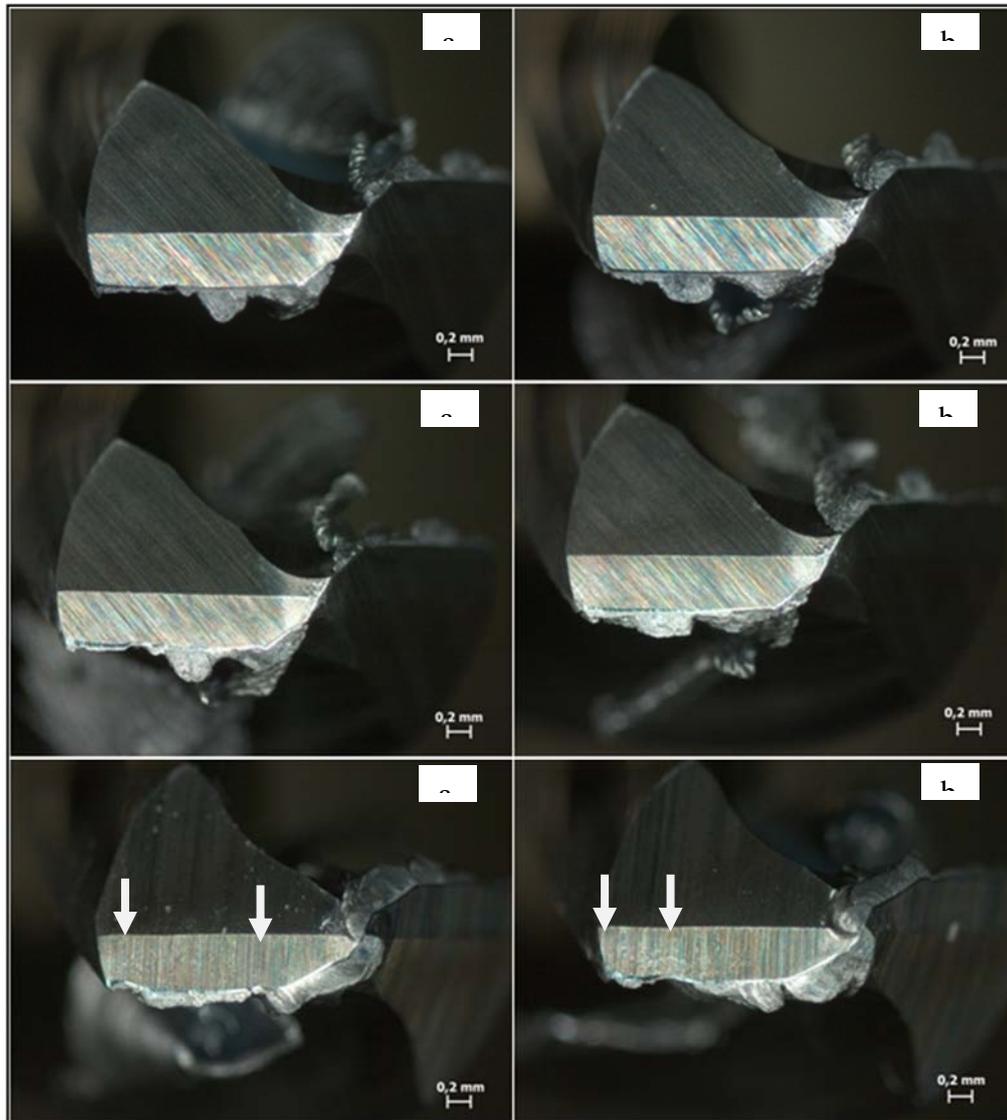
aresta de corte n°. 1. (b1) – furo n°. 5, (b2) – furo n°. 10 e (b3) – furo n° 15 para aresta de corte n°. 2.



A figura 32 mostra em (a1) (a2) e (a3) a superfície principal de folga da aresta de corte número 1, para os furos de número 25, 50 e 100, respectivamente. Em (b1) (b2) e (b3) a superfície principal de folga da aresta de corte número 2, para os furos de número 25, 50 e 100, respectivamente. Todas as imagens foram feitas com um aumento de 25 vezes. A furação foi feita com o fluido de corte 2 e com velocidade de corte de 67 m/min.

Figura 32 – Adesão na superfície principal de folga durante os primeiros furos para a  $v_c$  de 67 m/min e  $f_n$  de 0,031 mm/rot. (a1) – furo n°. 25, (a2) – furo n°. 50 e (a3) – furo n°. 100, para

aresta de corte n°. 1. (b1) – furo n°. 25, (b2) – furo n°. 50 e (b3) – furo n° 100 para aresta de corte n°. 2.

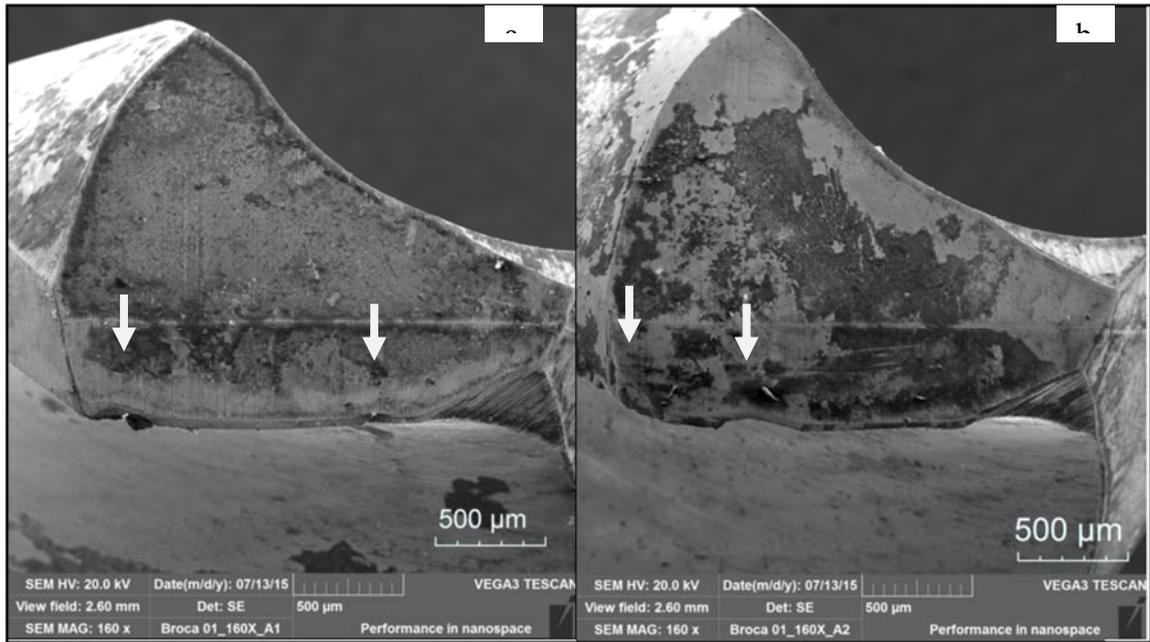


Verificou-se que a aderência foi o principal evento que ocorreu nas arestas da broca. Logo nos primeiros cinco furos, já havia material aderido nas arestas principais e a sequência de imagens para os cem primeiros furos mostrou um aumento do material aderido a cada verificação, porém de forma aleatória. Desse modo, a aderência não seguiu um padrão de material depositado sobre a ferramenta, uma vez que, o processo de aderência constatado foi cíclico e a todo instante uma parcela do material aderido era arrancada da ponta da ferramenta e no instante seguinte, uma nova parcela de material voltava a aderir, recobrando as arestas. Essa verificação foi justificada, entre outras, pela análise da figura 32, quando comparadas as

imagens (a2) com (a3) e (b2) com (b3), onde o número de furos passou de 50 para 100. O padrão geométrico do material aderido ao final do furo número 50 foi totalmente diferente do padrão de material aderido após o furo número 100 para as duas arestas. Além de que, após o último furo, verificou-se a existência de lascamentos em diferentes locais das arestas 1 e 2 que são mostrados pelas flechas na figura 32 em (a3) e (b3). Verificou-se também, que com o aumento do número de furos, a quantidade de material aderido aumentou, atingindo regiões que antes não haviam sido afetadas e passaram a aderir grande quantidade de material. Esse fato também pôde ser justificado, analisando a figura 32 em (a3) e (b3), onde as arestas transversais de corte apresentavam grande quantidade de material, recobrando-as por completo. Nas imagens anteriores ao furo de número 100, não foi constatada aderência significativa nessa região da broca.

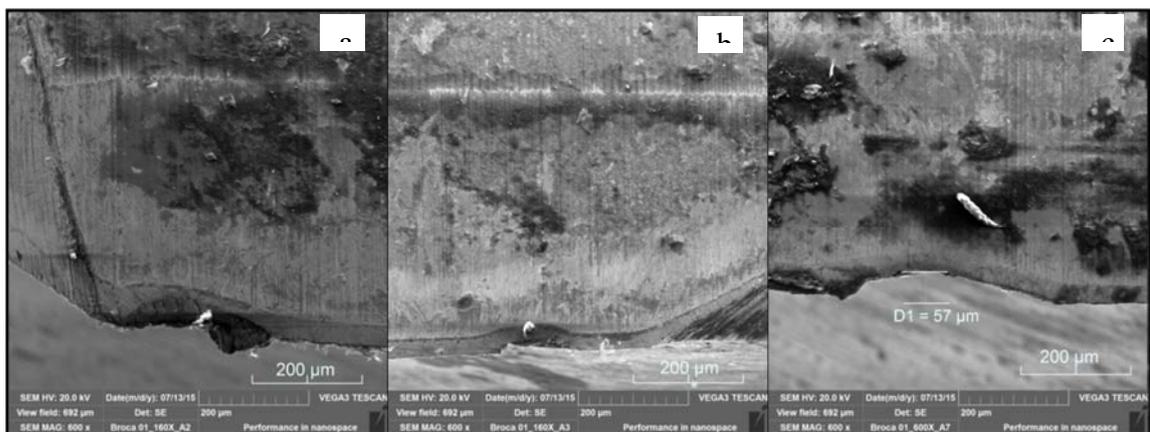
Após a execução dos cem furos iniciais, foi feita a decapagem para retirar o material aderido à ponta da broca. A broca foi colocada em uma solução aquosa com 10% de NaOH por 24 horas, de acordo com a metodologia proposta por Costa et al., (2010). Depois de retirado o material aderido, imagens foram feitas da ponta da broca em um microscópio eletrônico de varredura para avaliar os efeitos causados pela furação. A figura 34 mostra a superfície principal de folga em (a1) para a aresta n°. 1 e em (b1), para a aresta de corte n°. 2, com um aumento de 160 vezes. Na aresta 1 ocorreram dois lascamentos, já evidenciados anteriormente na figura 32 (a3), porém agora vistos sem a presença de material aderido. O mesmo se comprovou na aresta 2, onde ocorreu um lascamento na quina e outro lascamento no meio da aresta, com maiores dimensões quando comparados a primeira aresta. As setas na figura 33 indicam os lascamentos. Ficou evidenciado que os lascamentos ocorreram aleatoriamente em função do fluxo irregular de aderência e arrancamento do material na ponta da broca, tanto em relação à quantidade, quanto em relação à posição em que ocorreram e em suas dimensões.

Figura 33 – Superfície principal de folga após decapagem. (a1) – aresta de corte n°. 1. (b1) aresta de corte n°. 2.



Com um aumento de 600 vezes, pôde-se notar a descontinuidade nas arestas provocada pelos lascamentos. Na figura 34 (a), o lascamento na periferia da broca afetou a quina da ferramenta, chegando à aresta e superfície de folga secundárias. Em 34 (b), o lascamento no meio da aresta n<sup>o</sup>. 1. Na figura 34 (c), o maior lascamento verificado, ocorrido na aresta n<sup>o</sup>. 2, onde foi medido de acordo com a indicação da mesma figura, a profundidade da avaria que foi de 0,057 mm.

Figura 34 – Lascamentos nas arestas principais de corte. (a) e (b) – aresta de corte n<sup>o</sup>. 1. (c) aresta de corte n<sup>o</sup>. 2.



Nas imagens das arestas mostradas nas figuras 33 e 34, verificou-se linhas contínuas e praticamente paralelas às arestas principais de corte, que inclusive, contornaram os lascamentos ocorridos.

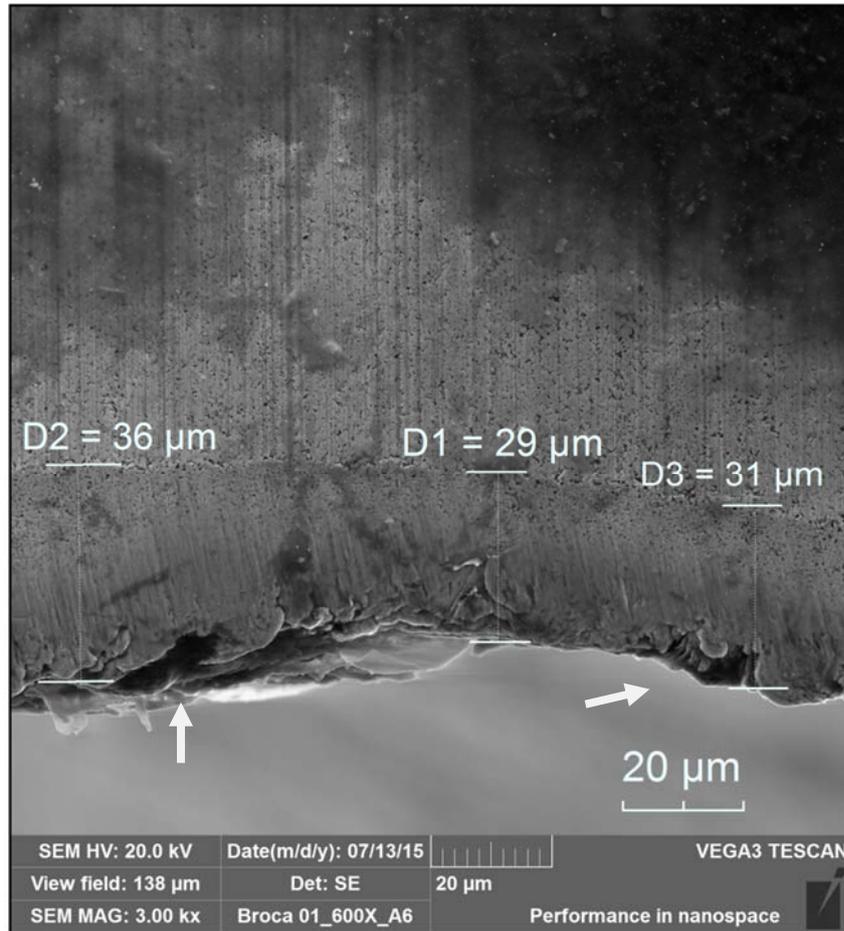
A visualização na figura 35 com um aumento de 3000 vezes, mostrou claramente diferenças na direção dos riscos sobre a superfície desgastada em comparação com o restante da superfície, que ainda apresentava marcas resultantes do processo de retificação proveniente da sua fabricação.

Além da textura diferente, que nas marcas de retífica apresentavam-se uniformes e com certo padrão de espaçamentos, na textura da região desgastada ocorreram algumas variações e descontinuidades do padrão, apresentando um ângulo de posição diferente em relação aos riscos originais. O fato de ter havido um processo constante de aderência e arrancamento do material aderido, justificou essas diferenças. Nos momentos em que não havia material aderido, o contato da ferramenta com o material do corpo de prova gerou desgastes pelo mecanismo de abrasão.

O tamanho dos desgastes medidos foi de aproximadamente 0,03 mm, tanto ao longo da aresta não lascada, quanto acima dos lascamentos. Ou seja, após ocorrerem os lascamentos, o desgaste voltou a aparecer de forma contínua ao longo de toda a aresta. Ficou evidenciado, pela figura 36, que esse desgaste ocorreu durante a furação, uma vez que, na geometria da broca nova, não havia, evidentemente, marcas de desgaste.

A figura 36 mostra a geometria da broca nova. Em (a), com um aumento de 600 vezes, a quina da ferramenta e em (b), a aresta principal de corte com um aumento de 3000 vezes.

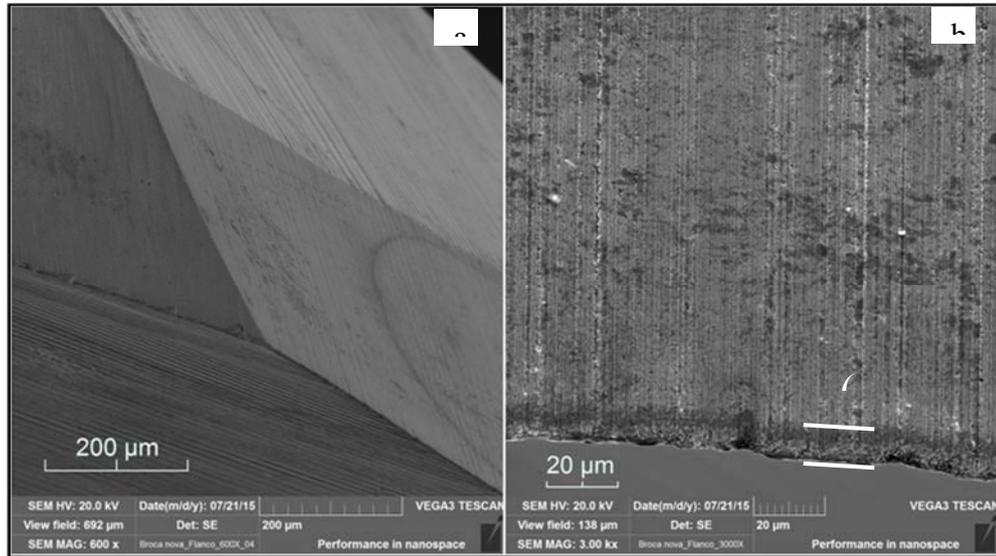
Figura 35 – Linha de desgaste na aresta principal de corte 2 e micro lascamentos.



Também se observaram micro lascamentos ao longo da aresta, indicados pelas setas na figura 35, resultando na sua deterioração precoce. Esses micro lascamentos podem ter sido gerados pelo contato mecânico durante a furação, além da frequente aderência e arrancamento de material na aresta. Porém quando analisada a geometria da broca ainda nova, figura 36, verificou-se a presença de um grande número de falhas na continuidade das arestas. Na figura 36 (a) pode-se ver a quina da ferramenta e as duas arestas com um aumento de 600 vezes, onde ficou evidenciada a existência de micro lascamentos resultantes do processo de fabricação da broca. Na figura 36 (b), com um aumento de 3000 vezes, ficou evidenciada a descontinuidade na aresta principal, além de uma faixa de coloração mais escura ao longo do seu comprimento, como indicado no detalhe (c) da mesma figura. Essa coloração mais escura pode ter se originado pela temperatura elevada provocada pelo processo de retificação das arestas. Tal fato pode ter gerado uma região afetada pelo calor, ao longo das arestas, tornando-as menos resistentes ao desgaste. Desse modo, os lascamentos verificados na figura 34, também podem ter sido

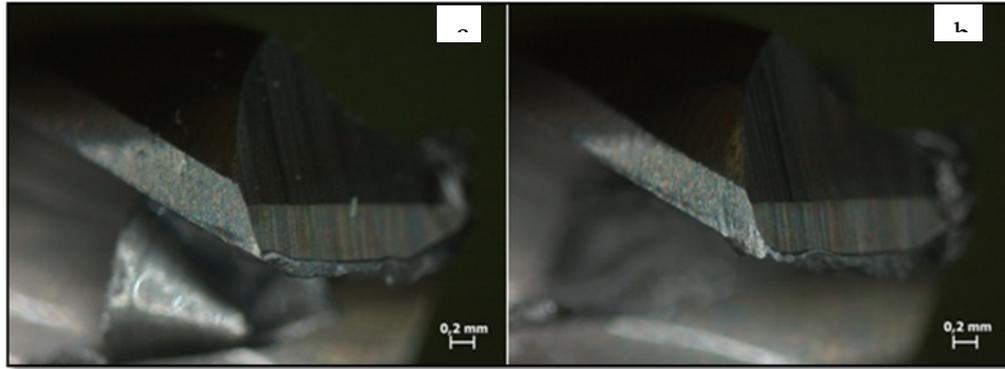
decorrentes do aumento dos micro lascamentos originais da broca, com o aumento do número de furos feitos.

Figura 36 – Micro lascamentos. (a) – Quina da ferramenta. (b) Aresta principal de corte.



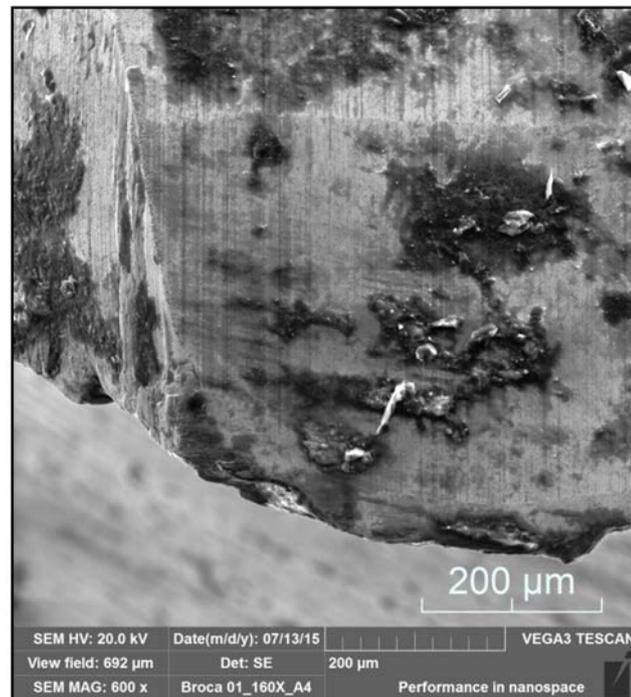
Na avaliação da aresta e superfícies secundárias de folga, verificou-se pouco material aderido ao final da furação de número 100, como mostra a figura 37 em (a) – aresta e superfícies secundárias de folga número 1 e (b) – aresta e superfícies secundárias de folga número 2. Em todos os furos iniciais avaliados antes do furo de número 100, a condição de material aderido não sofreu grandes alterações, mantendo um padrão com pouca aderência. As imagens foram feitas com um aumento de 25 vezes.

Figura 37 – Superfície secundária de folga para a  $v_c$  de 67 m/min e  $f_n$  de 0,031 mm/rot. (a) – furo n°. 100 para a aresta de corte n°. 1, (b) – furo n°. 100 para a aresta de corte n°. 2.



Na avaliação da quina da aresta 2, com aumento de 600 vezes pelo MEV, figura 38, constatou-se que havia um grande lascamento unindo as arestas principal e secundária, com a presença de material aderido, não só nas arestas, mas também nas superfícies de folga, que não foram removidos por completo pelo processo de decapagem. A quina da aresta 1 apresentou as mesmas características, porém, em menor tamanho.

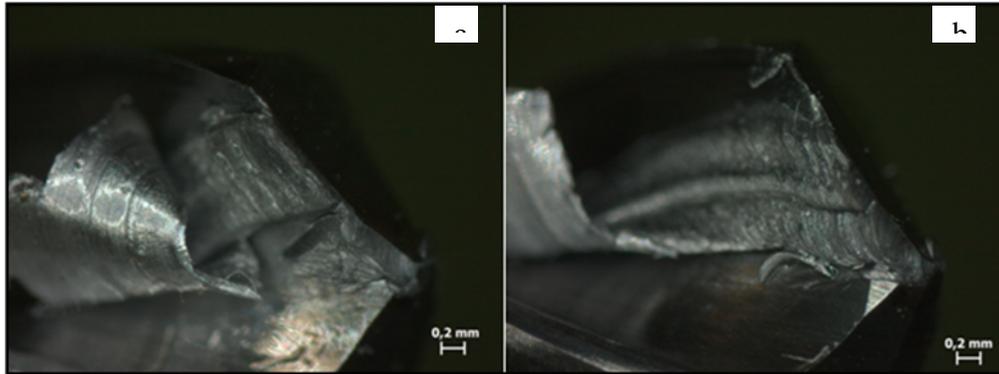
Figura 38 – Quina da aresta de corte 2 para o furo de número 100.



A figura 39 mostra em (a) a face da aresta de corte número 1, e em (b) a face da aresta de corte número 2, ambas para o furo de número 100. As imagens da face da ferramenta foram feitas com um aumento de 25 vezes pelo stereo microscópio. Nas avaliações feitas em todos os

furos, as faces da ferramenta apresentaram grandes cavacos ainda aderidos abaixo das arestas principais. Os cavacos eram do tipo contínuo com notável deformação plástica.

Figura 39 – Face da ferramenta. (a) – furo n°. 100, para aresta de corte n°. 1. (b) – furo n°. 100 para aresta de corte n°. 2.

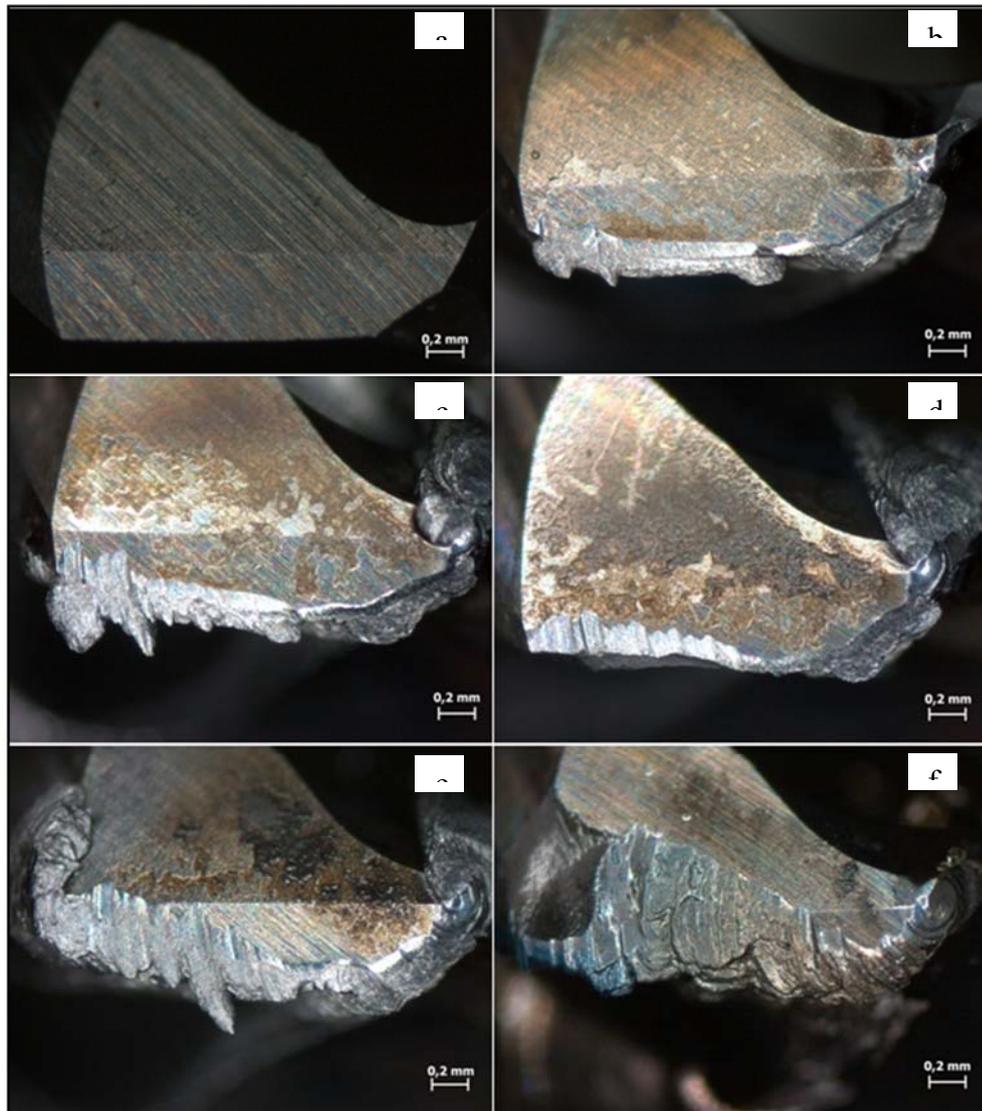


Devido à grande quantidade de material aderido na ponta da ferramenta, a medição da evolução dos desgastes foi impossibilitada. Desse modo, a avaliação do desempenho das brocas foi feita em número de furos até a quebra da ferramenta, mostrado na tabela 10. Ao longo dos experimentos, a cada 104 furos, imagens foram feitas da geometria da ponta da broca para se avaliar a ocorrência das avarias até a quebra. Para as explicações abaixo, foram utilizadas imagens obtidas ao longo das furações, figura 41, com a broca número 1, para o fluido 2 e com a velocidade de corte de 67 m/min. Essa foi a condição que fez o maior número de furos em todo o experimento, ou seja, foi a maior vida de ferramenta obtida. Mesmo assim, na melhor condição ensaiada, os danos observados na ferramenta foram bastante expressivos.

Ficou evidenciada a presença de grande quantidade de material aderido na ponta da broca ao longo de toda sua vida útil. Condições semelhantes foram obtidas para as outras velocidades de corte e também para o uso do fluido número 1. Assim, os efeitos mostrados na figura 40 representam com fidelidade o que ocorreu nas demais condições ensaiadas. Devido ao processo cíclico de aderência e arrancamento de material da ponta da broca, os lascamentos aumentaram significativamente com o avanço do número de furos feitos. Na figura 40 (b), não ficou evidenciado a presença de lascamentos, devido ao material aderido que recobria boa parte da aresta no momento da imagem. Na figura 40 (c), já com pouco mais de mil furos, apesar do material aderido, a aresta de corte já estava seriamente avariada. Em 40 (d), o material não estava aderido na maior parte da aresta, deixando a vista uma geometria totalmente destruída e

imprópria ao corte. Na figura 40 (e) e (f), ficou evidenciado que o aumento da avaria provocou a destruição da quina da ferramenta, onde boa parte da geometria da broca foi removida e o que restou estava totalmente recoberto pelo material do corpo de prova. A imagem feita com o furo número 4056 foi a última antes da quebra. A ferramenta quebrou com 4092 furos.

Figura 40 – Evolução das avarias na superfície principal de folga para a  $v_c$  de 67 m/min e  $f_n$  de 0,031 mm/rot. (a) – ferramenta nova. (b) – furo n°. 520. (c) – furo n°. 1040. (d) – furo n°. 2080. (e) furo n°. 3016. (f) – furo n°. 4056.



#### **4.4. Considerações finais**

Ficou evidenciada que a baixa dureza, e conseqüente ductilidade elevada do material ensaiado, foram determinantes na ocorrência do mecanismo de aderência observado nas ferramentas. Mesmo nos testes feitos com velocidades de corte mais elevadas, a condição de material aderido nas arestas não se alterou significativamente, ou seja, a elevada capacidade de deformação do material superou as demais condições do processo, não havendo nenhum experimento sem a ocorrência de aderência.

O fato de as brocas não possuírem recobrimento, também justificou, teoricamente, os resultados obtidos, por possuírem maior coeficiente de atrito quando comparadas a ferramentas recobertas. Assim, dificultando o escoamento do cavaco.

A falta de lubrificação e refrigeração pelo centro da ferramenta proporcionou uma condição de difícil acesso do fluido às arestas de corte no interior do furo, tornando esse processo deficiente. O desempenho obtido entre os dois fluidos na velocidade de corte mais elevada foi estatisticamente igual. Esse fato pôde ser justificado no sentido de que quanto maior forem as velocidades, maiores são as dificuldades de penetração do fluido no interior do furo. Ou seja, à medida que os fluidos não atuam satisfatoriamente na região do corte, deixam de ter influência significativa nos resultados de desempenho.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados pela análise estatística mostram que não houve diferenças significativas na comparação dos dois fluidos de corte, uma vez que a diferença entre as raízes quadradas das médias de furos obtidos entre eles foi de apenas 4,1%. Essa diferença foi inferior a diferença mínima significativa obtida pelo método estatístico.

Na comparação das médias de furos feitos para cada velocidade de corte, independente do fluido, as velocidades de 82 m/min e 74,5 m/min não apresentaram diferenças significativas entre si. Já a velocidade de 67 m/min, fez 37,9% a mais de furos que as velocidades anteriores.

A comparação dos fluidos em cada velocidade de corte mostrou que o desempenho da broca foi diferente para cada combinação experimentada. Na velocidade de 82 m/min, não houve diferença significativa entre os dois fluidos. Na velocidade de 74,5 m/min, o fluido 1 - *Cutting Oil* 351 fez 44,5% a mais de furos que o fluido 2. Na velocidade de 67 m/min o fluido 2 - *Superedge* 6552 fez 24,4% a mais de furos que o fluido 1.

Ficou demonstrado que o número de furos feitos com cada fluido depende da velocidade de corte, bem como, o número de furos feitos para cada velocidade, depende do fluido utilizado.

O fluido 1 apresentou-se mais estável, quando comparado ao fluido 2, ao ser variada a velocidade de corte. Assim, podendo ser utilizado em uma maior gama de condições de corte.

O mecanismo de desgaste predominante foi a aderência, seguida de lascamentos, com intensa quantidade de material aderido na ponta da broca logo nos primeiros furos. A medição dos desgastes foi impossibilitada pela quantidade de material aderido nas arestas.

Através da constatação de desgastes por abrasão ao longo da aresta de corte, após o processo de decapagem, foi evidenciado um fluxo constante de aderência e arrancamento do material aderido. O desgaste por abrasão ocorreu no momento que as arestas estavam descobertas, não ficando evidenciado que esse mecanismo de desgaste tenha contribuído para o fim de vida das ferramentas.

Como resultado do arrancamento do material aderido, o lascamento foi a avaria que levou as ferramentas ao final de vida, ao terem sua geometria totalmente destruída ao longo da furação até o momento da quebra.

A contribuição estatística, quando não é possível medir o desgaste da ferramenta, ficou evidenciada nesse trabalho, pois foi de fundamental importância para quantificar os resultados,

mostrando as diferenças de rendimento para cada situação experimentada com valores confiáveis.

Naves e Silva (2011), em seus experimentos, demonstraram que os desgastes são influenciados pela pressão de aplicação do fluido de corte, pelos métodos de aplicação: jorro, MQF e a seco, além da posição de aplicação. Essas técnicas podem ser aplicadas no contexto do presente trabalho para reduzir o mecanismo de aderência que levou as brocas ao final de vida, obtendo-se resultados melhores de rendimento.

## 6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros, os seguintes assuntos podem ser pesquisados:

- Análise do desempenho de brocas de metal-duro com diferentes revestimentos em comparação a brocas não revestidas na furação de aço dúctil;
- Análise do desempenho de brocas de metal-duro com canais de refrigeração internos em comparação ao processo de furação com o meio lubrificador por jorro na furação de aço dúctil;
- Avaliação da integridade superficial do furo com a redução do mecanismo de aderência na ponta da broca por meio do uso de revestimentos, mudança no método de aplicação do fluido e/ou mudança nos parâmetros de corte.
- Atuar na microgeometria da broca para aumentar o tempo de corte e diminuir a dispersão dos resultados;
- Atuar na macrogeometria da broca, como ângulo de ponta e ângulo de hélice para melhorar os resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTAKHOV, V.P., **Tribology of Metal Cutting**, Elsevier: London, 2006.
- BOEHS, L. **Metodologia de ensaio sistemático de usinagem para operações de furação**. UFSC, [ca.1990].
- BOSSARDI, J. C. S. **Análise comparativa dos meios lubrificantes na furação do ferro fundido vermicular com brocas helicoidais de metal-duro revestidas com TiAlN**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- BRINKSMEIER, E. **Prediction of tool fracture in drilling**. Annals of the CIRP, V. 39, p. 97, 1990.
- ÇAKİR, O.; YARDIMEDEN, A.; OZBEN, T.; KILICKAP, E. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. Turkey, 2007.
- CALZA, M.; SANTIN, R.; NICOLA, G. L.; ZEILMANN, R.P. **Desgaste de brocas de aço-rápido na furação sob diferentes condições de aplicação de fluidos lubrificantes**. COBEF, São Paulo, 2007.
- CASA DOS LUBRIFICANTES. **Ficha de informações de produtos químicos - FISPQ**. Caxias do Sul, 2014.
- CASTROL, **Castrol Superedge 6552, Fluido semissintético de alta performance**. 2º ed., Brasil, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7º ed., ABM, São Paulo, 2002.
- COSTA, L. V.; Carneiro, J. R. G.; Martins, P. S.; Lourenço, M. M. **Influência da adesão da liga Al-Si em broca de metal-duro nos parâmetros geométricos e textura em furação, utilizando-se sistema de fixação hidráulico e térmico**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8º ed. Artliber Ltda., São Paulo, 2013.
- DORMER TOOLS – Produtos e Serviços. Tratamentos superficiais. Disponível em: <[http://www.dormertools.com/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004461.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.dormertools.com/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004459.nsf/Alldocs/Product\\*2DMaterials\\*2ASurface\\*Treatments&banner=/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004461.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument](http://www.dormertools.com/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004461.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.dormertools.com/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004459.nsf/Alldocs/Product*2DMaterials*2ASurface*Treatments&banner=/SANDVIK/2531/Internet/Portugese/S004461.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument)>. Acesso em: 12 fev. 2014.
- ESTATÍSTICA II (notas de aula). Departamento de estatística UFPR, Curitiba, 2009.

FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. 4° ed. ABM, São Paulo, 1972.

FU, Y.; WEI, J.; BATCHELOR, A. W. **Some considerations on the mitigation of fretting damage by the application of surface-modification Technologies**. Journal of Materials Processing Technology, 2000.

HONG, S. Y. **Knowledge-based diagnosis of drill conditions**. Journal of Intelligent Manufacturing 4, 233-241, Dayton, USA, 1993.

JÚNIOR, A. S. A.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; NEVES, T. E. S. B.; RODRIGUES, J. R. P. **Estudo da usinabilidade do aço 1020 usando o método de faceamento rápido de Brandisma**. 6° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, 2011.

KANAI, M. et al. **Statistical characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests**. Annals of the CIRP, 27, p. 61-66, 1978.

KRAR, S. F.; OSWALD, J. W. **Technology of Machine Tools**. 4th ed, McGRAW-WILL, 1991.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2° ed., Blucher, São Paulo, 2011.

MAMIDI, VAMSI KRISHNA; XAVIOR, M. ANTHONY. **A review on selection of cutting fluids**. National Monthly Refereed Journal of Research in Science e Technology. 2014.

MARQUES, F. M. **Avaliação do desempenho de brocas helicoidais de aço rápido revestidas na usinagem de ferro fundido nodular GGG50**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

NAVES, V. T. G.; SILVA, M.B. **Usinagem com fluido de corte a alta pressão**. 21° POSMEC – Simpósio do programa de pós graduação da universidade de Uberlândia. Uberlândia, 2001.

OXFORD JR., C.J. **On the Drilling of Metals: 1 – Basic Mechanics of the Process**. Trans. of ASME, 1955.

SANDVIK COROMANT. **Manual técnico**. Sandviken, Suécia, 2010.

SANTOS, E. M.; KIECKOW, F.; CASARIN, J. J. **Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço-rápido (HSS) modificadas superficialmente por nitretação a plasma**. Revista Eletrônica de Extensão, URI, Santo Ângelo, 2013.

SMITH, G. T. **Cutting Tool Technology - Industrial Handbook**. Springer, London, 2008.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 5° ed., UFSC, Florianópolis, 2005.

VIEIRA, S. **Estatística Experimental**. 2° ed., Atlas, São Paulo, 1999.

ZEILMANN, R. P.; WEINGAERTNER, W. L. **Desgaste em brocas de metal-duro quando na furação da liga de titânio Ti6Al4V**. COBEF, São Paulo, 2007.

## ANEXO A – RESULTADOS ESTATÍSTICOS GERADOS PELO SOFTWARE SISVAR PARA O NÚMERO DE FUROS FEITOS

Arquivo analisado:

C:\MESTRADO\Fluido de Corte.DB

Variável analisada: Número de Furos

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fluido	1	25992.000000	25992.000000	0.098	0.7597
Velocidade	2	4385207.111111	2192603.555556	8.262	0.0055
Fluido*Velocidade	2	2434145.333333	1217072.666667	4.586	0.0331
erro	12	3184432.666667	265369.388889		
Total corrigido	17	10029777.111111			
CV (%) =	32.95				
Média geral:	1563.222222	Número de observações:		18	

Teste Tukey para a FV Fluido

DMS: 529,101673533197 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 9  
Erro padrão: 171,713388104484

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	1525.222222	a1
Cutting Oil 351	1601.222222	a1

Teste Tukey para a FV Velocidade

DMS: 793,862110511209 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6  
 Erro padrão: 210,30509143024

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
82	1183.666667	a1
74,5	1245.666667	a1
67	2260.333333	a2

-----  
 Análise do desdobramento de Fluido dentro de cada nível de:

Velocidade

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fluido /1	1	1181040.666667	1181040.666667	4.451	0.0566
Fluido /2	1	1207810.666667	1207810.666667	4.551	0.0542
Fluido /3	1	71286.000000	71286.000000	0.269	0.6137
Erro	12	3184432.666667	265369.388889		

Codificação usada para o desdobramento  
 cod. Velocidade

1 = 67  
 2 = 74,5  
 3 = 82

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV Fluido

DMS: 916,430980929218 NMS: 0,05

-----  
 Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 297,416312536759

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Cutting Oil 351	1816.666667	a1
Superedge 6552	2704.000000	a1

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV Fluido

DMS: 916,430980929218 NMS: 0,05

-----  
 Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 297,416312536759  
 -----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	797.000000	a1
Cutting Oil 351	1694.333333	a1

-----

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:  
 3

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----

Teste Tukey para a FV Fluido

-----

DMS: 916,430980929218 NMS: 0,05

-----

Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 297,416312536759

-----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	1074.666667	a1
Cutting Oil 351	1292.666667	a1

-----

-----  
 Análise do desdobramento de Velocidade dentro de cada nível de:

Fluido

-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Velocidade /1	2	450877.555556	225438.777778	0.850	0.4469
Velocidade /2	2	6368474.888889	3184237.444444	11.999	0.0013
Erro	12	3184432.666667	265369.388889		

-----

Codificação usada para o desdobramento  
 cod. Fluido  
 1 = Cutting Oil 351  
 2 = Superedge 6552

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Velocidade dentro da codificação:  
 1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----

Teste Tukey para a FV Velocidade

-----

DMS: 1122,69056333908 NMS: 0,05

-----  
 Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 297,416312536759  
 -----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
82	1292.666667	a1
74,5	1694.333333	a1
67	1816.666667	a1

-----

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Velocidade dentro da codificação:  
 2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

-----  
 Teste Tukey para a FV Velocidade  
 -----

DMS: 1122,69056333908 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 297,416312536759  
 -----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
74,5	797.000000	a1
82	1074.666667	a1
67	2704.000000	a2

-----

## ANEXO B - RESULTADOS ESTATÍSTICOS GERADOS PELO SOFTWARE SISVAR PARA A RAIZ QUADRADA DO NÚMERO DE FUROS FEITOS

Arquivo analisado:

C:\MESTRADO\Fluido de Corte.DB

Variável analisada: Número de Furos

Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fluido	1	12.005000	12.005000	0.586	0.4589
Velocidade	2	689.586100	344.793050	16.817	0.0003
Fluido*Velocidade	2	401.534033	200.767017	9.792	0.0030
erro	12	246.038467	20.503206		
Total corrigido	17	1349.163600			
CV (%) =	11.59				
Média geral:	39.0533333	Número de observações:	18		

Teste Tukey para a FV Fluido

DMS: 4,6507672536753 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 9  
Erro padrão: 1,50934884987444

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	38.236667	a1
Cutting Oil 351	39.870000	a1

Teste Tukey para a FV Velocidade

DMS: 6,9779932519292 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 6  
 Erro padrão: 1,84856726302451

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
82	34.530000	a1
74,5	34.825000	a1
67	47.805000	a2

Análise do desdobramento de Fluido dentro de cada nível de:

Velocidade

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV		GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Fluido	/1	1	162.344017	162.344017	7.918	0.0156
Fluido	/2	1	240.793350	240.793350	11.744	0.0050
Fluido	/3	1	10.401667	10.401667	0.507	0.4899
Erro		12	246.038467	20.503206		

Codificação usada para o desdobramento

cod. Velocidade

1 = 67

2 = 74,5

3 = 82

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:

1

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Fluido

DMS: 8,0553651775432 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 2,61426889432817

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Cutting Oil 351	42.603333	a1
Superedge 6552	53.006667	a2

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:

2

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente

Teste Tukey para a FV Fluido

-----  
 DMS: 8,0553651775432 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 2,61426889432817  
 -----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	28.490000	a1
Cutting Oil 351	41.160000	a2

-----

Teste de Tukey para o  
 desdobramento de Fluido dentro da codificação:  
 3

Obs. Identifique a codificação conforme valores apresentados anteriormente  
 -----

Teste Tukey para a FV Fluido  
 -----

DMS: 8,0553651775432 NMS: 0,05  
 -----

Média harmonica do número de repetições (r): 3  
 Erro padrão: 2,61426889432817  
 -----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
Superedge 6552	33.213333	a1
Cutting Oil 351	35.846667	a1

-----

## ANEXO C – TABELA DE LIMITES UNILATERAIS DE F

Tabela 12 - Limites unilaterais de F ao nível de 5% de probabilidade  $n_1$  = número de graus de liberdade do numerador,  $n_2$  = número de graus de liberdade do denominador.

$n_2 \backslash n_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,0	243,9	244,7	245,4
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,40	19,41	19,42	19,42
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,76	8,74	8,73	8,71
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,94	5,91	5,89	5,87
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,70	4,68	4,66	4,64
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,98	3,96
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,60	3,57	3,55	3,53
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,31	3,28	3,26	3,24
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,10	3,07	3,05	3,03
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,94	2,91	2,89	2,86
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,82	2,79	2,76	2,74
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,72	2,69	2,66	2,64
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,63	2,60	2,58	2,55
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,57	2,53	2,51	2,48
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,51	2,48	2,45	2,42
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,46	2,42	2,40	2,37
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,41	2,38	2,35	2,33
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,31	2,29
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,34	2,31	2,28	2,26
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,31	2,28	2,25	2,22
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,28	2,25	2,22	2,20
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,26	2,23	2,20	2,17
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,24	2,20	2,18	2,15
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,22	2,18	2,15	2,13
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,20	2,16	2,14	2,11
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,12	2,09
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,17	2,13	2,10	2,08
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,14	2,10	2,08	2,05
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,13	2,09	2,06	2,04
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,04	2,00	1,97	1,95
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,89	1,86
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,87	1,83	1,80	1,78
$\infty$	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,72	1,69

Fonte: adaptada de Estatística II, 2009.