



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS – PPGEM

MARLON JOSÉ CARDOSO

ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO PROFUNDA
NO AÇO SAE 4144M ENDURECIDO UTILIZANDO
MQL E BROCA HELICOIDAL REVESTIDA

CURITIBA

MARÇO – 2014

Marlon José Cardoso

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO PROFUNDA
NO AÇO SAE 4144M ENDURECIDO UTILIZANDO
MQL E BROCA HELICOIDAL REVESTIDA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Materiais, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli.

CURITIBA

MARÇO – 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Cardoso, Marlon José
C268a Análise do processo de furação profunda no aço SAE
2014 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal
 revestida / Marlon José Cardoso.-- 2014.
 xviii, 135 f.: il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2014
Bibliografia: f. 131

1. Perfuração e broqueamento. 2. Usinagem. 3. Aço
- Propriedades mecânicas. 4. Máquinas-ferramenta.
5. Brocas helicoidais. 6. Fluidos de corte. 7. Revestimentos.
8. Desgaste mecânico. 9. Engenharia mecânica - Dissertações.
I. Polli, Milton Luiz, orient. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD 22 -- 620.1

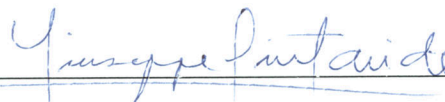
Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

MARLON JOSÉ CARDOSO

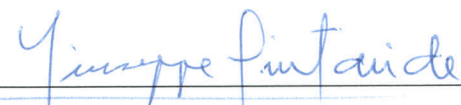
ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO PROFUNDA NO AÇO SAE 4144M ENDURECIDO UTILIZANDO MQL E BROCA HELICOIDAL REVESTIDA

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

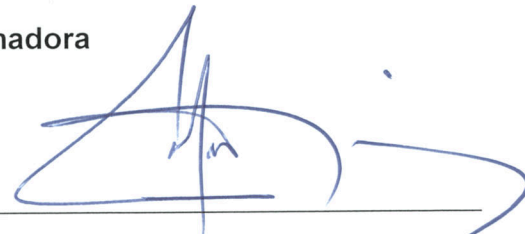


Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
Coordenador de Curso


Banca Examinadora



Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. Eng.
(UTFPR)



Prof. Fred Lacerda Amorim, Dr. Eng.
(PUCPR)



Prof. Milton Luiz Polli, Dr. Eng.
Orientador - (UTFPR)

Curitiba, 27 de março de 2014

*À minha esposa, Fabia Cristiane Berbetz e a nossos filhos,
pela, compreensão e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Milton Luiz Polli pela sua dedicação e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela contribuição durante o curso.

Ao Acordo de Cooperação Técnica entre UTFPR e Robert Bosch nº 10/2011, Furação profunda com broca helicoidal utilizando sistema de refrigeração e lubrificação do corte MQL em aço 42CrMo4.

À empresa Robert Bosch, pela bolsa de estudos dos alunos de iniciação científica que participaram ativamente deste projeto, e pela disponibilidade dos equipamentos, laboratórios e recursos.

Ao aluno de iniciação científica Renan Paris Curce, pela dedicação e comprometimento com o trabalho.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

CARDOSO, Marlon José, **Análise do Processo de Furação Profunda no aço SAE 4144M Endurecido Utilizando MQL e Broca Helicoidal Revestida**, 2014, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RESUMO

Os processos de furação são largamente utilizados na indústria metal mecânica, envolvendo grande complexidade para profundidades maiores que cinco vezes o diâmetro. Para estes casos é necessário o emprego de máquinas, ferramentas especiais e fluidos lubri-refrigerantes pressurizados, com propriedades que atendam as solicitações severas do corte e auxiliem no transporte e remoção dos cavacos durante o processo. Esta complexidade aumenta os custos do processo, o impacto ambiental e os riscos a saúde do operador. O propósito deste estudo é analisar o processo de furação profunda com broca helicoidal de metal-duro revestida, em profundidades de até 24 vezes o diâmetro, no aço SAE 4144M, forjado e temperado com 39 HRC de dureza, utilizando o sistema lubri-refrigerante de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). O estudo compara os processos com sistemas lubri-refrigerante convencional e sistema MQL, com a análise da influência no desgaste das brocas, revestidas com TiAlN e AlCrN-based. O sistema lubri-refrigerante convencional ou jorro de óleo, utiliza fluido integral de base mineral pressurizado a 50 bar, enquanto o sistema MQL utiliza fluido lubri-refrigerante sintético a 10 bar de pressão. A formulação dos experimentos é dada por “*design of experiment*” (DOE), considerando as variáveis: velocidade de corte, avanço, temperatura da peça e a forma do cavaco. Constatou-se que o desgaste da broca utilizando MQL, foi menor do que no processo convencional, devido ao fato da temperatura de corte ser maior, porém estável. Com a escolha adequada dos parâmetros de corte através do método, o revestimento AlCrN-based apresentou menor desgaste e adesão, devido a resistência em usinagens com altas temperaturas.

Palavra chave: Furação profunda, broca helicoidal, TiAlN, AlCrN-based, MQL.

CARDOSO, Marlon José Cardoso, **Analysis of Deep Drilling Process in Hardened Steel SAE 4144M Using MQL and Coated Twist Drill**, Dissertation (Masters in Engineering) – Post-graduate in Mechanical Engineering and Materials. Federal University of Technology Paraná, Curitiba, 2014.

ABSTRACT

The drilling processes are widely used in the metalworking industry and involve high complexity when happen in depths more than five times the diameter. For these cases it is necessary to use special machines and tools, and pressurized fluids to enhance chip removal, with cooling and lubricating properties that meet stringent requirements. This complexity adds costs to the process, Increases the environmental impact and the health risks for the operator. The purpose of this study is to evaluate the deep hole drilling process (up to 24 diameters) using a twist drill coated (carbide system), the material is SAE 4144M steel forged and tempered hardness of 39 HRC, using system Minimum Quantity Lubrication (MQL). The study compares conventional processes and MQL, with the analysis of the influence on the wear of drills coated with TiAlN and AlCrN-based. The conventional coolant uses mineral based oil integral pressurized to 50 bar, while the MQL system, using synthetic oil at 10 bar pressure. The formulation of the experiments is given by “design of experiment” (DOE), considering the variables: cutting speed, feed rate wear, temperature of the work piece and chip form. It was found that the life of the drill in MQL process was higher than that in the conventional process, due to the fact that the temperature of the cut is, more stable, although higher. With the appropriate choice of cutting parameters by the method, the AlCrN-based coating showed less wear and adhesion due to resistant to high temperatures.

Keyword: Deep hole drilling, twist drill, TiAlN, AlCrN-based, MQL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1– Partes de uma broca helicoidal (STEMMER, 2008).....	25
Figura 2.2 – Ângulos de uma broca helicoidal (STEMMER, 2008).....	26
Figura 2.3 - Ângulos de hélice e ponta (A: Tipo N; B: Tipo H; C: Tipo W para Al; D: Tipo W para Cu), (STEMMER, 2008).....	27
Figura 2.4 – Afição cruzada da aresta transversal de corte (STEMMER, 2008).....	28
Figura 2.5 – Força axial (SKF, 1988).....	29
Figura 2.6 - Desgaste de flanco em ferramentas de metal-duro com diferentes tamanhos de grãos (TRENT e WRIGHT, 2000).....	31
Figura 2.7 - Movimentos da ferramenta e da peça (STEMMER, 2008; KÖNIG e KLOCKE, 2011).....	36
Figura 2.8 – Diferentes componentes no desgaste da ferramenta (BUNSHAH, 2001).....	37
Figura 2.9 – Causas de desgaste na usinagem peça (KÖNIG e KLOCKE, 1997).....	38
Figura 2.10 – Desgaste por adesão fotografia MEV da face de corte e de flanco após a furação em AISI 4150 (WOSNIAK, 2011).....	39
Figura 2. 11 – Desgaste de flanco (SCHROETER <i>et al.</i> , 1999).....	40
Figura 2.12 – Desgaste de cratera (KANAI, 1978).....	41
Figura 2.13 – Desgaste do gume transversal (KANAI, 1978).....	41
Figura 2.14 – Desgaste de quina (KANAI, 1978).....	42
Figura 2.15 – Desgaste de guia Mw (KANAI, 1978).....	42
Figura 2.16 – Lascamento da aresta (KANAI, 1978).....	42
Figura 2.17 – Trincas térmicas (KÖNIG e KLOCKE, 1997).....	43
Figura 2.18 – Formação do cavaco e medidas de desgaste, (KÖNIG e KLOCKE, 1997).....	44

Figura 2.19 – Relação do coeficiente volumétrico com a forma do cavaco (FERRARESI, 1995).....	49
Figura 2.20 – Sistemas MQL (a) Sistema MQL 2 canais. (b) Sistema MQL 1 canal (BIELOMATIK, 2011; LUBRIX, 2012).....	52
Figura 2.21 – Tipos de aplicação fluido lubri-refrigerante com bico externo, b) Fluido lubri-refrigerante interno pelo centro do fuso da máquina (LAWAL <i>et al.</i> , 2012).....	52
Figura 2.22 - Broca com dutos para refrigeração (FERRARESI, 1995).....	57
Figura 2.23 - Penetrabilidade do fluido de corte entre ferramenta-cavaco (FERRARESI, 1995).....	57
Figura 2.24 - Fonte de calor na formação de cavaco (STEMMER, 2008).....	59
Figura 3.1 – Microestrutura martensítica revenida. Fonte: Laboratório metalográfico Robert Bosch.....	62
Figura 3.2 – Sistema lubri-refrigerante MQL.....	63
Figura 3.3 – Projeto da broca diâmetro 4 mm utilizada nos testes.....	65
Figura 3.4 – Projeto da broca diâmetro 4,8 mm utilizada nos testes.....	65
Figura 3.5 – (a) Dinamômetro; (b) Máquina instrumentada.....	68
Figura 3.6 – Planejamento do experimento.....	70
Figura 3.7 – Estratégias de usinagem utilizada nos testes.....	70
Figura 3.8 – Atribuições qualitativas do cavaco pela forma (WOSNIAK, 2011).....	73
Figura 3.9 – Corpos de prova para medição de temperatura durante a furação.....	75
Figura 4.1 – Fatores que exercem maior influência no comportamento da forma do cavaco durante a furação utilizando sistema MQL.....	82
Figura 4.2 – Fatores que exercem maior influência no comportamento de temperatura da peça durante a furação utilizando sistema MQL.....	84
Figura 4.3 – Correlação dos fatores de temperatura da peça e forma do cavaco em função da V_c e do avanço utilizando sistema MQL.....	86
Figura 4.4 – Força axial em função de velocidade de corte e avanço.....	87

- Figura 4.5 – Broca \varnothing 4,8 TiAlN 300 furos com sistema lubri-refrigerante convencional óleo integral, (a) broca com ampliação de 50 vezes e (b) detalhe do desgaste com ampliação de 1200 vezes.....89
- Figura 4.6 – Broca \varnothing 4,8 TiAlN 800 furos com sistema lubri-refrigerante MQL, (a) broca com ampliação de 50 vezes e (b) detalhe do desgaste com ampliação de 1200 vezes.....90
- Figura 4.7 – Deformações ocorridas na parede do furo, (a) teste com sistema lubri-refrigerante convencional óleo integral. (b) teste com sistema lubri-refrigerante MQL.....92
- Figura 4.8 – Medições da temperatura durante a furação com sistema lubri-refrigerante convencional.....95
- Figura 4.9 – Medições da temperatura durante a furação com sistema lubri-refrigerante convencional.....96
- Figura 4.10 – Medições da circularidade dos furos com profundidades de 10; 20 e 30mm (a) furo com MQL (b) furo com sistema lubri-refringente convencional.....98
- Figura 4.11 – Correlação entre os parâmetros de corte, temperatura da peça e coeficiente volumétrico do cavaco.....100
- Figura 4.12 – Figura (a) os resultados de menor coeficiente volumétrico. Figura (b) de menor temperatura da peça.....101
- Figura 4.13 – Figura (a) forma dos cavacos com ferramenta integra. Figura (b) Forma dos cavacos após danificação do gume com 240 furos.....102
- Figura 4.14 – Figura (a) Broca com TiAlN que utilizou avanço de 0,15mm/rot, Vc 45m/min e MQL. Figura (b) broca com TiAlN que utilizou avanço 0,06mm/rot e Vc 60m/min e MQL.....103
- Figura 4.15 – Broca \varnothing 4 mm revestimento TiAlN, utilizado jorro de óleo, Vc 62 m/min e f 0,06 mm/rot com análise química na região de corte da broca.....104
- Figura 4.16– Broca \varnothing 4 mm revestimento TiAlN, utilizado MQL, Vc 62 m/min e f 0,06 mm/rot com análise química na região de corte da broca.....106

Figura 4.17 – Broca Ø 4 mm revestimento TiAlN, utilizado MQL, Vc 45 m/min e f 0,14 mm/rot com análise química na região de corte da broca.....108

Figura 4.18 – Broca Ø 4 mm revestimento AlCrN-based, utilizado MQL, Vc 45 m/min e f 0,14 mm/rot com análise química na região de corte da broca.....109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre o material SAE 4144M e 4140. (VILARES S.A.1998).....	47
Tabela 3.1 - Composição química do material.....	61
Tabela 3.2 - Principais características das brocas diâmetro 4.8 utilizada nos testes.....	66
Tabela 3.3 – Sequência simplificada do experimento.....	71
Tabela 3.4 - Primeiro DOE para definição da geometria 1 ou 2 da broca utilizando sistema lubri-refrigerante MQL.....	72
Tabela 3.5 - Segundo DOE para análise da força de avanço.....	73
Tabela 3.6 - Parâmetros para o teste de longa duração.....	74
Tabela 3.7 - Parâmetros de corte para a medição de temperatura.....	76
Tabela 3.8 - Rodadas do terceiro DOE para definição dos melhores parâmetros.....	77
Tabela 3.9 - Teste de desgaste para definir número de furos	78
Tabela 3.10 - Experimento comparativo entre tipos de revestimentos, sistemas lubri-refrigerantes e parâmetros de corte.....	79
Tabela 4.1 - Resultado da avaliação da forma do cavaco e temperatura no primeiro DOE.....	81
Tabela 4.2 - Resultado das características de dimensionais e de formas entre os dois sistemas.....	97
Tabela 4.3 - Rodadas do DOE furo de 24 vezes o diâmetro.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS DO ALFABETO LATINO

UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
SAE	- Society of Automotive Engineers – Sociedade de Engenheiros Automotivos
DOE	- <i>Design of experiment</i> – Projeto do Experimento
CVD	- <i>Chemical vapor deposition</i> - Deposição de vapor químico
PVD	- <i>Physical vapor deposition</i> - Deposição de vapor físico
MQL	- <i>Minimum Quantity lubricant</i> – Mínima quantidade de lubrificante
HRC	- Dureza Rockwell na escala C
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	- Espectroscopia de Energia Dispersiva
TiN	- Nitreto de titânio alumínio
TiCN	- Carbonitreto de titânio
TiC	- Carboneto de titânio
TiAlN	- Nitreto de titânio alumínio
AlCr	- Nitreto de alumínio e cromo
Vc	- Velocidade de corte
f	- Velocidade de avanço
Ve	- Velocidade efetiva do corte
Fz	- Força Avanço
VB	- Largura média de desgaste de flanco
VB _{max}	- Largura máxima de desgaste de flanco
KB, KT KM	- Parâmetros do desgaste de cratera
Ct, Cm	- Desgaste do gume transversal
W	- Desgaste de quina
Mw	- desgaste de guia
Pt, Pm	- Parâmetros de lascamento
DB	- Decibéis

LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO GREGO

α	- Ângulo de incidência
β	- Ângulo de cunha
γ	- Ângulo de saída
φ	- Ângulo do gume transversal
σ	- Ângulo de ponta
δ	- Ângulo de hélice
μ	- Coeficiente de atrito
η	- Ângulo resultante efetiva do corte
ε	- Ângulo de quina
$r\varepsilon$	- Raio de ponta

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS DO ALFABETO LATINO ...	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS DO ALFABETO GREGO	XV
1. INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	21
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 PROCESSO FURAÇÃO	23
2.1.1 Furação profunda	24
2.2 FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS.....	24
2.2.1 Brocas helicoidais	25
2.2.2 Partes de uma broca helicoidal	25
2.2.3 Afições normalizadas para brocas helicoidais.....	28
2.2.4 Materiais de brocas	30
2.3 REVESTIMENTOS	31
2.3.1 Técnicas de aplicação	32
2.3.2 Brocas revestidas com PVD TiAlN	33
2.3.3 Brocas revestidas com PVD AlCrN-based	34
2.4 MOVIMENTOS RELATIVOS DA FURAÇÃO	35
2.4.1 Mecanismos de desgaste.....	36
2.4.2 Desgaste em uma broca helicoidal	40
2.4.3 Critérios para fim de vida.....	43
2.5 USINABILIDADE DOS AÇOS.....	44
2.5.1 Fatores influentes sobre a usinabilidade dos aços.....	45
2.5.2 Aço SAE 4144M	46
2.5.3 Forma dos cavacos	47

2.6	USINAGEM COM MQL	49
2.6.1	Princípio de funcionamento	51
2.6.2	Tipos de sistemas MQL	51
2.6.3	Características da usinagem MQL	53
2.6.4	Requisitos em brocas para MQL	53
2.6.5	Requisitos na instalação MQL	54
2.6.6	Vantagens do MQL	55
2.6.7	Desvantagens do MQL	55
2.7	MEIO LUBRI-REFRIGERANTE EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO MQL	56
2.7.1	Classificação dos fluidos de corte para MQL	58
2.8	TEMPERATURA EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO	59
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	MATERIAL UTILIZADO	61
3.2	MÁQUINA FERRAMENTA	62
3.3	SISTEMA MQL	63
3.4	MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES	64
3.5	BROCAS	64
3.6	EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA	67
3.7	EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DA FORMA DO CAVACO.	67
3.8	SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE FORÇA	67
3.9	SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	68
3.10	METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS	69
3.11	PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL	71
3.11.1	Análise da temperatura da peça e da forma do cavaco	72
3.11.2	Análise da força de avanço	73
3.11.3	Análise do desgaste da broca	74
3.11.4	Análise da integridade superficial do furo	74
3.12	SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL	75
3.12.1	Comportamento da temperatura do processo entre os sistemas lubri-refrigerantes e medição dos furos	75
3.12.2	Medição da temperatura da peça e da forma do cavaco através do volume ocupado	76
3.12.3	Comparativo entre tipos de revestimentos e sistemas lubri-refrigerantes	78
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	RESULTADO EXPERIMENTAL DA PRIMEIRA FASE	80

4.1.1 Resultados da escolha dos parâmetros de corte da primeira fase	80
4.1.2 Resultado dos fatores de influência na forma do cavaco	82
4.1.3 Resultado dos fatores de influência na temperatura da peça.....	84
4.1.4 Resultado do comportamento da temperatura e da forma do cavaco em função da Velocidade de corte e do avanço	86
4.1.5 Resultados da medição da força de avanço.....	87
4.1.6 Resultados do teste de longa duração utilizando jorro de óleo pressurizado... 88	
4.1.7 Resultados do teste de longa duração utilizando MQL	90
4.1.8 Resultados da integridade superficial do furo utilizando MQL.....	91
4.2 RESULTADO EXPERIMENTAL DA SEGUNDA FASE	94
4.2.1 Resultado do comportamento da temperatura do processo entre os sistemas lubri- refrigerantes.	94
4.2.2 Resultados da Qualidade do furo	97
4.2.3 Análise da forma dos cavacos em função do coeficiente volumétrico.....	99
4.2.4 Determinação do limite da quantidade de furos para o comparativo entre os sistemas lubri-refrigerantes	102
4.2.5 Resultados do desgaste de flanco (Vb).....	103
4.2.6 Resultados dos comparativos entre tipos de revestimentos, sistemas lubri-refrigerantes e parâmetros de corte	104
5. CONCLUSÕES	111
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
REFERÊNCIAS	114
ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO NO CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA 2013	121
ANEXO B – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE DO FURO COM MQL	132
ANEXO C – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO GEOMÉTRICA E RUGOSIDADE DO FURO COM MQL	133
ANEXO D – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE DO FURO COM JORRO DE ÓLEO	134
ANEXO E – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO GEOMÉTRICA E RUGOSIDADE DO FURO COM JORRO DE ÓLEO	135

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem são a base das indústrias metal mecânica. É por meio destes processos que ocorrem as transformações de peças do estado bruto em produtos manufaturados de alta tecnologia e com responsabilidades funcionais de grande importância. Com a evolução das máquinas, ferramentas e revestimentos a usinagem em materiais endurecidos tornou-se viável, melhorando o fluxo produtivo e eliminando operações com ferramentas de geometria não definida que são mais caras e complexas. Inúmeros processos de usinagem são aplicados para esta transformação. Neste universo um processo que se destaca em função de sua grande utilização e complexidade, é o processo de furação. Conforme norma DIN 8589-2, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça (FERRARESI, 1995). Esta cinemática possui particularidades que exigem muito da ferramenta durante o corte do material, sendo uma das mais importantes: a velocidade corte variável, sendo máxima na periferia e reduzindo em direção ao centro (tendendo a zero) (STEMMER, 2008). Outros fatores relevantes são a dificuldade de remoção do cavaco e a refrigeração da aresta de corte (DIN 8589, 2003; FERRARESI, 1995; STEMMER, 2008).

A furação profunda é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional, devido às condições críticas de usinagem em que é realizada. Tais condições envolvem a dificuldade da formação e do escoamento do cavaco, o comprimento em balanço da ferramenta, a qualidade da superfície e as tolerâncias geométricas e de forma do furo (CASTILHO, 2005; WOSNIAK, 2011).

O processo de furação profunda distingue-se da furação convencional pelos tipos de ferramentas empregadas e pela alimentação do fluido lubri-refrigerante, que é pressurizado diretamente sobre as regiões de corte. Em geral são utilizados óleos de base mineral integral, que devem ser reciclados e tratados para manter as características de lubricidade, resistindo às temperaturas do corte e resfriado a região mais afetada pela temperatura e esforços (STEMMER, 2008).

Os fluidos lubri-refrigerantes convencionais são benéficos à usinagem. Porém, sua aplicação e reutilização envolvem vários custos, com: tanques, bombas, máquinas especiais para pressurizar o sistema e tratar o óleo, constante reposição de fluido devido ao arraste na peça. O ambiente de trabalho se torna insalubre devido à exposição do operador ao produto químico. Surgem complicações ambientais que devem ser monitoradas e mapeadas, como: risco de incêndio devido às grandes quantidades armazenadas próximo à máquina e o descarte do óleo no fim da vida útil através de empresas especializadas (DHAR *et al.*, 2006).

O sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) funciona por meio de um jato de ar pressurizado que impacta em uma gota de óleo e a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e micro gotas de óleo, denominado *spray*. Esta mistura é conduzida por meio de tubulações até o furo de refrigeração interna da máquina, mandril-ferramenta. Quando esta mistura sai do furo de refrigeração interna da ferramenta ocorre uma expansão rápida que subtrai o calor da região de corte. Este fenômeno físico contribui com o resfriamento da ferramenta na região de corte. Em seguida este *spray* pressurizado empurra o cavaco através do canal helicoidal da broca até a saída do furo. A quantidade de óleo diluído no *spray* é a mínima necessária para lubrificar a região de corte, melhorando as propriedades tribológicas da região. Esta é a razão do emprego do termo “Mínima Quantidade de Lubrificante”. Qualquer quantidade acima do necessário para lubrificação da região significa desperdício de óleo. (BIELOMATIK, 2012; LUBRIX, 2012).

As ferramentas para utilização do sistema MQL são especiais e devem ser revestidas para melhorar as propriedades tribológicas na região entre o cavaco e superfície da região de corte da ferramenta. Outro fator relevante é a geometria da ferramenta com canais apropriados à extração do cavaco e uma afiação que resista aos esforços concentrados na aresta cortante (ZEILMANN *et al.*, 2009).

A escolha de parâmetros de corte adequados é de extrema importância para a aplicação do sistema MQL. Segundo Nouari *et al.* (2005), sem a utilização de fluidos, o controle sobre o processo deve ser maior e as estratégias e parâmetros utilizados devem ser adequados a esta condição. Para tal, o estudo é realizado seguindo o método de planejamento do experimento (DOE), a fim de se obter resultados estatisticamente coerentes com um número reduzido de testes.

Os aspectos econômicos, ambientais e relacionadas à saúde dos operadores, são motivadores para as empresas automotivas desenvolverem sistemas lubri-refrigerantes alternativos (ZEILMANN, 2003).

Neste contexto, o presente trabalho propõe o emprego do sistema MQL em operações de furação profunda, com a utilização de brocas helicoidais na usinagem de injetores a diesel na Robert Bosch Curitiba. Empresa com *know-how* no segmento de usinagem de componentes a diesel com alta complexidade. O acordo de cooperação técnica n° 10/2011 entre UTFPR e a empresa Robert Bosch, viabilizou os recursos necessários para a realização do estudo.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo principal deste trabalho consiste em: analisar o processo de furação com broca helicoidal, em profundidades de até 24 vezes o diâmetro da broca, no material SAE4144M forjado e temperado, utilizando sistema lubri-refrigerante MQL. São analisadas as geometrias e os revestimentos empregados nas brocas, e os parâmetros de corte velocidade de corte e avanço empregados na furação. Os resultados são analisados em função da forma dos cavacos e da temperatura da peça.

Os objetivos específicos deste trabalho atendem aos seguintes tópicos:

- a) Determinar uma geometria de broca adequada à furação com sistema MQL.
- b) Comparar as temperaturas envolvidas na furação com sistema lubri-refrigerante convencional a base de óleo mineral integral pressurizado com o sistema MQL.
- c) Determinar os parâmetros de velocidade de corte e avanço adequados para furação profunda com MQL, pela análise da forma dos cavacos e da temperatura da peça.
- d) Escolher o revestimento superficial adequado à furação profunda com MQL.
- e) Comparar a qualidade do furo com sistema lubri-refrigerante convencional e MQL

- f) Comparar o comportamento do desgaste das brocas, no processo de furação com fluido lubri-refrigerante convencional com relação ao sistema MQL, empregando os parâmetros adequados.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em seis capítulos. O primeiro capítulo é a introdução sobre o assunto proposto. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos conhecimentos necessários para uma boa compreensão do trabalho. O terceiro capítulo mostra o método experimental utilizado para abordar os objetivos específicos. O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões referentes aos assuntos abordados. No quinto capítulo contém as principais conclusões e apresentar sugestões para trabalhos futuros. E por último, as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo desta revisão bibliográfica é formar uma base teórica a fim de fundamentar o estudo, considerando os principais tópicos que exercem influência no estudo:

- Operação de furação: furação profunda, utilização de broca helicoidal, geometria da ferramenta, tipos de afiações, tipos de desgastes, material da ferramenta e revestimentos.
- Aspectos principais na furação: movimentos de corte, formação do cavaco, temperaturas envolvidas, fluídos de refrigeração, mecanismos de desgaste.
- Usinabilidade: formação e formas de cavacos.
- Sistemas MQL: tipos, características principais, aplicações e meios lubri-refrigerantes empregados.

2.1 PROCESSO FURAÇÃO

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo utilizadas na indústria tem pelo menos um furo, e somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto do processo de obtenção (fundição, forjamento, etc.). Em geral, as peças têm de ser furadas em cheio ou terão seus furos aumentados através do processo de furação (DINIZ *et al.*, 2006).

Furação é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo, geralmente cilíndrico, numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e, simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo da máquina, pode ser dividida nas categorias: furação em cheio, escareamento, furação, escalonada, furação de centros e trepanação (FERRARESI, 1995).

Neste processo devem-se levar em conta os seguintes fatores: diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma e de medidas e volumes de produção. As

operações de furação sempre se realizam em condições severas, onde a velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero no centro do furo até um máximo na periferia. O fluido de corte chega com dificuldade até a aresta de corte, onde é mais necessário, e deve atuar como refrigerante, lubrificante e meio de remoção dos cavacos (STEMMER, 2008).

2.1.1 Furação profunda

Estima-se que 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta. No entanto, um grande número de operações na indústria exige profundidades de furos maiores. Os processos de furação com relações de profundidade do furo e diâmetro de ferramentas maiores do que cinco ($L/D > 5$), são denominados de processos de furação profunda (DINIZ *et al.*, 2006; DIN 8589, 2003; TRENT, 2000). Este tipo de operação, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais (CASTILHO, 2005).

A furação profunda é uma operação de usinagem complexa, na qual a qualidade dos furos é fortemente influenciada pela alimentação do fluido de corte pressurizado diretamente para as regiões de corte. Isso ocorre porque o fluido de corte é o principal responsável pelo transporte de cavacos. Assim, a furação profunda exige condições especiais para ser executada (CASTILHO, 2005; STEMMER, 2008).

2.2 FURAÇÃO COM BROCAS HELICOIDAIS

Existem vários tipos de brocas disponíveis no mercado, cada qual para uma aplicação distinta. Dentre elas, a principal e mais utilizada é a broca helicoidal.

A participação da furação com brocas helicoidais no total dos processos de usinagem encontra-se na faixa de 20 a 25%. Atualmente, este tipo de broca é a ferramenta mais fabricada e a mais difundida (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Brocas helicoidais (Ex. DIN338), são as ferramentas mais utilizadas em operações de furação. As brocas helicoidais merecem atenção especial neste trabalho.

2.2.1 Brocas helicoidais

Os conceitos básicos e a nomenclatura das diversas partes das brocas helicoidais são definidos pela norma ABNT – TB-111 (DIN-412). A norma ABNT-EB-621 (DIN-1414) dá as diretrizes para a fabricação e aplicação de brocas helicoidais de aço rápido. Esta normalização é base para construção de brocas especiais de metal-duro, de grande utilização na indústria. A Figura 2.1 mostra vários componentes de uma broca helicoidal (STEMMER, 2008).

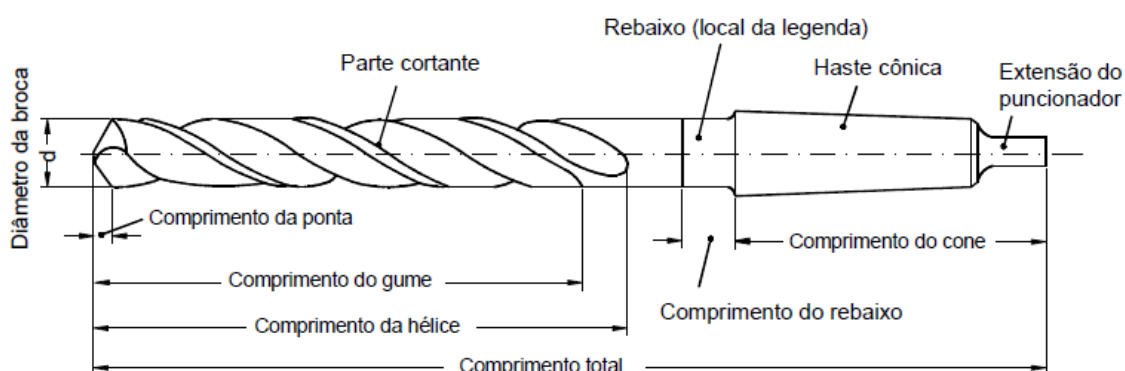


Figura 2.1 – Partes de uma broca helicoidal (STEMMER, 2008).

2.2.2 Partes de uma broca helicoidal

Brocas helicoidais possuem os ângulos denominados: “ α ” que é conhecido como ângulo de folga ou incidência, “ β ”, que é conhecido com ângulo de cunha, e “ γ ”, que é o ângulo de saída. Esta analogia é aplicada como conceito em qualquer ferramenta de corte (DINIZ *et al.*, 2006). A figura 2.2 mostra os ângulos mencionados.

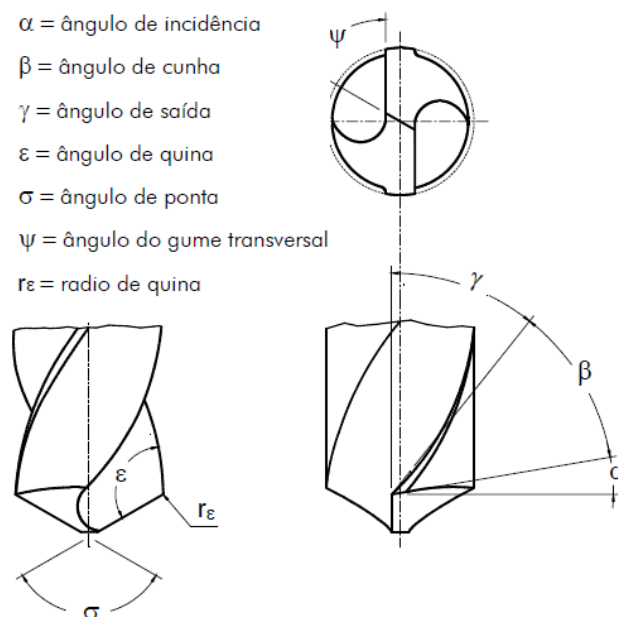


Figura 2. 2 – Ângulos de uma broca helicoidal (STEMMER, 2008).

Haste: Destina-se à fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm), geralmente usa-se haste cilíndrica e a fixação à máquina dá-se por intermédio de mandris. Em brocas de diâmetros maiores, prefere-se prender a broca em um cone Morse, por sua vez é preso à máquina o que possibilita melhor fixação (DINIZ *et al.*, 2006).

Diâmetro (D): É medido entre as guias da broca. Normalmente tem tolerância h8. O diâmetro da broca é medido entre as duas guias da broca (FERRARESI, 1995). O diâmetro da broca reduz-se da ponta para haste de 0,02 até 0,08 mm, sobre 100 mm de comprimento (SKF, 1988).

Núcleo – Parte central da broca de diâmetro igual a 0,16 D serve para conferir maior rigidez.

Guias – a superfície externa de uma broca helicoidal apresenta duas regiões (uma em cada aresta de corte) que tem diâmetro maior que o diâmetro da parede da broca. Tais regiões são denominadas guias. Tem duas funções básicas – a primeira como o próprio nome diz é a de guiar a broca dentro do furo, a segunda é de evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo diminuindo assim os esforços necessários para a furação (DINIZ *et al.*, 2006).

Canais helicoidais – São os dutos de saída da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais (tipo N) geralmente é de 30 graus. Para brocas destinadas à

usinagem de materiais com cavacos curtos (tipo H), geralmente usa-se 15 graus. E 40 graus para brocas (tipo W), destinadas a usinagem de materiais com cavacos longos e ou materiais moles (STEMMER, 2008). Figura 2.3.

O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e do comprimento do furo que se deseja usinar. Além dessas brocas normais existe uma infinidade de tipos de brocas helicoidais, destinadas a furos profundos, broca extra curta quando se deseja maior rigidez da broca, brocas escalonadas para usinagem de furos escalonados, brocas de calibração, para calibrar ou alargar furos fundidos pré-estampados ou pré-furados (DINIZ *et al.*, 2006).

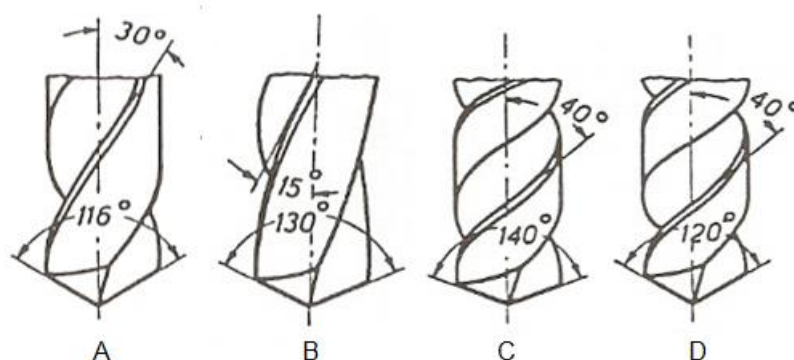


Figura 2. 3 - Ângulos de hélice e ponta

(A: Tipo N; B: Tipo H; C: Tipo W para Al; D: Tipo W para Cu), (STEMMER, 2008).

Aresta de corte – Numa broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mas existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é chamada de “aresta transversal de corte”.

Ângulo de incidência: O ângulo de incidência de uma broca é obtido por uma afiação adequada, devendo ter usualmente 12° a 15°. Verifica-se que o ângulo de incidência está correto, por uma observação transversal da broca, e especialmente, pelo ângulo do gume transversal com o gume principal que, para o ângulo de incidência de 12° a 15°, deve ser de 45° a 55°. A rigor, o ângulo de incidência de trabalho depende do avanço, em mm por rotação da broca, ou seja, do ângulo de hélice que cada ponto do gume descreve durante a usinagem (STEMMER, 2008).

2.2.3 Afições normalizadas para brocas helicoidais

As brocas helicoidais de aço rápido e inteiriças de metal-duro precisam ser afiadas ao fim de sua vida, para que possam continuar sendo utilizadas (DINIZ *et al.*, 2006). Este processo é realizado através de ferramentas abrasivas utilizadas na construção e manutenção dos gumes de corte (OLIVEIRA, 2008).

A afiação é um dos fatores responsáveis pela qualidade dos furos e uma geometria adequada de afiação reduz os esforços de corte no processo de furação. O tipo de afiação de broca mais conhecido e aplicado é a afiação em cone de revolução ou simplesmente afiação cônica. O princípio da afiação cônica consiste em posicionar a ponta da broca em frente ao rebolo observando a formação do ângulo de ponta. Nesta posição a broca gira em torno do seu eixo que está deslocado para formar o ângulo de folga. Este tipo de afiação apresenta como vantagem a facilidade de fabricação e o seu bom comportamento na furação da maioria dos materiais usinados (DINIZ *et al.*, 2006).

Muitas aplicações requerem afiações especiais a fim de melhorar o rendimento. A figura 2.4 demonstra um tipo de afiação especial denominada “Cruz” ou afiação cruzada (SKF, 1988). Nesta afiação é retificado um rebaixo nos flancos da broca apresentando-se como uma segunda superfície de incidência que reduz ou mesmo elimina a aresta transversal (ver figura 2.4). Representada na norma NBR-6176 como afiação especial (formato C) é aplicada em furos profundos e na usinagem de materiais duros. A força de avanço é significativamente reduzida e a remoção parcial ou completa da aresta transversal tem como efeito a melhor centralização da broca na furação (STEMMER, 2008).

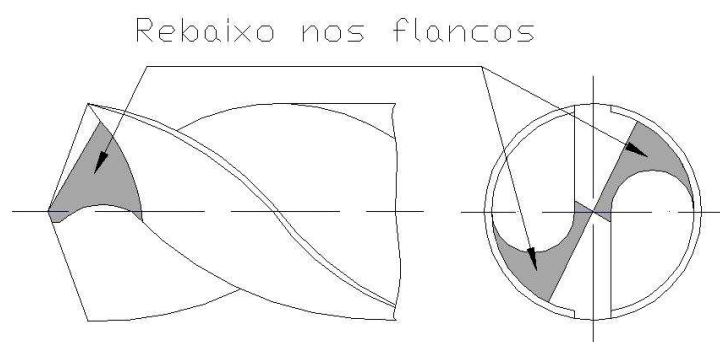


Figura 2. 4 – Afição cruzada da aresta transversal de corte (STEMMER, 2008).

A afiação ou redução da aresta transversal: identificada pela norma NBR-6176 da ABNT como afiação especial (formato A). Tem o objetivo de reduzir o esforço axial na ferramenta (força de avanço), através da redução da espessura do núcleo e por consequência a redução da aresta transversal de corte (FERRARESI, 1995). A figura 2.5 mostra que a aresta transversal é responsável por 60 a 70% do esforço axial da ferramenta (SKF,1988; ABNT, 1978).

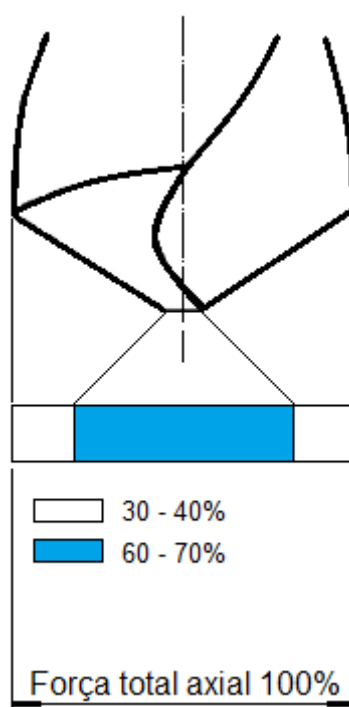


Figura 2. 5 – Força axial (SKF, 1988).

- Afiação em S: essa afiação apresenta a aresta transversal com ponta em espiral, ou “*spiral point drill*” em forma de “S”, que geram ângulos de saída menos negativos ao longo da aresta de corte quando comparada com a afiação cônica. Testes realizados com a aresta transversal em forma de “S” mostraram uma redução de até 30% na força de avanço, a diminuição nos erros geométricos, a redução de rebarbas na entrada e saída dos furos produzidos e uma menor geração de calor nas pontas da broca, resultando em uma maior vida útil para a broca (SANTOS, 2002).

2.2.4 Materiais de brocas

Para seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores deve ser ponderada, dentre os quais podem ser mencionados os seguintes. (DINIZ *et al.*, 2006).

- a) Material a ser usinado – Considerar dureza e características da peça.
- b) Processo de usinagem – Ferramentas envolvidas no processo.
- c) Condições da máquina – Considerar condições, gama de velocidades, folgas e potência.
- d) Forma e dimensões da ferramenta – Ferramentas soldadas ou ferramentas em aço rápido, ferramentas rotativas de pequeno diâmetro.
- e) Custo da ferramenta – Considerar custo-benefício.
- f) Condições de usinagem – Operações de acabamento, operações de desbaste.
- g) Condições da operação – Corte interrompido, sistemas de fixação

Aços rápidos são ligas com Tungstênio, Molibdênio, Cromo, Cobalto, Vanádio e Nióbio. Estas designações originam-se da época do seu desenvolvimento em 1905, por serem os materiais que suportavam as maiores velocidades de corte. As ferramentas que o empregam são tenazes e tem elevada dureza a quente quando comparado a aços carbono (DINIZ *et al.*, 2006).

O metal-duro é produto da metalurgia do pó composto de partículas duras sintetizadas. As partículas duras são de carbonetos de tungstênio, titânio, tântalo e nióbio com dimensões entre 1 a 10 μm . Como aglomerante é utilizado o cobalto ou níquel (DINIZ *et al.*, 2006; STEMMER, 2008; KÖNIG e KLOCKE, 1997).

A dureza e tenacidade de uma ferramenta de metal-duro esta diretamente relacionada à sua microestrutura que é classificada de acordo com o tamanho de grão descrito abaixo (DINIZ *et al.*, 2006).

- Fino - De 0,8 a 1,3 μm
- Submicrométrico - De 0,5 a 0,8 μm
- Ultrafino - De 0,2 a 0,5 μm
- Nanométricos – Menores que 0,2 μm

A redução do tamanho do grão exerce influência direta nas propriedades do metal duro, à medida que se diminui o tamanho do grão aumenta-se a dureza, a resistência ao desgaste e tenacidade do material (DINIZ *et al.*,2006).

A figura 2.6 mostra a influência do tamanho do grão no desgaste da ferramenta.

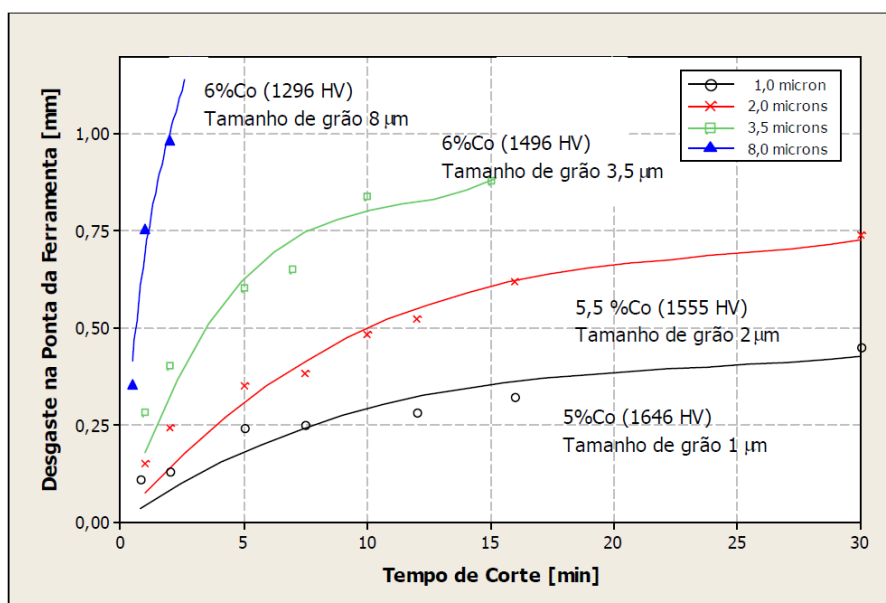


Figura 2.6 - Desgaste de flanco em ferramentas de metal-duro com diferentes tamanhos de grãos (TRENT e WRIGHT, 2000).

A norma ISO 513 de 2004 classificou o metal-duro em seis classes representadas pelas letras: P, M, K, N, S e H, conforme sua aplicação na usinagem e características de formação de cavaco. Dentro de cada classe há subdivisões designadas por números de 1 a 50, que representam as propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade. Os números menores identificam as classes mais resistentes ao desgaste, enquanto os maiores, as mais tenazes. (OLIVEIRA, 2008).

2.3 REVESTIMENTOS

Os revestimentos podem ser compostos por materiais altamente resistentes ao desgaste por abrasão, erosão e corrosão, são extremamente importantes na indústria metal mecânica. Nos últimos anos houve uma grande evolução nos

revestimentos de ferramentas, proporcionando um grande ganho na vida útil de ferramentas (LE BOURHIS *et al.*, 2009). A finalidade principal de um revestimento é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça (DINIZ *et al.*, 2006). Muitas vezes, é mais factível alterar as condições de contato da ferramenta do que alterar o mecanismo de desgaste da ferramenta. Por exemplo, quando a difusão é identificada como o principal mecanismo de desgaste da ferramenta, um revestimento que reduz o atrito de contato e a temperatura na interface pode ser usado, pois o mecanismo de difusão ocorre apenas em altas temperaturas de contato (WOSNIAK, 2011).

Os revestimentos são normalmente mais duros que a própria ferramenta, com o objetivo de melhorar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo e químico, além de ter uma boa aderência ao substrato.

Nas últimas décadas, ocorreram importantes avanços na área de revestimentos e alguns destes são (BUNSHAH, 2001).

- Ligas de nitretos de Ti, e.g., (Ti, Al) N;
- Carbonitretos de Ti, e.g., Ti (C, N);
- Revestimentos multicamada de diferentes nitretos;
- Revestimentos de nitreto de boro cúbico por métodos de PVD de plasma assistido e CVD para a usinagem de materiais ferrosos.

2.3.1 Técnicas de aplicação

O revestimento de ferramentas e usinagem pode ocorrer por meios químicos ou físicos e as variantes do processo são:

- **Processo CVD** (*Chemical Vapor Deposition*, Deposição Química de Vapor); a deposição química de vapor pode ser definida como a deposição de um elemento sólido sobre uma superfície aquecida, através de uma reação química em fase de vapor. Este tipo de revestimento é feito em temperaturas de 800°C a 1100°C. O CVD é parte da classe de processos de transferência de vapor do tipo atômico, a qual faz a deposição de materiais em forma de átomos, de moléculas, ou a combinação destes. Sua espessura varia de 2 a 20 µm e a cobertura é total (PIERSON, 1999; ABELE *et al.*, 2002).

- **Processo PVD** (*Physical Vapor Deposition*, Deposição física de Vapor). Para este estudo é o mais importante. O processamento PVD é feito sob alto vácuo a temperaturas que variam na ordem de 150° e 500 °C. O material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado pelo calor ou então bombardeado com íons (pulverização catódica). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono); formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante. As propriedades do revestimento (como dureza, estrutura, resistência química e resistência à temperatura, aderência) podem ser controladas (BALZERS, 2012).

2.3.2 Brocas revestidas com PVD TiAlN

O nitreto de titânio alumínio (TiAlN) é um revestimento de alto desempenho que se sobressai na usinagem de materiais abrasivos e de difícil usinagem, como o ferro fundido, ligas de alumínio, aços ferramenta e ligas de níquel. A ductilidade melhorada do ((Ti, Al) N) torna-o uma excelente escolha para usinagens de corte interrompido. O revestimento de nitreto de titânio e alumínio é muito utilizado atualmente na indústria de autopeças, devido sua grande versatilidade em vários tipos de processo de usinagens. Este revestimento é uma alternativa na redução da utilização de fluidos de corte na usinagem que busca a diminuição da poluição ambiental. O bom desempenho da usinagem a seco com ferramentas de corte revestidas com TiAlN deve-se ao fato de que esse revestimento mantém as propriedades de alta dureza e resistência à oxidação quando operando a altas temperaturas (SANTOS et al., 2007). A elevada resistência à oxidação pode ser devida à formação de uma camada externa de óxido, bem aderida e estável, formada pela difusão do alumínio e uma camada interna de óxido de titânio formada na interface revestimento/substrato. Essas duas camadas de óxido favorecem a

redução da taxa de oxidação pela inibição da difusão do oxigênio no substrato sob o revestimento (CHEN *et al.*, 2003).

Este revestimento possui grande versatilidade na usinagem de vários tipos de aços, um dado importante do revestimento a ser citado é a microdureza, medida por nanoindentação, que determinou a microdureza de $30 \pm 8,4$ GPa, porém com a elevação da temperatura em 500°C os revestimentos com AlCrN se mantem mais duros que o TiAlN (FOX RABINOVICH *et al.*, 2006).

2.3.3 Brocas revestidas com PVD AlCrN-based

Devido ao domínio do emprego de ferramentas revestidas com TiAlN, onde as melhorias acontecem pontualmente, iniciou-se o desenvolvimento de novas gerações de revestimentos baseados nos elementos Al-Cr-N. A grande vantagem desse sistema é a otimização da resistência ao desgaste abrasivo, da dureza a altas temperaturas e da resistência à oxidação, em comparação com os revestimentos tradicionais de TiAlN. As realizações de testes abrangentes demonstram que, tanto em altas velocidades de corte quanto em condições convencionais, há uma melhoria da eficiência (GÜHRING, 2009; MATTES, 2009). Com o emprego dos revestimentos compostos por AlCrN obtém-se uma maior resistência à abrasão, menor tendência à adesão, grande tenacidade e baixa rugosidade da sua superfície. Estas características possibilitam o aumento do rendimento nas operações de furação, sendo recomendado para furos profundos (BALZERS, 2012). No caso de um torneamento com corte interrompido e fresamento, o revestimento de AlCrN monocamada apresentou bons resultados com relação ao desgaste, comparado ao TiAlN (KALSS *et al.*, 2005).

É importante identificar e diferenciar a existência de alguns tipos de revestimento com nitreto de alumínio e cromo, como AlCrN que é um revestimento monocamada, formado por $Al_{0,4}Cr_{0,6}N$, com microdureza em torno de 30 GPa e espessura de até 4,0 μm . Comercialmente este revestimento é chamado pela Balzers como Balinit Alcrona®. O outro tipo de revestimento é AlCrN-based, multicamadas, com espessura de até 4,0 μm . Sua composição é de $Al_{0,6}Cr_{0,4}N / Ti_{0,86}Si_{0,14}N$, microdureza de 31 GPa, ambas medidas por nanoindentação.

Comercialmente este revestimento é denominado pela Balzers como Balinit Hélica® (LE BOURHIS *et al.*, 200; ENDRINO *et al.*, 2005).

As diferenças entre os tipos de revestimentos AlCrN e AlCrN-based são consideráveis. O estudo de Endrino *et al.* (2005), analisa o comportamento dos revestimentos no fresamento de aço inoxidável AISI 316, a diferença entre os tipos desses revestimentos foi de vinte metros linear a mais de usinagem com o emprego do revestimento multicamada, considerando o mesmo desgaste de flanco. O revestimento AlCrN-Based possui maior resistência à oxidação em temperaturas em torno de 1000°C, e alta resistência à propagação de trincas em temperaturas elevadas.

2.4 MOVIMENTOS RELATIVOS DA FURAÇÃO

Para prover o corte do material é necessário o movimento da peça ou ferramenta, sendo estas grandezas denominadas parâmetros de corte. São controlados em função de fatores como: acabamento da peça, dureza do material e vida útil da ferramenta. Fatores externos também são considerados: tipo e condições da máquina e métodos de fixação da ferramenta e da peça. As direções de movimentos e velocidades são definidas relativamente à peça. A figura 2.7, representa o gume de corte de uma broca atacando o material e seus respectivos ângulos, destaca-se: (STEMMER, 2008).

- a) Movimento de corte: corresponde ao movimento principal produzido manualmente ou pela máquina-ferramenta, com o objetivo de provocar um deslocamento relativo entre a ferramenta e a peça, forçando material da peça sobre a face da ferramenta.
- b) A direção do movimento de corte: é a direção instantânea do movimento de corte, no ponto selecionado de usinagem.
- c) Velocidade de corte (V_c): é a velocidade instantânea do movimento principal, do ponto selecionado do gume.
- d) Movimento de avanço: é o movimento produzido manualmente ou pela máquina-ferramenta, com o objetivo de provocar um deslocamento relativo adicional entre a peça e a ferramenta, o qual, quando somado ao movimento

de corte, leva a remoção repetida ou contínua de cavacos e a geração de uma superfície usinada com as características geométricas desejadas.

- e) Direção no movimento de avanço: é a direção instantânea do movimento de avanço do ponto selecionado do gume em relação à peça.
- f) Velocidade de avanço (V_f): é a velocidade instantânea do movimento de avanço do ponto selecionado do gume em relação à peça.
- g) Movimento resultante (efetivo) de corte: é a resultante dos movimentos de corte e avanço.
- h) Direção resultante (efetiva) de corte: é a direção instantânea do movimento resultante de corte, no ponto selecionado do gume, em relação à peça.
- i) Velocidade resultante (efetiva) de corte (V_e): é a velocidade instantânea do movimento resultante da ferramenta em relação à peça.
- j) Ângulo da direção de avanço (φ): é o ângulo entre as direções dos movimentos simultâneos de avanço e de corte.
- k) Ângulo da direção resultante (efetiva) de corte (η): é o ângulo entre a direção do movimento de corte e a direção resultante de corte.

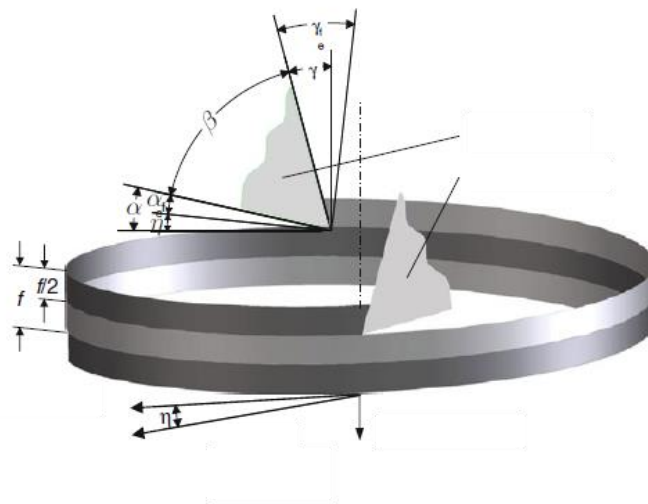


Figura 2. 7 - Movimentos da ferramenta e da peça (STEMMER, 2008; KÖNIG e KLOCKE, 2011).

2.4.1 Mecanismos de desgaste

A norma DIN 50320 preconiza sistemas tribológicos, um sistema é composto por quatro elementos básicos: corpo básico, contra-corpo, material intermediário e

meio externo. No caso da furação a broca é designada como corpo básico, devido o desgaste ser especialmente importante. O material intermediário é o elemento que se encontra entre o corpo básico e contra-corpo e pode ter a função redutora de desgaste, no caso da furação é o meio lubri-refrigerante. A norma DIN 50320 descreve quatro principais mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, destruição da superfície e reações triboquímicas. Em um processo de usinagem onde ocorre atrito entre corpos sólidos o desgaste predominante é o desgaste por deslizamento composto pelos quatro mecanismos de desgaste.

Relativo ao desgaste outro modo de falha considerável são as solicitações mecânicas compostas por fadiga, fratura, fluxo plástico, sobrecarga progressiva. A figura 2.8, apresenta a contribuição da componente no desgaste total em função da temperatura ou velocidade de corte (BUNSHAH, 2001).

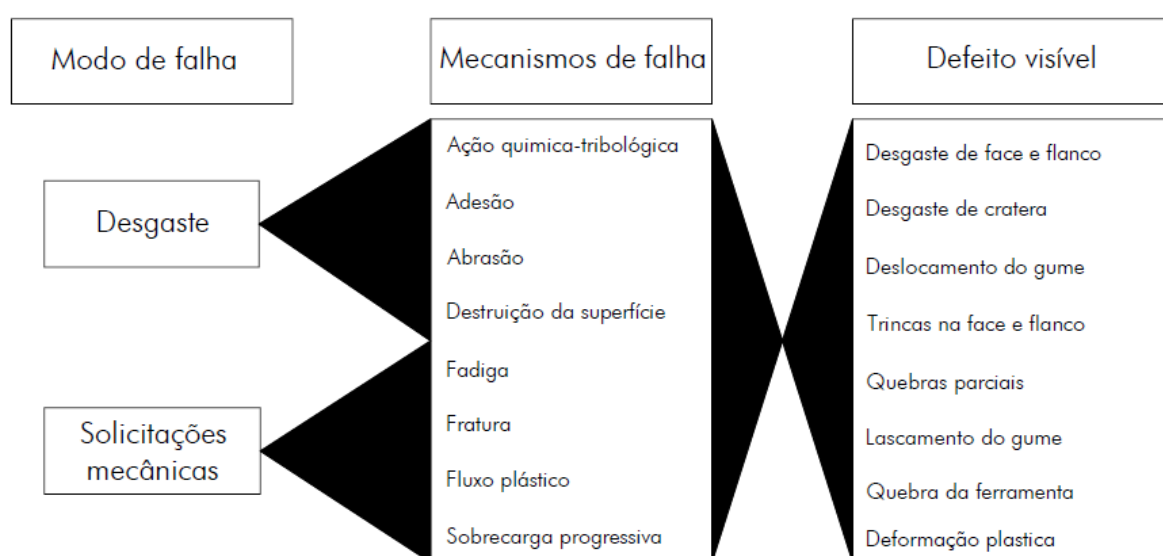


Figura 2. 8 – Diferentes componentes no desgaste da ferramenta (BUNSHAH, 2001).

As principais causas influentes sobre o desgaste da ferramenta estão relacionadas à peça. As danificações do gume são devido às solicitações mecânicas e fadiga térmica excessiva, abrasão, adesão, difusão e oxidação, (Figura 2.9) (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

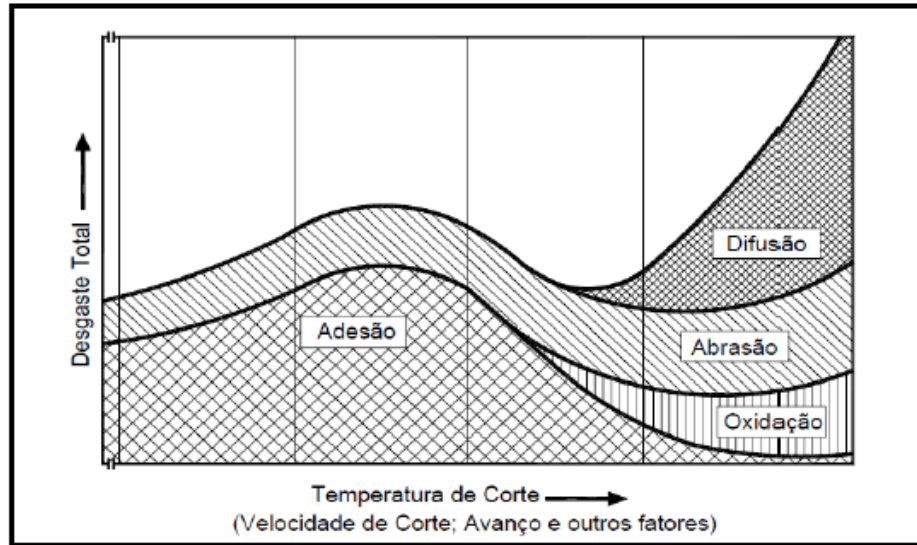


Figura 2. 9 – Causas de desgaste na usinagem peça (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

- a) *Solicitações térmicas e mecânicas*: são excessivas durante a entrada da ferramenta na peça, o gume atinge rapidamente elevadas temperaturas. Após a saída, ocorre o resfriamento. A diferença entre a mais alta e a mais baixa temperatura depende do material, das solicitações de corte e da relação entre o material e a temperatura do ambiente (MATTES, 2009).
- b) *Abrasão*: é uma das principais causas de desgaste das ferramentas, gera desgaste de cratera e frontal, que é o mais importante. A abrasão ocorre devido ao atrito da superfície de folga da ferramenta com o material da peça (MATTES, 2009), (DINIZ *et al.*,2006).
- c) *Adesão*: está presente na formação da aresta postiça, mas pode ocorrer o desgaste por aderência mesmo sem a formação da mesma. Em geral, na área de saída de cavacos, o corte interrompido, a profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez, promovem o fluxo irregular de cavaco, causando microcaldeamentos do cavaco à superfície de saída da ferramenta (figura 2.10). Devido à solicitação intermitente o material aderido sofre a fadiga removendo parte da superfície de contato da ferramenta (WOSNIAK, 2011).

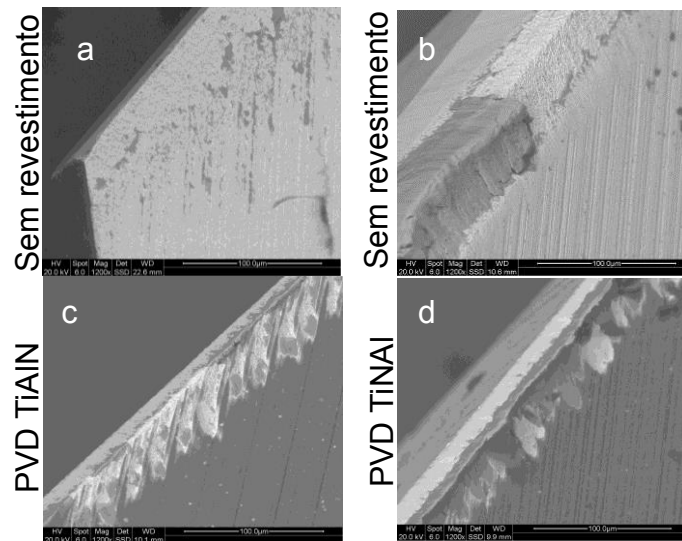


Figura 2.10 – Desgaste por adesão em broca canhão Ø1,43 mm.

Fotografia MEV da face de corte e de flanco após a furação em AISI 4150 (WOSNIAK, 2011).

d) *Difusão*: consiste na transferência de átomos de um material para o outro, o que causa variações nas propriedades na camada superficial da ferramenta. Estas reações químicas provocam a formação de carbonetos menos resistentes à abrasão. Difusão, o desgaste de difusão ocorre a temperaturas elevadas quando a ferramenta e o material possuem elementos com afinidade química e tempo de contato. A difusão é responsável pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte, pois na superfície de saída da ferramenta é gerada uma condição necessária para a difusão dos materiais, que vem a ser, altas temperaturas (devido a altas velocidades e a zona de aderência) e tempo de contato cavaco-ferramenta (DINIZ *et al.*,2006).

e) *Oxidação*: altas temperaturas e a presença de ar e água geram oxidação na maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto formam um filme de oxido poroso na superfície da ferramenta que é facilmente retirado pelo atrito. O desgaste por oxidação se forma nas extremidades do cavaco ferramenta devido o excesso de ar nesta região (DINIZ *et al.*,2006). A ação destrutiva da oxidação ocorre devido à diferença de volumes dos óxidos formados, criando saliências nas superfícies da ferramenta, levando facilmente ao lascamento e quebra da quina da mesma (POULACHON *et al.*, 2004).

2.4.2 Desgaste em uma broca helicoidal

Diversos são os tipos de desgaste e avarias que acontecem nas ferramentas de usinagem. Desgaste é a perda microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte (DINIZ *et al.*,2006).

- a) Desgaste frontal ou de flanco (VB, VBmax) – Ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça (DINIZ *et al.*,2006). A figura 2.11 mostra em detalhe o desgaste médio VB e o máximo VBmax nos flancos de uma broca. A medição pode ser realizada com microscópio de ferramentaria com aumento de 10 a 50 vezes. Mesmo quando houver deformação plástica ou desgaste do gume, ou seja, retração do mesmo, a marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original do gume considerado, sendo necessária a utilização de uma referência (CASTILHO, 2005).

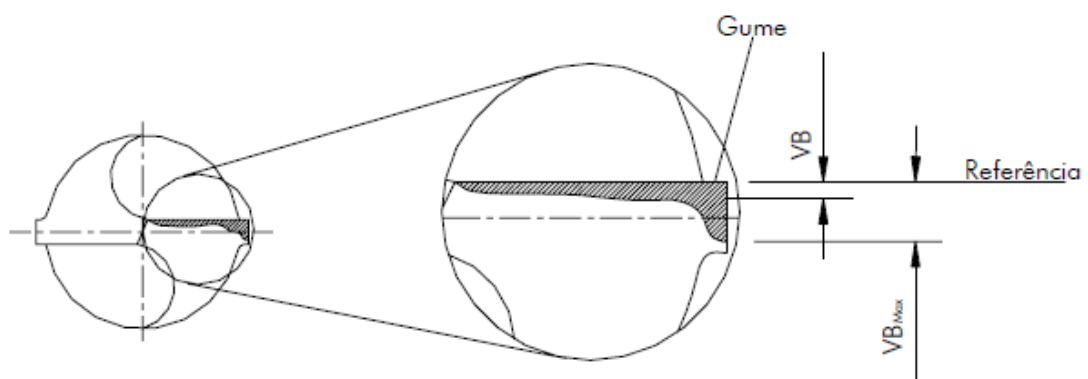


Figura 2. 11 – Desgaste de flanco (SCHROETER *et al.*, 1999)

- b) Desgaste de cratera (KM, KT, KB) – onde KT (figura 2.12) é a profundidade da cratera, KB é a largura da cratera e KM que é o centro da cratera até a aresta de corte. Este tipo de desgaste ocorre na superfície de saída da ferramenta causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco (DINIZ *et al.*,2006).

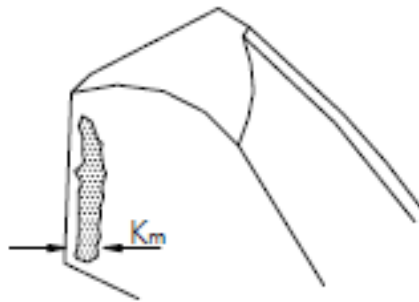


Figura 2. 12 – Desgaste de cratera (KANAI, 1978).

- c) Desgaste do gume transversal de corte (C_t , C_m) - Uma das zonas mais críticas da broca é a zona do gume transversal, onde ocorrem danos a partir do primeiro contato com o material a usinar. As grandes solicitações mecânicas, ao mesmo tempo em que as velocidades de corte nesse ponto tendem a zero, levam a um desgaste progressivo pelo esmagamento do material. Estes esforços podem causar lascamento e consequente destruição do gume transversal, podendo provocar caldeamento da ferramenta e quebra da mesma (CASTILHO, 2005), (figura 2.13).

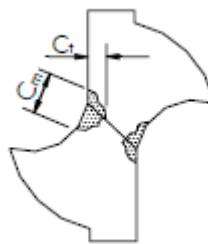


Figura 2. 13 – Desgaste do gume transversal (KANAI, 1978).

- d) Desgaste de quina (W) - Nas quinas predominam as solicitações térmicas devidas à maior velocidade de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída, assim como o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo (figura 2.14) (SCHROETER *et al.*, 1999).

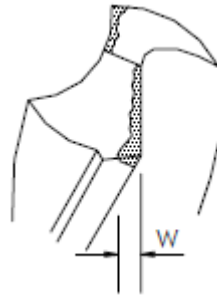


Figura 2. 14 – Desgaste de quina (KANAI, 1978).

e) Desgaste de guia (M_w) – É gerado pelo atrito da guia com a parede do furo. (Figura 2.15).

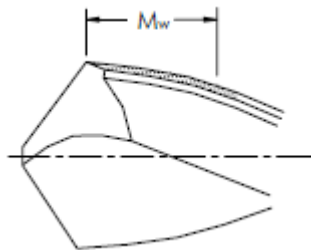


Figura 2. 15 – Desgaste de guia M_w (KANAI, 1978).

Além dos desgastes diversos outras ocorrências aparecem na ferramenta após o uso, são denominadas avarias (DINIZ *et al.*,2006).

a) O lascamento da aresta principal e aresta transversal de corte (P_t , P_m) – É o tipo de avaria onde ocorre à retirada de uma grande partícula de uma só vez (DINIZ *et al.*,2006). Onde P_t é altura e P_m é a largura do lascamento (CASTILHO, 2005), (Figura 2.16).

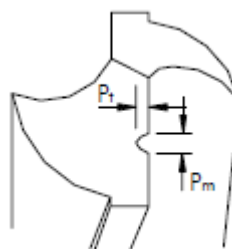


Figura 2. 16 – Lascamento da aresta (KANAI, 1978).

- b) Trincas ou fissuras – Avaria normalmente causada pela variação da temperatura ou de esforços mecânicos. Acontecem em cortes interrompidos e com refrigeração irregular (DINIZ *et al.*,2006). (Figura 2.17).

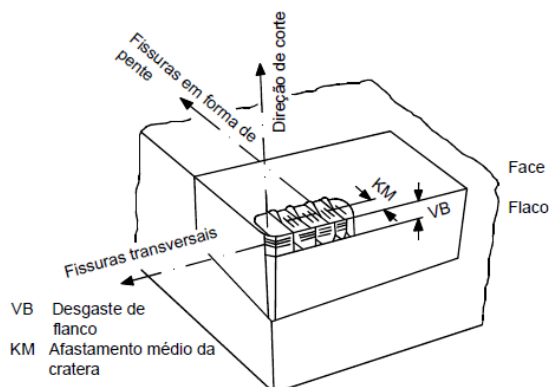


Figura 2. 17 – Trincas térmicas (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

- c) Quebra da ferramenta – Todos os desgastes em excesso descritos podem gerar quebra da ferramenta (DINIZ *et al.*,2006).

2.4.3 Critérios para fim de vida

Define-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (DINIZ *et al.*,2006).

À medida que a ferramenta vai se desgastando, observam-se variações no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície se alteram e o acabamento da superfície piora. Em ferramentas de metal-duro o aumento das forças de corte no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume (figura 2.18). A utilização de uma ferramenta até este ponto é desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer um gume adequado (STEMMER, 2008).

Para a determinação da vida da ferramenta, na prática são empregados testes de longa duração, com as velocidades de corte usuais. Em máquinas ferramenta, isto exige um elevado tempo de ensaio e grandes quantidades de material a serem usinado (WOSNIAK, 2011).

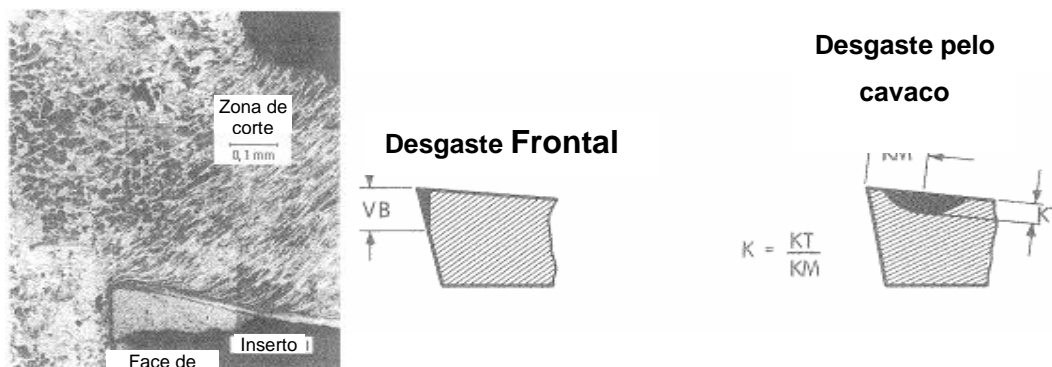


Figura 2. 18 – Formação do cavaco e medidas de desgaste, (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

Os fatores que determinam a fixação de um valor determinado de desgaste para o fim de vida são (DINIZ *et al.*,2006; STEMMER, 2008):

- a) Desgastes com proporções muito elevados com risco de quebra da ferramenta, aumento da temperatura de corte, aumento da força de usinagem, formação de rebarbas e ocorrência de vibrações.
- b) Desgaste de superfície de folga – Resulta na perda de tolerâncias e acabamento superficial.

2.5 USINABILIDADE DOS AÇOS

O termo usinabilidade, compreende todas as propriedades de um material que tem influência sobre o processo de usinagem. Com o termo usinabilidade são descritas todas as dificuldades que um material apresenta na sua usinagem (STAHL, 1952).

A usinabilidade é uma propriedade que depende das características do material usinado e das condições de manutenção do gume da ferramenta. A manutenção do gume é definida como sendo a propriedade do gume de uma ferramenta de resistir aos esforços na separação dos cavacos de um material da

peça, por um determinado tempo. A usinabilidade de um material sempre é vista no contexto do processo de fabricação, o material da ferramenta e as condições de corte. Para mensurar a usinabilidade geralmente são usados quatro critérios (KÖNIG e KLOCKE, 1997):

- Vida da ferramenta
- Força de usinagem,
- Qualidade superficial da peça,
- Formação de cavacos, como forma e tamanho dos cavacos.

No julgamento e no teste da usinabilidade, são empregados vários critérios que necessariamente não interdependem um do outro e sim devem ser determinado um de cada vez.

2.5.1 Fatores influentes sobre a usinabilidade dos aços

Os fatores de grande influência na usinabilidade dos aços são: a composição química, microestrutura e propriedades mecânicas. Portanto é importante considerar o teor de carbono e os elementos de liga que compõe a composição química do aço. E o tipo de tratamento térmico que define a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço.

Aços com teores de carbono entre 0,4 e 0,8% são considerados de boa usinabilidade somente com a relação à formação dos cavacos. Para reduzir o desgaste em função das altas solicitações térmicas e mecânicas deve-se reduzir a velocidade de corte ou utilizar fluidos refrigerantes.

Associado ao teor de carbono tem os elementos de liga que influenciam na usinabilidade através da modificação da microestrutura. Dentre vários se destacam os materiais (KÖNIG e KLOCKE, 1997):

- Manganês: melhora a temperabilidade e aumenta a dureza do material. Em aços de médio a alto teor de carbono a usinabilidade é influenciada negativamente devido o desgaste da ferramenta.

- Cromo, molibdênio: melhoram a temperabilidade e influenciam na usinabilidade dos aços endurecidos devido às alterações cristalinas. Em aços com maiores teores de carbono ou com elementos de liga formam carbonetos especiais e mistos que podem piorar a usinabilidade.
- Silício: aumenta a resistência da ferrita nos aços. Com o oxigênio e na ausência de elementos químicos desoxidantes, como por exemplo, o alumínio, forma inclusões duras de óxido de silício (silicato). Deste fato pode resultar em um aumento de desgaste da ferramenta.
- Fósforo: pode provocar a fragilização da ferrita. Em teores de até 0,1% atua positivamente na usinagem.
- Enxofre: a ação positiva do sulfeto de manganês sobre a usinabilidade é devida a formação de cavacos curtos e quebradiços, melhora a qualidade superficial e da menor tendência à formação de gume postiço.
- Níquel: aumenta a tenacidade do aço em baixas temperaturas. Isto leva geralmente a uma piora da usinabilidade.

Um fator de grande importância na usinabilidade dos aços é o tratamento térmico, que exerce influência direta nas propriedades mecânicas do material. A microestrutura martensítica resultante da têmpera eleva a dureza do material, proporcionando elevada pressão de contato no gume da ferramenta durante a usinagem, acelerando o desgaste. A usinagem em aços temperados e revenidos geralmente são executadas com velocidades de corte relativamente baixas e com avanços reduzidos (KÖNIG e KLOCKE, 1997).

2.5.2 Aço SAE 4144M

Os aços são ligas ferro carbono com propriedades mecânicas sensíveis ao teor de carbono. Em geral são classificados em função do teor de carbono que é normalmente inferior a 1%. A SAE (*Society of Automotive Engineers*) é um dos responsáveis pela classificação dos aços. Os dois dígitos iniciais (por exemplo, 41XX) representam o aço liga, os dois últimos (por exemplo, XX44) significam a porcentagem em peso de carbono multiplicada por 100, (CALLISTER, 2000). No caso do SAE 4144M os dois primeiros dígitos significam um aço baixa liga ao cromo

e molibdênio. E os dois últimos dígitos significam que este aço tem médio teor de carbono de 0,44%. A letra “M” significa que é um aço modificado, neste caso há uma especificação para o controle das quantidades de liga, para garantir a eficiência das solicitações nas propriedades mecânicas do aço.

O aço SAE 4144M é um aço fabricado exclusivamente para desenvolvimento de componentes automobilísticos. Neste estudo o material em estado tratado apresenta microestrutura martensítica revenida com dureza superficial de 39 HRC. Ocasionalmente durante a sua furação cavacos em forma de fita com elevada resistência à quebra. Sua composição química e propriedades mecânicas são muito parecidas com a do aço comercial SAE 4140. A tabela 2.1 apresenta a comparação da composição química entre os aços em questão. (MARMENTINI, 2007).

Tabela 2.1: Comparação entre o material SAE 4144M e 4140. (VILARES S.A.1998)

Material	Qtde	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo
SAE 4144M	Min	0,42	0,90	-	0,01	0,20	-	1,15	-	0,25
	Máx	0,46	1,00	0,025	0,02	0,30	0,35	1,30	0,25	0,35
SAE 4140 *	Min	0,37	0,65	-	-	0,15	-	0,75	-	0,15
	Máx	0,44	1,10	0,035	0,04	0,30	-	1,20	-	0,30

2.5.3 Forma dos cavacos

A forma e o tamanho do cavaco tem grande importância em processos que apresentam um volume de espaço reduzido para a remoção do cavaco, como na furação, onde se produz um grande volume de cavaco havendo também o fator de recalque do cavaco. As principais influências sobre a formação de cavaco são as condições de corte e a geometria da ferramenta. A quebra adequada do cavaco pode ser obtida pela diminuição da deformabilidade do material da peça ou pelo aumento da deformação do cavaco. Como a capacidade de deformação do material é dependente da temperatura na região do corte, uma redução da velocidade de corte ou a refrigeração da região de corte, tornam os cavacos mais quebradiços. A ferramenta exerce grande influência com deformação por uma curvatura maior do

cavaco. Para esta finalidade, ou reduz-se o ângulo de saída ou emprega-se um quebra cavaco (WOSNIAK, 2011).

Segundo Ferraresi (1995), o calor deve ser transferido em torno de 71% para o cavaco 26% para a peça e 2% para a ferramenta. Com esta distribuição, a dinâmica do corte é apropriada. Lembrando que este fator é analisado em conjunto com a formação do cavaco. Para furações profundas a análise do cavaco é fundamental devido à dificuldade de extração pelo canal da ferramenta. Em caso de má formação do cavaco ocorre à obstrução dos canais pressionando a ferramenta-cavaco-peça, danificando a parede do furo e quebrando a ferramenta.

Na furação profunda o tamanho e a forma do cavaco representam em primeiro lugar a condição do processo, pois a remoção do cavaco é complexa devido à relação profundidade-diâmetro ser alta (WOSNIAK, 2007). Para estes casos a forma ideal do cavaco é de lascas. Através da forma e tamanho do cavaco também é possível encontrar uma combinação ótima dos parâmetros de corte.

Segundo Ferraresi (1995), o coeficiente volumétrico de cavaco (ω) é a relação entre o volume ocupado pelo cavaco (V_e) e o volume correspondente a sua massa (V_p), vide equação 1.

$$\omega = \frac{V_e}{V_p} = \frac{V_e}{\frac{m}{\rho}} = \frac{\rho \times V_e}{m \times 1000}$$

(1)

V_e = volume ocupado pelo cavaco (cm^3);

V_p = volume específico do material do cavaco (cm^3)

m = massa do cavaco (kg);

ρ = peso específico do material do cavaco (g/cm^3).

Esse coeficiente resulta num valor que está relacionado com a forma do cavaco conforme a Figura 2.19.

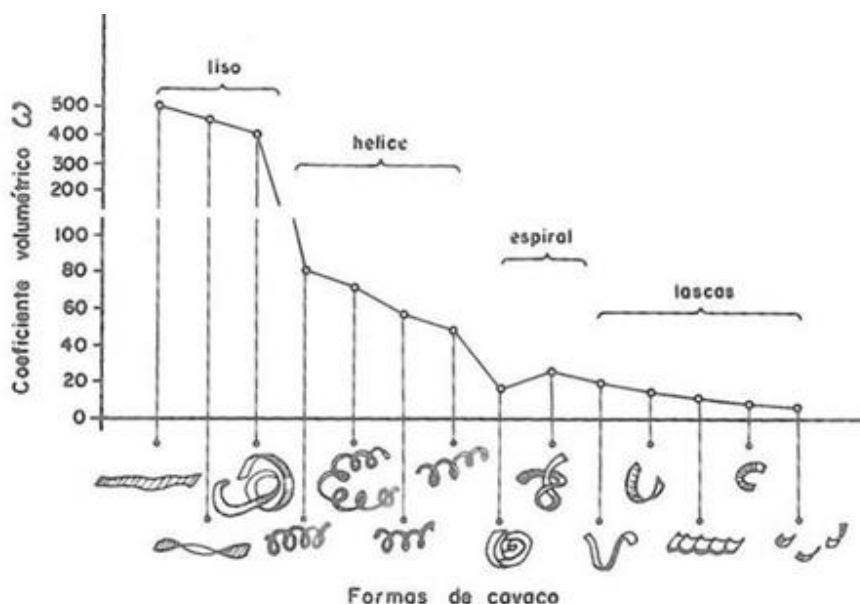


Figura 2. 19 – Relação do coeficiente volumétrico com a forma do cavaco (FERRARESI, 1995).

2.6 Usinagem com MQL

O propósito do MQL é aplicar um fluido lubri-refrigerante em mínimas quantidades na região de corte da ferramenta, provocando a redução de atrito força e temperatura resultando em bom acabamento superficial e o aumento da vida da ferramenta (ANSHU *et al.*, 2009).

Os fluidos lubri-refrigerantes convencionais desempenham diversas funções no processo produtivo, e sua utilização resulta na maioria das vezes em maior vida da ferramenta e em melhor qualidade de peça usinada. Porém, o uso do fluido lubri-refrigerante traz consigo alguns inconvenientes, tais como: dificuldade e custo da reciclagem do fluido e dos cavacos molhados por ele, poluição ambiental e doenças de pele e pulmão nos operadores das máquinas. Em alguns processos, a usinagem completamente sem fluido de corte não é possível ou econômica. Então, nestes casos, uma alternativa ao corte a seco é o corte com Mínima Quantidade de Fluido – MQL. Este nome é dado ao procedimento de se pulverizar uma quantidade mínima de óleo (menos de 60 ml/h) através de um fluxo de ar comprimido. Esta mistura ar-óleo, apesar de não possuir alta capacidade de refrigeração do processo, muitas vezes tem alta capacidade de lubrificação da região de corte. Com um fluxo de 10

ml/h de óleo a uma pressão de 4,5 bar de ar, o desgaste da ferramenta utilizando-se MQL não foi maior que quando da utilizou-se de óleo solúvel e os parâmetros de qualidade da peça, como tolerância dimensional e de forma (circularidade do furo) e rugosidade, também não se deterioraram com a introdução da MQL. O uso de fluido de corte com ação preponderantemente refrigerante não é apropriado, já que diminui a vida da ferramenta devido à variação de temperatura, provocando trincas de origem térmica. No fresamento o óleo com características lubrificantes toca a ferramenta enquanto a mesma encontra-se fora da peça e é levado para as interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça pela própria ferramenta, sendo uma operação em que o uso da MQL é bastante apropriado, já que o ar tem baixa capacidade de refrigeração e a pequena quantidade de óleo presente é capaz de proporcionar um bom efeito lubrificante (DINIZ *et al.*,2006; LAWAL *et al.*, 2012).

O uso da MQL com aplicação externa a ferramenta na furação de ferro fundido apresentou bom resultado, com a redução de desgaste da aresta de corte da broca relativamente à usinagem a seco, porém com desgaste de aresta maior do que com o uso de fluido lubri-refrigerante em abundância. O desgaste é explicado devido o fato que no início do furo o fluido lubri-refrigerante externo atinge a região de corte, porém em alguns milímetros de profundidade o fluido lubri-refrigerante com MQL não atinge mais a região crítica da ferramenta (MEENA *et al.*, 2007).

Aoyama *et al.* (2004), realizou um comparativo entre tipos de sistemas lubri-refrigerantes MQL, em abundância e a seco, furando aço S55C, utilizando broca de metal-duro de diâmetro de 5mm, com refrigeração interna, profundidade de 15mm, parâmetros de corte de 200m/min e 0,1mm por rotação de avanço. Resultou em quebra da ferramenta com 264 peças a seco, com fluido em abundância furou 1185 peças usinadas e com MQL fez 1081 furos. Com relação ao desgaste na quantidade usinada de 900 furos a ferramenta com MQL apresentou 0,016mm e a ferramenta com fluido em abundância apresenta 0.05mm, aproximadamente 3 vezes maior do que com fluido em abundancia. Observou-se que com 1000 peças fabricadas a ferramenta que utilizou sistema MQL apresentou um salto em desgaste para 0,04mm e com continuo crescimento até o fim da vida útil.

2.6.1 Princípio de funcionamento

O sistema MQL funciona por meio de um jato de ar pressurizado que impacta em uma gota de óleo e a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e micro gotas de óleo, denominado *spray*. Esta mistura é conduzida por meio de tubulações até o furo de refrigeração interna da máquina, ao mandril-ferramenta, ou ao bico do aparelho. Quando esta mistura sai do furo de refrigeração interna da ferramenta ocorre uma expansão rápida que subtrai o calor da região de corte. Princípio semelhante à válvula evaporadora, que consiste em orifício onde ocorre a expansão de um gás pressurizado. Este fenômeno físico contribui para o resfriamento da ferramenta na região de corte. Em seguida este *spray* pressurizado empurra o cavaco através do canal helicoidal da broca até a saída do furo (LAWAL *et al.*, 2012; WEINERT *et al.*, 2004; ANSHU *et al.*, 2009).

O óleo é diluído no *spray* apenas na quantidade mínima necessária para lubrificar a região de corte, melhorando as propriedades tribológicas da região. Esta é a razão do termo “Mínima Quantidade de Lubrificante”. Qualquer quantidade acima do necessário para lubrificação da região é desperdício de óleo (LUBRIX, 2012).

2.6.2 Tipos de sistemas MQL

Basicamente existem dois tipos de sistemas MQL. O sistema com um canal e sistema de dois canais, conforme Figura 2.20. O sistema de dois canais funciona com um canal que conduz o óleo até a entrada dos furos de refrigeração da ferramenta e outro canal que leva o ar pressurizado até esta região. Neste ponto ocorre a vaporização do óleo formando o *spray*, que em seguida sai na região de corte. Este modelo evita perdas de fluidos refrigerantes por centrifugação no fuso da máquina e perdas na tubulação. Porém, a formação *spray* não é precisamente controlada e a quantidade de lubrificante não é constante na região de corte. Entre os intervalos do gotejamento ocorre uma redução da quantidade de lubrificante. Outra característica importante é que as peças são desenvolvidas especificamente conforme a máquina (BIEOLOMATIK, 2011).

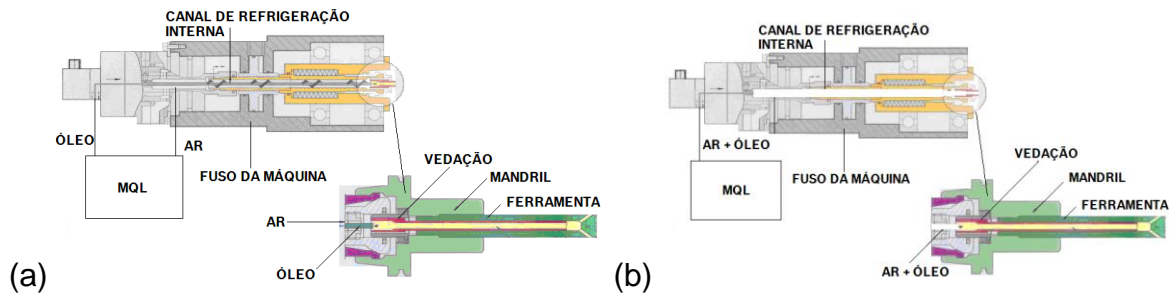


Figura 2. 20 – Sistemas MQL. (a) Sistema MQL 2 canais. (b) Sistema MQL 1 canal. (BIELOMATIK, 2011; LUBRIX, 2012)

No sistema de um canal a formação do *spray* é feita num aparelho simples que se adapta a vários tipos de máquinas. Desta forma obtêm-se uma nevoa controlada e precisa. Segundo a empresa Lubrix (2012), é preciso cuidado com a tubulação evitando cotovelos e outras conexões, para evitar a separação do óleo e do ar comprimido (GÜHRING, 2009).

Na forma de aplicação dos sistemas a mistura pode ser aplicada através do fuso da máquina passando por canais internos até a saída na região de corte ou o aparelho pode ser portátil com uma tubulação que fornece a mistura na região externa da ferramenta, a escolha deve ser feita em função da eficiência na operação (LAWAL *et al.*, 2012), (Figura 2.21).

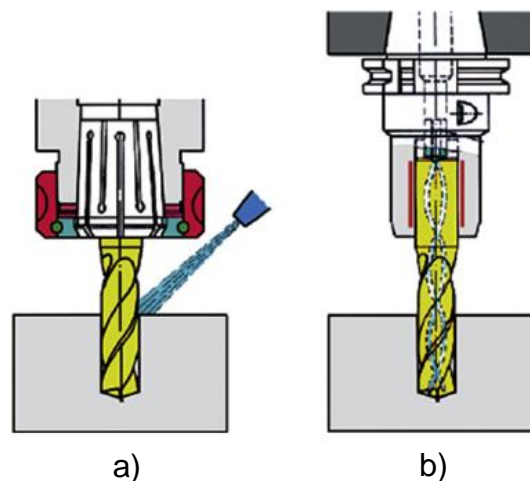


Figura 2. 21 – Tipos de aplicação, a) fluido lubri-refrigerante com bico externo, b) Fluido lubri-refrigerante interno pelo centro do fuso da máquina. (LAWAL *et al.*, 2012).

2.6.3 Características da usinagem MQL

O calor gerado durante a usinagem com MQL é maior em relação à usinagem com jorro de óleo, e menor do que na usinagem a seco (WEINERT *et al.*, 2004). Em temperatura mais elevada, os mecanismos de desgaste, difusão e adesão evoluem aceleradamente, o que leva a vidas úteis mais curtas. Além disso, o aumento de calor pode levar a dilatações térmicas na peça, que se não forem controladas poderão por em risco as estratégias apropriadas de usinagem de dimensões com tolerâncias apertadas. Além disto, na usinagem de aço podem ocorrer endurecimentos na parede do furo, fazendo com que operações posteriores como roscamento ou alargamento, sejam dificultados. A temperatura originada na zona de cisalhamento entra no processo diretamente como calor de usinagem. Um cavaco mais curto transfere, por seu comprimento de contato mais curto sobre a superfície de saída, um menor atrito de calor sobre a ferramenta, o que contribui para melhores condições de temperatura. Isto se deve principalmente a geometria positiva e a melhor quebra de cavacos daí advinda, resultando em cavacos mais curtos. Em função de sua melhor relação superfície-volume, estes cavacos mais curtos são transportados mais facilmente para fora do furo, e tendem a obstruir menos o canal de saída. Em virtude de sua melhor remoção de cavacos e da comparativamente menor temperatura de processo, as ferramentas helicoidais contribuem consideravelmente para o aumento da segurança de processos na usinagem a seco e com MQL. O fluxo de ar com pequena quantidade de óleo pode contribuir notavelmente para a refrigeração no processo de usinagem, deduzindo-se que as gotas de óleo misturadas no fluxo de ar causaram uma sensível diminuição do atrito. Isto comprova também que o óleo favorece o transporte de cavacos sobre a superfície do canal devido à redução do atrito (GÜHRING, 2009).

2.6.4 Requisitos em brocas para MQL

A usinagem a seco e a mínima quantidade de lubrificação MQL são tecnologias importantes e atuais para a redução dos custos de usinagem. Já que na usinagem a seco e a MQL a troca térmica é reduzida relativamente ao jorro de óleo.

Para atenuar os efeitos de temperatura devem-se projetar ferramentas especiais e os processos devem ser definidos a fim de reduzir a influência da temperatura. (GÜHRING, 2009).

- Parâmetros de corte - Devem-se controlar variáveis para reduzir a geração de calor no processo de usinagem.
- Geometria da ferramenta – Brocas devem ser projetadas de modo que o atrito seja minimizado com largura e comprimentos de guias reduzidas a fim de minimizar o contato da parede do furo com a broca. Os canais helicoidais das brocas devem ser projetados de modo que o cavaco escoe rapidamente e proporcione ângulos de corte positivos que reduzam a força e a temperatura de corte. A geometria dos canais tem influência direta sobre a afiação de ponta devem proporcionar a quebra do cavaco.
- Revestimento - A transferência de calor entre o cavaco e a ferramenta deve ser reduzida utilizando revestimentos com camadas duras, termicamente isolantes e superfícies polidas de ferramentas para a redução do atrito entre o cavaco e a superfície do canal de saída.
- Com ferramentas refrigeradas internamente, utilizando o sistema MQL, o fluxo de ar transporta uma considerável parte do calor resultante e também melhora o transporte dos cavacos para fora do furo (ZEILMANN *et al.*, 2006).

2.6.5 Requisitos na instalação MQL

Devido aplicação de pequenas quantidades do fluido de refrigeração, algumas considerações de projeto são importantes para a instalação:

- Projeto de uma superfície de transferência estanque entre a extremidade da haste da broca e o parafuso de regulagem, para evitar a fuga de refrigeração na área de fixação do suporte ou no interior do suporte HSK. (Evitar aderências de cavacos que possam levar a batimentos na próxima troca de ferramentas).
- Evitar espaços mortos e conexões que possam levar a acúmulos de refrigeração, com o sistema de um canal os espaços mortos faz com que a mistura da refrigeração levada pelo turbilhonamento se precipite contra as

paredes e se decomponha. No sistema de dois canais, os espaços mortos significam uma área que deve ser preenchida, antes que a refrigeração possa continuar fluindo.

2.6.6 Vantagens do MQL

- Melhora da limpeza do local de trabalho devido às peças e os cavacos não possuírem óleo.
- O método elimina bomba de refrigeração, ensaios de arrefecimento, tratamento de refrigerante e eliminação de líquido de arrefecimento, e permite que o operador observe visualmente o desempenho durante a usinagem (BOOTHROYD *et al.*, 2005).
- Há uma redução de doenças ocupacionais que ocorrem devido à utilização dos fluidos de corte tradicionais, além da redução de custos no processo. Estes fatores são grandes motivadores para o desenvolvimento de sistemas alternativos, sendo o sistema MQL é uma alternativa funcional e promissora. (LAWAL *et al.* 2012; ANSHU *et al.*, 2009; WEINERT *et al.*, 2004).

2.6.7 Desvantagens do MQL

- Máquina enclausurada – Apesar da motivação ambiental para a utilização do MQL, a pulverização pode causar a poluição do ar, se não forem adotados cuidados especiais, antes da implantação do sistema. O mínimo que se exige é uma máquina totalmente fechada e um bom sistema de exaustão com controle de emissão de partículas (HEISEL *et al.*, 1998).
- Barulho – Na pulverização é utilizada uma linha de ar comprimido que funciona intermitentemente durante todo o processo. Essas linhas de ar geram muito ruído, normalmente com intensidade superior àquelas permitidas para o ouvido humano (<80 dB). Além de afetar a saúde, o barulho polui o ambiente, prejudicando a comunicação (DINIZ *et al.*, 2006).

- Consumo – A aplicação do fluido por névoa é considerado sem retorno, isto é, com perda total do fluido. Mesmo com baixos níveis de vazão (<50 ml/h) o consumo de fluido deve ser calculado e considerado (DINIZ *et al.*,2006). Alguns produtos sintéticos podem ter consumo muito inferior, e ter uma vida útil prolongada devido ao prazo de validade indeterminado.

2.7 MEIO LUBRI-REFRIGERANTE EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO MQL

O propósito do meio lubri-refrigerante é levar consigo parte do calor originado na usinagem, possibilitando o aumento da velocidade de corte. E em seguida a redução do atrito entre o cavaco e a ferramenta. Entre as melhorias distingue-se (FERRARESI, 1995):

- Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco;
- Expulsão do cavaco da região de corte;
- Refrigeração da ferramenta;
- Refrigeração da peça em usinagem;
- Melhor do acabamento superficial da peça em usinagem;
- Refrigeração da máquina-ferramenta.

Dentre as melhorias de caráter econômico, distingue-se:

- Redução do consumo de energia de corte;
- Redução do custo da ferramenta na operação;
- Impedimento da corrosão da peça em usinagem;
- Maior produtividade.

No processo de usinagem o cavaco se torna indesejável tão logo acaba de ser produzido. Sua presença na região do corte pode provocar danos na ferramenta ou na superfície da peça usinada. O emprego do meio lubri-refrigerante facilita a expulsão do cavaco em alguns casos, como por exemplo, no torneamento, na

furação, no fresamento, etc. No caso do processo de furação profunda procede-se a uma construção especial da ferramenta a fim de permitir o acesso do fluido de corte até a ponta da broca. Isto se consegue através de duas soluções (FERRARESI, 1995):

Dois furos feitos nos flancos da broca segundo a figura 2.22 Neste caso, tais furos são feitos longitudinalmente na barra de secção, retangular que se dará mediante torção a quente, ou sinterização do metal duro (FERRARESI, 1995).

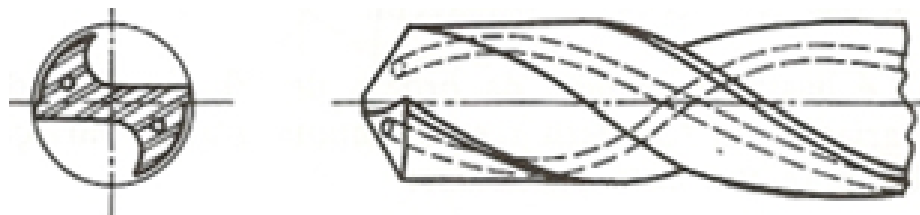


Figura 2. 22 - Broca com dutos para refrigeração (FERRARESI, 1995).

A figura 2.23 apresenta uma interface ferramenta-cavaco, muitas vezes aumentada, onde são mostradas as rugosidades superficiais das partes em contato. As reentrâncias constituem-se em pequenos depósitos de fluidos em estado líquido ou gasoso, conforme as condições locais (FERRARESI, 1995).

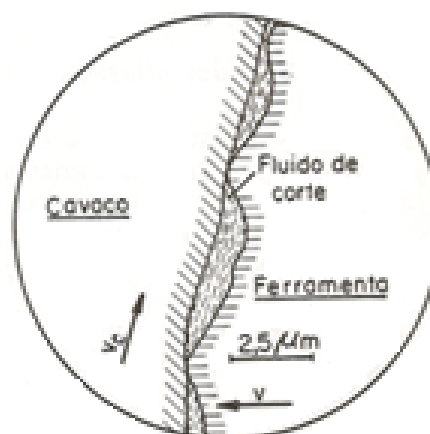


Figura 2. 23 - Penetrabilidade do fluido de corte entre ferramenta-cavaco (FERRARESI, 1995).

No ambiente industrial o contato dos operadores com os fluidos de corte podem gerar algumas doenças como dermatite, alergias, perda da capacidade

pulmonar, câncer gastrointestinal e outros tipos de câncer, Considerando a utilização do MQL a nevoa produzida é indesejável (DINIZ *et al.*,2006). Ações devem ser feitas a fim de evitar esta suspensão, como máquinas enclausuradas com exaustão.

Uma premissa básica dos fluidos de refrigeração é a autolimpeza da máquina com o eficiente transporte do cavaco. No caso da utilização do sistema MQL estas condições não são plenamente atendidas, sendo necessárias preparações antecipadas na máquina a fim de evitar estes problemas.

Os óleos empregados em MQL devem ter características especiais, como viscosidade mais elevada, para proporcionar maior redução do atrito, temperatura e força de corte e conseqüentemente o aumento da vida útil da ferramenta em relação a o processo de usinagem a seco (ANSHU *et al.*, 2009).

2.7.1 Classificação dos fluidos de corte para MQL

As Bases Lubrificantes são selecionadas de acordo com sua capacidade de: formar um filme deslizante protetor das partes móveis; resistir às constantes tentativas do calor e do oxigênio de alterarem suas propriedades; resistir a choques e cargas mecânicas sem alterar seu poder lubrificante; remover calor dos componentes internos do equipamento. Para oferecer outras características de desempenho e proteção, são adicionados às bases lubrificantes alguns componentes químicos que são chamados de aditivos.

São utilizados três tipos de óleos nos sistemas MQL: óleos sintéticos, vegetais e minerais.

- **Sintéticos:** São obtidos por um processo químico mais caro do que o utilizado na produção do óleo mineral. Os óleos totalmente sintéticos são mais resistentes ao calor e podem ser protegidos mais facilmente por aditivos antioxidantes, (a oxidação é um processo degenerativo natural que ocorre no óleo ao longo do tempo). Além disso, eles são menos voláteis do que os óleos minerais.

- Minerais: Os óleos minerais básicos vêm do petróleo bruto, que é processado em uma refinaria para separar as frações com propriedades de lubrificação e remover os componentes indesejáveis, tais como as ceras.
- Vegetais: São produtos de condensação entre glicerol e ácidos graxos, possuem boa viscosidade baixa volatilidade e grande apelo ambiental por serem biodegradáveis e renováveis. São extraídos principalmente de soja, canola, girassol e palma (RAHIM *et al.*, 2011)

2.8 TEMPERATURA EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO

Durante o processo de formação do cavaco aparecem três fontes distintas de calor. A primeira na região do cisalhamento (zona C da figura 2.24) onde ocorre a deformação plástica do material que está sendo usinado, esta fonte afeta todo o volume do cavaco formado. A segunda fonte afeta uma face do cavaco e uma face da ferramenta (zona A da figura 2.24), onde o cavaco desliza sobre a superfície de saída da ferramenta, esta fonte é devida ao atrito na interface ferramenta-cavaco. A terceira fonte é a zona B da figura 2.24, onde ocorre o atrito entre a ferramenta e a superfície usinada da peça; Esta fonte afeta parte da superfície de incidência da ferramenta e toda a superfície usinada da peça (FERRARESI, 1995).

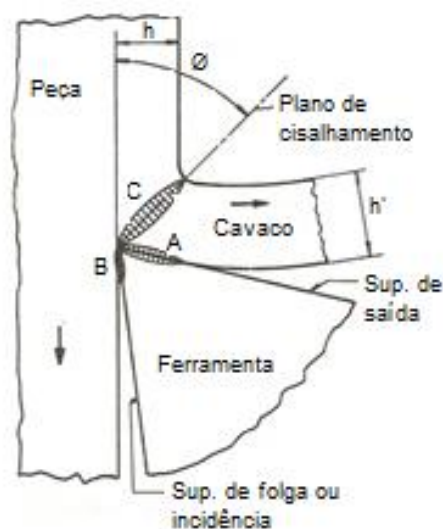


Figura 2. 24 - Fonte de calor na formação de cavaco (STEMMER, 2008).

O controle da temperatura é fundamental, pois exerce grande influência no desgaste e vida útil da broca. A temperatura é função da velocidade de corte e avanços que são dimensionados conforme a resistência da ferramenta e o revestimento superficial. Os revestimentos superficiais permitem a utilização de velocidades de corte elevadas, aumentando a produtividade e a vida útil da ferramenta (LE COZ *et al.*, 2011).

Os revestimentos TiAlN e AlCrN e AlCrN-based possuem microestrutura cristalina cúbica, mantendo resistência à deformação em altas temperaturas. Nos revestimentos TiAlN a alteração da microestrutura de cúbica para hexagonal ocorre entre 800 e 900°C. A estrutura hexagonal não possui a mesma resistência ocasionando uma drástica redução na dureza. Nos revestimentos a base de AlCrN a mudança de microestrutura ocorre em temperaturas superiores a 1100° C (QUINTO, 2005).

Para controle da temperatura no processo de furação são utilizados parâmetros de corte adequados e sistemas de refrigeração como MQL onde variável temperatura exerce grande influência no processo (ZEILMANN *et al.*, 2006)

A medição de temperatura em um processo de furação é complexa devido à rotação da ferramenta na maioria dos casos. De forma comparativa é possível medir indiretamente na região próxima a usinagem. Autores promoveram experimentos com medição de temperatura de forma direta e com sensores termopares alojados próximos à região a ser furada e analisada. Desta forma é possível verificar a diferença entre sistemas (ZEILMANN *et al.*, 2006; BRANDÃO *et al.*, 2011).

É possível fabricar ferramentas especiais para acoplar sistemas de medição como: utilização do canal de refrigeração interna da ferramenta ou canais fabricados especificamente para alojamento dos sensores termopares ou cabos de fibra ótica. Neste caso a broca fica parada e a peça gira (MASAHIKO *et al.*, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo traz uma descrição dos materiais, ferramentas, equipamentos e métodos utilizados na realização dos experimentos, assim como da sistemática utilizada para sua realização. A metodologia deste trabalho foi baseada no desenvolvimento experimental de ensaios sistemáticos reproduzindo situações encontradas no meio industrial.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material usinado foi o SAE 4144M forjado e temperado. Este material apresenta cavacos tipo fita durante a usinagem com elevada resistência à quebra. Geometrias especiais em ferramentas e parâmetros adequados são importantes.

As medições foram de uma amostra do lote dos corpos de prova, que são provenientes do mesmo lote do forjamento e tratamento térmico, assegurando a repetibilidade dos testes.

A análise química foi feita em um espectrofotômetro marca Spectrolab Analytical Instrum. A tabela 3.1 mostra a composição química do material, constata-se que os corpos de prova estão de acordo com as especificações.

Tabela 3.1 - Composição química do material Fonte: Laboratório metalográfico Robert Bosch.

Elemento	Especificado (%)	Verificado (%)
C	0,42 a 0,46	0,44
Si	0,20 a 0,30	0,24
Mn	0,90 a 1,10	0,95
P	Max. 0,025	0,018
S	0,010 a 0,020	0,020
Cr	1,15 a 1,30	1,26
Ni	Max. 0,25	0,17
Mo	0,25 a 0,35	0,25
Cu	Max. 0,35	0,22

A preparação da amostra para a análise da microestrutura foi feita conforme procedimento usual com lixamento progressivo, polimento e ataque com reagente Nital na concentração de 2%. A imagem foi registrada com uma câmera Olympus QColor3, acoplada a um microscópio Olympus BX 51M. O resultado mostrado na figura 3.1 apresenta microestrutura martensítica, revenida. A dureza resultou de uma média de 3 medições, com o valor de 38.9 HRC, medida em um durômetro Emcotest modelo M4R 250 G3 utilizando escala Rockwell C.



Figura 3. 1 – Microestrutura martensítica revenida. Fonte: Laboratório metalográfico Robert Bosch.

3.2 MÁQUINA FERRAMENTA

Nos testes foi empregado um centro de usinagem Robodrill comando FANUC, cone MAS BT 30, com refrigeração interna, fuso com rotação máxima de 24000 rpm. As ferramentas foram acopladas a um mandril de fixação hidráulica a fim de reduzir ao máximo o batimento da broca montada na máquina.

3.3 SISTEMA MQL

O sistema MQL utilizado no experimento empregou um canal modelo 651E conforme figura 3.2, desenvolvido pela empresa alemã Lubrix, especialmente para utilizações em furações com refrigeração por meio de canais internos da ferramenta. A vazão é proporcional aos canais de refrigeração da ferramenta: quanto maior área da seção transversal do canal, maior o volume de óleo injetado. Também é possível ajustar faixas de pressão e a quantidade injetada através de controle pelo painel do equipamento. Neste teste o equipamento trabalha com pressão de 10 bar e vazão de óleo de 18 a 20 ml/h. O equipamento utiliza uma fonte de alimentação eletrônica 220V com saída 24V para acionamento do aparelho. A tubulação de saída da mistura ar e óleo foram ligados à entrada do fuso da máquina. Não foram utilizadas conexões a 90° para minimizar a perda de carga no sistema.



Figura 3. 2 – Sistema de lubri-refrigerante MQL.

3.4 MEIOS LUBRI-REFRIGERANTES

Foi feita a confirmação das viscosidades em amostras de ambos os óleos utilizados no experimento. O equipamento utilizado foi o viscosímetro marca Schott com medição a 40°C.

O fluido lubri-refrigerante convencional utilizado nos testes a jorro foi o EcoCut 610B integral mineral de viscosidade 10 mm²/s a 40°C, segundo o fabricante Fuchs. A medição no viscosímetro para o fluido lubri-refrigerante convencional foi de 10,07 mm²/s.

O fluido lubri-refrigerante utilizado nos testes com MQL foi o LubriOil E47, éster sintético de viscosidade 47 mm²/s a 40°C, segundo o fabricante. A medição no viscosímetro para o fluido lubri-refrigerante MQL foi de 43,09 mm²/s.

3.5 BROCAS

Foram utilizadas três brocas diferentes em duas etapas do experimento. Brocas com diâmetro de 4,0 mm e 4,8 mm, afiação tipo “S” e broca de diâmetro 4,8 mm, afiação em “cruz” ou cruzada. (figura 3.3 e 3.4).

Estas brocas foram construídas em metal-duro (K40), ultrafino, com canais para refrigeração interna. São revestidas parcialmente com TiAlN (nitreto de titânio alumínio), temperatura máxima de serviço de 900°C. E AlCrN-based (nitreto de cromo alumínio) temperatura máxima de serviço 1100°C. Dados fornecidos pelo fabricante do revestimento Balzers.

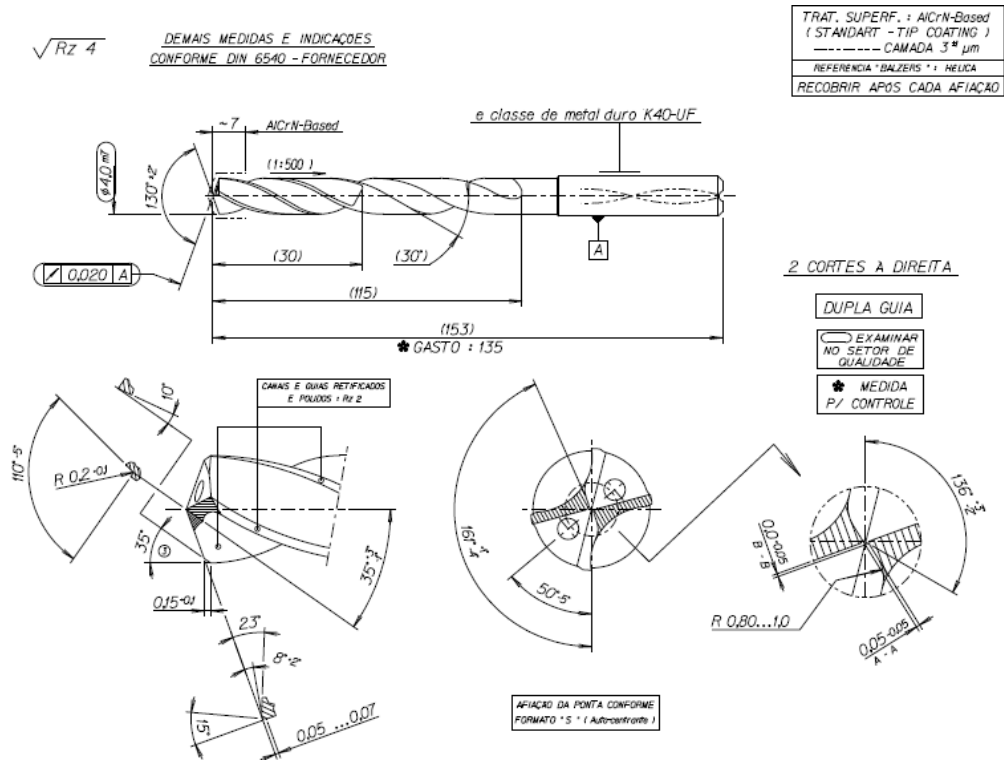


Figura 3. 3 – Projeto da broca diâmetro 4 mm utilizada nos testes. Fonte: Robert Bosch.

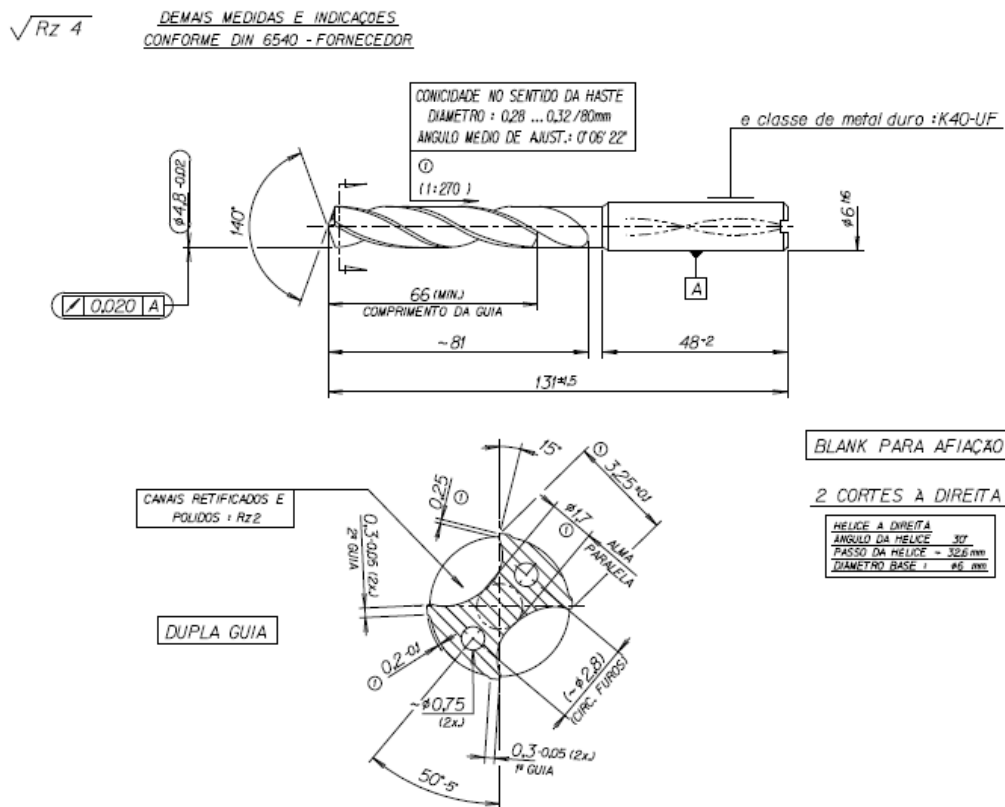
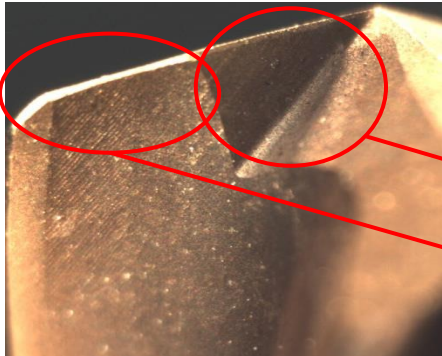
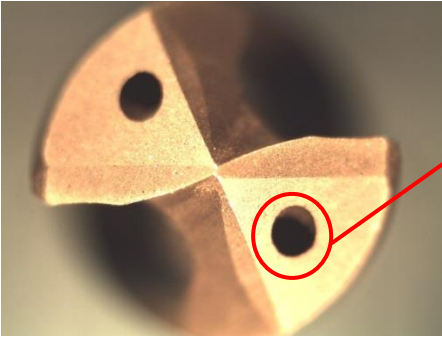
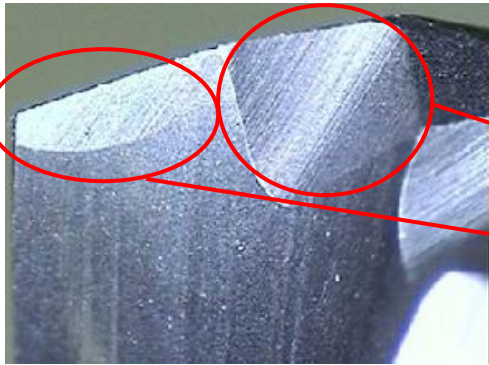
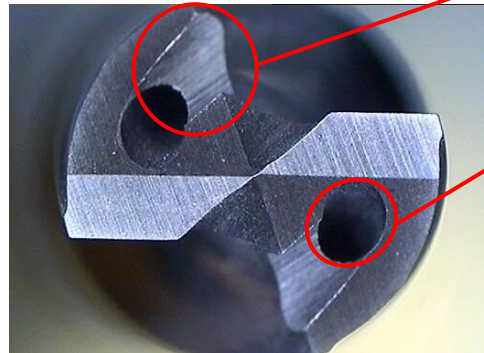


Figura 3. 4 – Projeto da broca diâmetro 4,8 mm utilizada nos testes. Fonte: Robert Bosch.

Tabela 3. 2 – Principais características das brocas diâmetro 4.8 utilizada nos testes.

Broca Ø 4,8mm “Geometria 1”	Principais características
 	<p>Afiação tipo “S”</p> <p>Dupla guia com comprimento de 70 mm</p> <p>→ Afinação da aresta transversal</p> <p>→ Sem correção do ângulo de saída.</p> <p>→ Furos de refrigeração com Ø 0,65 mm</p> <p>Revestimento TiAlN</p>
Broca Ø 4,8mm MQL “Geometria 2”	Principais características
 	<p>Afiação cruzada</p> <p>Dupla guia com comprimento de 30 mm</p> <p>→ Afinação da aresta transversal</p> <p>→ Correção do ângulo de saída</p> <p>→ Canal para direcionar o fluxo para a aresta de corte</p> <p>→ Furo de refrigeração interna com diâmetro de 0,75 mm</p> <p>Revestimento TiAlN</p>

3.6 EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Para análise do desgaste durante a realização dos experimentos foi utilizados um sistema ótico, composto por câmara de vídeo e lentes capazes de capturar, ampliar (de 4 a 4000 vezes) associadas a um software de medição, marca Fersart modelo Tecstart. Este método permite a visualização rápida e ampliada da aresta da ferramenta entre as etapas do experimento.

Para análise do desgaste da ferramenta foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), este equipamento é utilizado para capturar imagens ampliadas das regiões de corte da ferramenta, possibilitando a visualização dos tipos de desgaste ocorridos na aresta de corte para análise e conclusões após realização dos experimentos. Neste equipamento foi feita a análise química dos materiais presentes na aresta da ferramenta utilizando o processo de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

3.7 EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DA FORMA DO CAVACO.

Para análise do cavaco foram utilizados: um recipiente com graduação volumétrica marca Pyrex 3022C com capacidade de 100 ml para medir o volume do cavaco, e uma balança de precisão (0,1 grama) marca Precisa 240A, para medir a massa do cavaco.

3.8 SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE FORÇA

A máquina foi instrumentada com um dinamômetro de cristal piezelétrico Kistler® modelo 9272A, amplificador de sinal modelo 5070A da marca Kistler®, com uma placa de aquisição de dados modelo USB 6259 BNC da National Instruments, e com um microcomputador munido de software de processamento de sinais Labview®, figura 3.5 (b).

Foi desenvolvido um dispositivo para fixar o corpo de prova no dinamômetro, possibilitando o ajuste da furação alinhada com o centro do dinamômetro, para as medições corretas de força. As amostras foram preparadas para o encaixe correto no dispositivo, figura 3.5 (a).

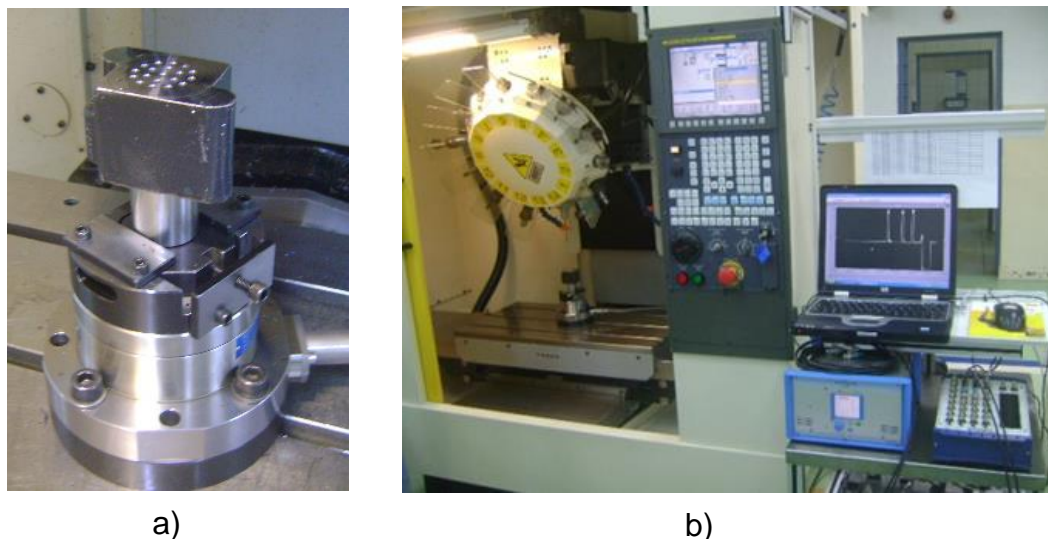


Figura 3. 5 – a) Dinamômetro; b) Máquina instrumentada.

3.9 SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Para as medições de temperatura da peça, foi utilizado um termômetro digital infravermelho com mira a laser marca Fluke, modelo 61 com faixa de medição de -30°C a $+275^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para verificar o comportamento da temperatura entre os tipos de sistemas lubri-refrigerantes, foi utilizado um equipamento de aquisição de dados marca Agilent, modelo 34870 A. O equipamento capta medições simultâneas nos quatro sensores, com intervalos de captação de sinal em 0,1 segundos. Os valores de velocidade de corte e avanço foram fixados para as duas condições de refrigeração, óleo e MQL, para verificar as diferenças de temperatura entre os sistemas. Nesta medição foram utilizados sensores termopar tipo, K (cromel/alumel), com faixa de medição de -270 a 1372°C , isolamento mineral e com diâmetro de 1,5mm x 6000mm de comprimento. Os sensores foram calibrados com, calibrador micro processados marca Cappel.

3.10 METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS

O trabalho experimental foi dividido em duas etapas, para análise do processo de furação profunda, utilizando sistema lubri-refrigerante MQL, comparado ao processo convencional de jorro de óleo integral pressurizado. Na primeira fase utilizou-se broca de 4,8 mm, furando a 70 mm de profundidade igual a 17 vezes o seu diâmetro ($L/D=17$). Nesta fase foram definidos de forma expedita os parâmetros do processo de furação, e os fatores que exercem maior influência no desgaste da broca. Para garantir a confiabilidade deste estudo, foram feitos nos experimentos da primeira fase 1293 furos com 70 mm de profundidade, totalizando 90 metros lineares furados.

Na segunda fase empregou-se broca de diâmetro 4 mm, furando com 96 mm de profundidade, relação de 24 vezes o diâmetro ($L/D=24$). Esta furação é mais complexa quando comparada a primeira, devido à maior relação de profundidade, diâmetro. Nesta fase foram referendados os métodos e análises da primeira fase, aprimoradas as formas de medições mais importantes usadas na primeira fase. Na segunda fase foram feitos 1282 furos com 96 mm de profundidade, total de 123 metros lineares furados.

Para organizar os experimentos foi utilizada a técnica de projeto de experimento DOE. Esta metodologia permitiu evidenciar o efeito principal de cada fator do processo, e a interação entre fatores. O software Minitab foi utilizado como ferramenta de cálculo estatístico para montagens e definições do DOE.

No planejamento do experimento definiram-se previamente quais parâmetros e grandezas seriam fixos, variáveis e medidos (figura 3.6).

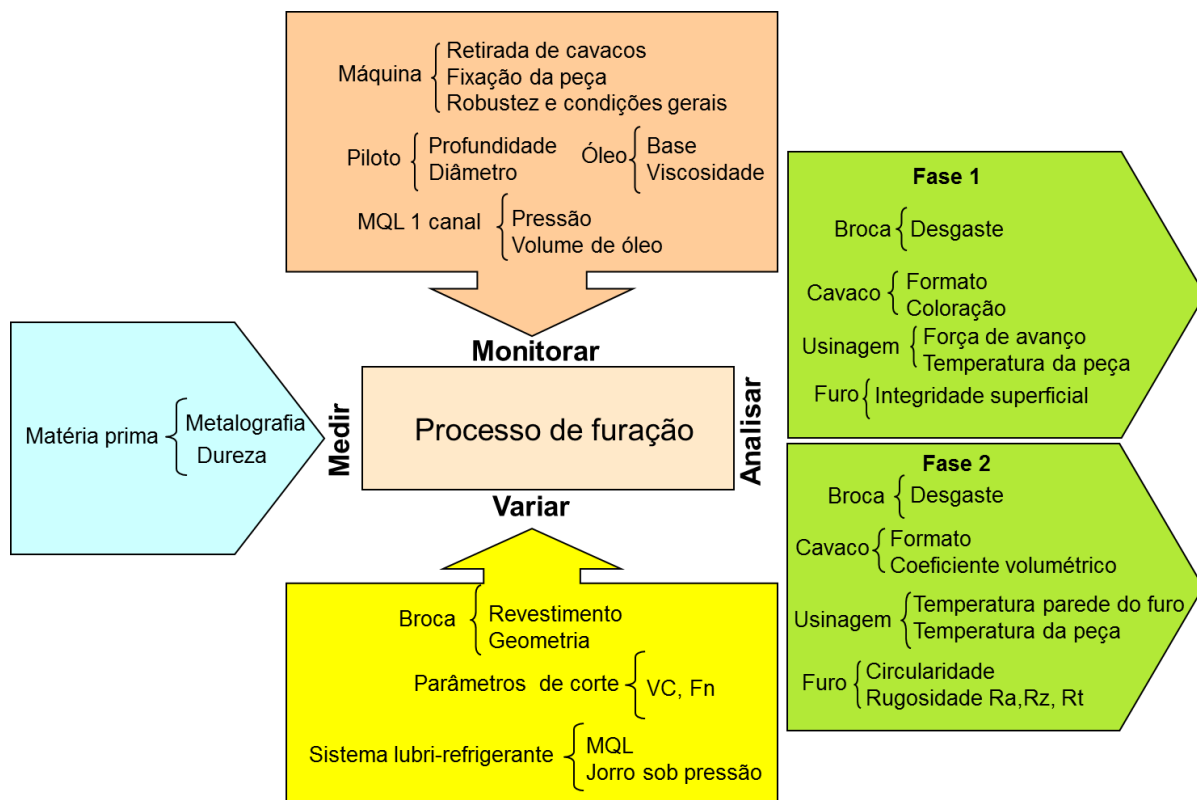


Figura 3. 6 – Planejamento com as grandezas envolvidas e análise por fase do experimento

A estratégia de usinagem empregada é ilustrada pela figura 3.7, inicialmente é feito um furo guia com broca de diâmetro 0,01 mm, maior do que o diâmetro da broca de furação profunda, e com profundidade de uma vez o diâmetro. Em seguida troca-se a ferramenta e inicia-se a penetração no furo guia, com rotação de 1000 rpm. Com a ferramenta guiada, são modificados os valores de rotação e avanço conforme planejado no DOE para realizar a furação.

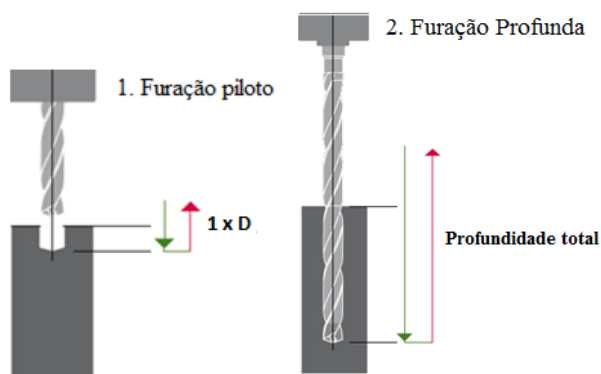


Figura 3. 7 – Estratégias de usinagem utilizada nos testes.

Para auxiliar o entendimento da sequência de testes, foi elaborada a tabela 3.3 que organiza de forma resumida as fases dos testes, considerando as características das brocas, processo e forma de medição dos resultados.

A tabela 3.3 mostra de forma simplificada a sequência das fases do experimento.

Fase	Objetivo	Broca / Processo					Forma de medição dos resultados				
		Ø / prof. (mm)	Afição tipo	Revestim.	Compr. guia broca (mm)	Sistema lubri-refrigerante	Cavaco	Temperat. da peça	Força de avanço	Análise da aresta da broca	Aspecto do furo
1	Definir parâmetros / geometria	4,8 / 70	S	TiAlN	70	MQL	Padrão comparativo	Superfície com termômetro	x	x	x
		4,8 / 70	Cruz	TiAlN	30	MQL	Padrão comparativo	Superfície com termômetro	x	x	x
	Medir força avanço	4,8 / 70	Cruz	TiAlN	30	MQL	x	x	Dinamômetro	x	x
	Comparar sistemas lubri-refrigerantes	4,8 / 70	Cruz	TiAlN	30	MQL / Jorro de óleo	x	x	x	MEV	Integridade superficial do furo
2	Medir ΔT (°C)	4,0 / 96	S	TiAlN	30	MQL / Jorro de óleo	x	Parede do furo com termopar	x	x	Medir circularidade rugosidade
	Definir parâmetros	4,0 / 96	S	TiAlN	30	MQL	Coefficiente volumétrico	Superfície com termômetro	x	x	x
	Definir nº furos p/ comparativo	4,0 / 96	S	TiAlN	30	Jorro de óleo	Alteração forma do cavaco	x	x	Ótico	x
	Comparar sistemas lubri-refrigerantes e parâmetros	4,0 / 96	S	TiAlN e AlCrN-based	30	MQL / Jorro de óleo	x	x	x	MEV / EDS	x

3.11 PRIMEIRA FASE EXPERIMENTAL

A primeira fase do experimento objetiva a entender o comportamento do processo de furação com o sistema lubri-refrigerante MQL, compará-lo ao jorro de óleo pressurizado, e determinar a geometria de ferramenta mais adequada para a aplicação do sistema MQL. Esta fase contempla a furação com broca de diâmetro de 4,8mm em profundidade de 70mm.

3.11.1 Análise da temperatura da peça e da forma do cavaco

A formação do cavaco em furações profundas é fundamental devido, à dificuldade de extração pelo canal da ferramenta, em caso de má formação do cavaco ocorre à obstrução dos canais pressionando a ferramenta, cavaco e peça, danificando a parede do furo e quebrando a ferramenta (FERRARESI, 1995).

A análise da temperatura da peça e da forma do cavaco foi feita utilizando-se do primeiro DOE, cuja sequência de rodadas foi gerada no software Minitab®. Foram inseridos no software os parâmetros de trabalho permissíveis à ferramenta, como: velocidade de corte de 50 m/min a 70 m/min e avanço de 0,05 mm/rot a 0,15 mm/rot, interagindo com as geometrias 1 e 2 de ferramentas (tabela 3.4).

Em cada rodada foi utilizado uma ferramenta, e foram feitos 20 furos com profundidade de 70 mm. Ao término de cada rodada foram registrados os resultados de temperatura da peça, e coletada a amostra do cavaco para análise.

Tabela 3.4 – Primeiro DOE para definição da geometria 1 ou 2 da broca utilizando sistema lubri-refrigerante MQL

Ordem	Avanço mm/rot	Velocidade de corte	Geometria da broca
1	0,05	70	1
2	0,15	70	1
3	0,05	70	2
4	0,15	50	1
5	0,05	50	2
6	0,05	50	1
7	0,15	50	2
8	0,15	70	2
9	0,12	65	2

As medições da temperatura da peça foram feitas após 1 minuto do término das furações, sempre no mesmo ponto de medição, e considerando a temperatura inicial da peça antes da furação. A análise da forma do cavaco foi feita atribuindo-se notas, conforme a avaliação visual do tipo do cavaco, sendo que: a melhor nota é

referente ao menor cavaco, (figura 3.8). Nesta avaliação é considerada a coloração do cavaco, que se correlaciona com as medições de temperatura da peça.

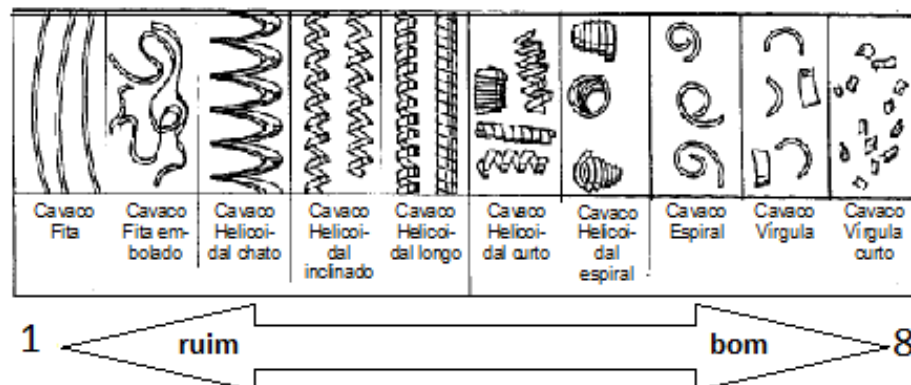


Figura 3. 8 – Atribuições qualitativas do cavaco pela forma (KÖNIG E KLOCKE, 1997).

3.11.2 Análise da força de avanço

Na primeira fase do experimento foi medida a força de avanço, utilizando um dinamômetro. Foi analisada a influência da força de avanço na furação com MQL.

Esta análise foi feita conforme o procedimento anterior, atribuindo valores de velocidade de corte e avanços máximos e mínimos no Minitab®. Desse procedimento gerou-se o segundo DOE, (tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Segundo DOE para análise da força de avanço.

Rodadas	Velocidade de corte m/min	Avanço mm/rot
1	40	0,1
2	60	0,1
3	40	0,2
4	60	0,2
5	35	0,15
6	64	0,15
7	50	0,08
8	50	0,22
9	50	0,15
10	50	0,15
11	50	0,15
12	50	0,15
13	50	0,15

3.11.3 Análise do desgaste da broca

A fim de verificar se a escolha dos parâmetros de corte provenientes do primeiro DOE foi eficaz, as ferramentas foram submetidas a um teste de longa duração. Cada ferramenta foi testada com os parâmetros adequados para cada tipo de processo, (tabela 3.6).

O teste de vida iniciou com a ferramenta de geometria 1, que utilizou sistema lubri-refrigerante convencional, com jorro de óleo pressurizado a 50 bar, e viscosidade de 10 mm²/s . A forma do cavaco foi monitorada constantemente durante as furações. O teste foi interrompido no momento que houve uma mudança na forma do cavaco, ocasionada por algum tipo de avaria na aresta de corte.

Foi utilizado o mesmo critério para a análise da ferramenta com geometria 2, e os parâmetros provenientes do primeiro DOE, utilizando MQL. Após a modificação da forma do cavaco durante a furação, o teste foi interrompido para análise da ferramenta.

Tabela 3.6 – Parâmetros para o teste de longa duração.

Fluido lubri-refrigerante convencional sob pressão a 50 bar	Sistema lubri-refrigerante MQL 10 bar com vazão de óleo de 18 a 20 ml/hora
Broca com geometria 1	Broca com geometria 2
Vc = 80m/min	Vc = 50m/min
f = 0,10mm/rot	f = 0,15mm/rot

3.11.4 Análise da integridade superficial do furo

Neste experimento foi analisada a integridade da superfície do furo, ao término de 200 furos foi separada uma peça de cada sistema lubri-refrigerante. Nos corpos de prova foram realizados cortes no sentido longitudinal do furo e feita análise da superfície e região termicamente afetada pela broca. Foi utilizado o método usual de análise metalográfica com: lixamento, polimento, ataque de Nital 2% e imagem registrada com câmera e microscópio, conforme foi feita a análise da microestrutura.

3.12 SEGUNDA FASE EXPERIMENTAL

A segunda fase experimental foi feita com broca diâmetro de 4mm, e com 96mm de profundidade. Considerando as informações coletadas na primeira fase, foram definidos alguns experimentos, a fim de explicar fenômenos envolvidos no processo e comprovar a eficiência da metodologia na escolha de parâmetros de processo de usinagem com MQL.

A execução da segunda fase experimental foi feita com um controle mais preciso do processo, devido à relação de profundidade e diâmetro ser maior, ($L/D=24$). Desta forma alguns procedimentos de medição foram redefinidos.

3.12.1 Comportamento da temperatura do processo entre os sistemas lubri-refrigerantes e medição dos furos

Para entender o comportamento da temperatura nos sistemas lubri-refrigerantes MQL e jorro de óleo durante a furação, foi preparado um corpo de prova com orifícios para alojamento dos sensores termopares (Fig. 3.10).

Os sensores foram posicionados a um milímetro da parede do furo, onde ocorre a passagem da broca durante a furação. No momento da furação os sensores detectam a variação da temperatura. Durante o período da furação foram registrados os valores de temperatura com intervalos de 0,1s.

Foram definidos parâmetros e brocas iguais, para analisar somente o efeito do meio lubri-refrigerante na temperatura do processo de furação (tabela 3.7).

Foram realizadas as medições geométricas, rugosidade e circularidade dos furos nestes corpos de prova, após a realização do teste de temperatura. Provendo a análise somente em função da variação do sistema lubri-refrigerante.

Tabela 3.7 – Parâmetros de corte para a medição de temperatura.

Variáveis de entrada			
Rodada	vc (m/min)	Avanço (mm/rot)	Lubri-refrigerante
Óleo	80	0,085	Jorro
MQL	80	0,085	MQL

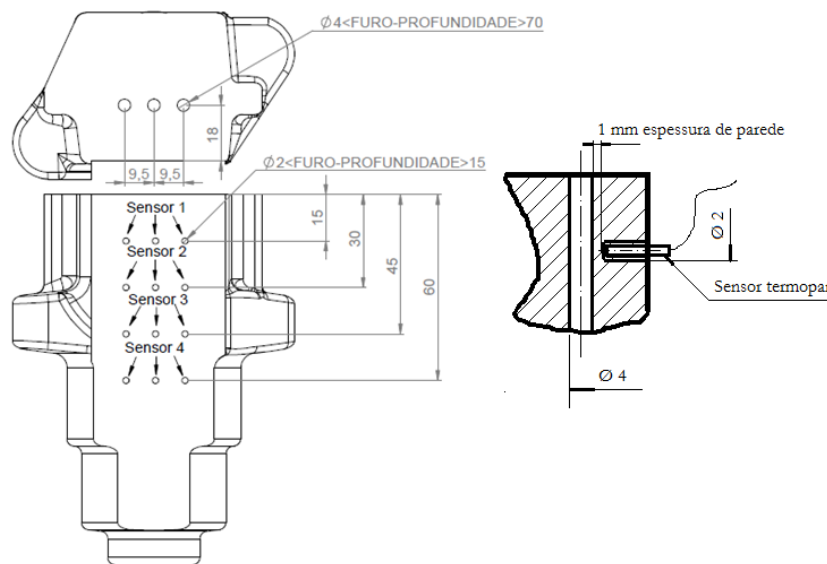


Figura 3. 9 – Corpos de prova para medição de temperatura durante a furação

3.12.2 Medição da temperatura da peça e da forma do cavaco através do volume ocupado

Nesta fase experimental foi realizado um terceiro DOE para escolha dos parâmetros de corte adequados para a furação. Foram atribuídos parâmetros máximos de velocidade de corte de 75 m/min e de avanço de 0,15 mm/rot, e valores mínimos de velocidade de corte 25 m/min e avanço de 0,05 mm/rot. Estes valores foram escolhidos na faixa de utilização da ferramenta, com esta definição é possível ampliar a área de análise, e aumentar a probabilidade para fazer a melhor escolha dos parâmetros através do método. Os valores iniciais foram inseridos no software Minitab™ que faz um cálculo estatístico e gera valores intermediários, formando os valores de entrada da tabela 3.8, que são denominados rodadas. Em cada rodada

foi analisado a temperatura da peça e volume do cavaco. Foram feitos 30 furos em cada rodada.

Para determinar a temperatura da peça foi utilizado o termômetro com medição de temperatura por infravermelho. A medição foi obtida em 1 minuto após o término dos 30 furos, posicionando sempre no mesmo ponto e considerando a temperatura inicial da peça.

Tabela 3.8 – Rodadas do terceiro DOE para definição dos melhores parâmetros.

Rodada	Vc (m/min)	Avanço (mm/rot)
1	75	0,10
2	50	0,10
3	50	0,125
4	25	0,10
5	50	0,15
6	50	0,05
7	50	0,10
8	68	0,14
9	50	0,10
10	62	0,10
11	32	0,14
12	32	0,06
13	68	0,06

Para análise da forma do cavaco, foi empregado o método do cálculo do coeficiente volumétrico do cavaco. Este é feito considerando a massa e o volume do cavaco ocupado em um recipiente. Este método possibilita a análise quantitativa do cavaco, mais precisa e necessária devido à furação com relação $L/D=24$, ser mais complexa.

O coeficiente volumétrico de cavaco (ω) é a relação entre o volume ocupado pelo cavaco (V_e) e o volume correspondente a sua massa (V_p), demonstrado na equação (1). (FERRARESI, 1995).

$$\omega = \frac{V_e}{V_p} = \frac{V_e}{\frac{m}{\rho}} = \frac{\rho \times V_e}{m \times 1000} \quad (1)$$

V_e = volume ocupado pelo cavaco (cm^3);

V_p = volume específico do material do cavaco (cm^3)

m = massa do cavaco (kg);

ρ = peso específico do material do cavaco (g/cm^3).

Após o término das rodadas, iniciou-se a medição do coeficiente volumétrico do cavaco, medindo a massa relativa a um volume de cavaco que foi colocado na proveta. O cálculo foi feito utilizando a equação 1. O menor coeficiente volumétrico corresponde a melhor condição, o que significa que a forma reduzida do cavaco ocupa menos espaço na proveta.

3.12.3 Comparativo entre tipos de revestimentos e sistemas lubri-refrigerantes

Com objetivo de analisar as influências na ferramenta, causados pelos sistemas lubri-refrigerantes convencional e MQL e verificar as melhores condições como: revestimentos e parâmetros adequados, realizou-se um experimento de longa duração para estabelecer um critério de comparação entre os sistemas MQL e jorro de óleo pressurizado. Foi analisado o desgaste da ferramenta revestida com TiAlN utilizando os parâmetros especificados pelo fabricante da ferramenta (tabela 3.8). A modificação da forma do cavaco interrompeu o teste para análise da ferramenta, definindo o resultado da vida útil da broca.

Tabela 3.9 – Parâmetros do teste de desgaste para definir número de furos

Rodada	vc (m/min)	Avanço (mm/rot)	Lubrificação
1	62	0,06	Jorro de óleo

Para estabelecer as condições de corte adequadas, para a furação profunda com sistema MQL e comparar com o sistema lubri-refrigerante convencional, foram analisados os resultados experimentais da segunda fase. Os resultados de: parâmetros de corte, limite de desgaste estabelecido em 200 furos e o

comportamento da temperatura do processo possibilitaram o planejamento de um último experimento. Este experimento propiciou a comparação, dos efeitos dos parâmetros de corte comerciais e dos parâmetros do DOE, associados aos tipos de revestimentos TiAlN e AlCrN-based, e os sistemas lubri-refrigerantes MQL e jorro de óleo pressurizado. A análise deste experimento permite a escolha da condição adequada processo de furação profunda com sistema lubri-refrigerante MQL (tabela 3.10).

Tabela 3.10 – Experimento comparativo entre tipos de revestimentos, sistemas lubri-refrigerantes e parâmetros de corte

N°	Revestimento	Sistema lubri-refrigerante	Vc (m/min)	f (mm/rot)
1	Revestimento de TiAlN	Jorro de óleo pressurizado	62	0,06
2	Revestimento de TiAlN	MQL	62	0,06
3	Revestimento de TiAlN	MQL	45	0,14
4	Revestimento AlCrN-based	MQL	45	0,14

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às etapas experimentais, seguindo os métodos apresentados no capítulo anterior. Serão abordadas as principais características do processo tais como, o mecanismo de desgaste predominante, a vida obtida para cada ferramenta, a força de avanço, a qualidade dos furos e a formação de cavacos. A apresentação dos dados dar-se-á na forma de gráficos, documentação fotográfica, análises químicas através do sistema EDS (espectroscopia de energia dispersiva) e imagens pelo MEV (microscopia eletrônica de varredura).

4.1 RESULTADO EXPERIMENTAL DA PRIMEIRA FASE

Foi feita a análise da primeira fase do experimento com broca de diâmetro 4,8 mm furando com 70 mm de profundidade, relação $L/D=14$ utilizando sistema lubri-refrigerante MQL. São apresentados os resultados relativos à escolha dos parâmetros de corte, em função da temperatura e da forma do cavaco. E também os resultados da força de avanço em função da velocidade de corte e a análise dos resultados da vida útil da ferramenta.

4.1.1 Resultados da escolha dos parâmetros de corte da primeira fase

A análise dos resultados do primeiro DOE foi feita considerando, a forma do cavaco e a temperatura da peça, os resultados são mostrados na (tabela 4.1). Observa-se que os melhores resultados foram obtidos com a combinação de parâmetros das rodadas 6 e 7. Nota-se que a forma do cavaco do cavaco entre as duas rodadas foi similar. Estas rodadas resultaram na melhor forma do cavaco associadas às menores temperaturas da peça.

Tabela 4.1 – Resultado da avaliação da forma do cavaco e temperatura no primeiro DOE

Variáveis de entrada				Resultado		
Rodada	f mm/rot	Vc m/min	Broca Geometria	Forma do cavaco	Avaliação	T °C peça
1	0,05	70	1		1	85
2	0,15	70	1		2	71
3	0,05	70	2		2	61
4	0,15	50	1		1	88
5	0,05	50	2		3	59
6	0,05	50	1		7	61
7	0,15	50	2		8	50
8	0,15	70	2		3	51
9	0,12	65	2		4	43

Observa-se que na rodada número 7 a temperatura da peça é mais baixa do que a rodada 6. Entretanto o cavaco da rodada 7 apresentou uma coloração mais escura, indicando que a temperatura durante o corte foi maior. O fato da temperatura da peça ser mais elevada na rodada 6, foi devido o tempo de duração da furação ser três vezes maior, em função do menor avanço ($f=0,05$ mm/rot). Desta forma houve mais tempo para o calor propagar-se para a peça.

4.1.2 Resultado dos fatores de influência na forma do cavaco

Os resultados obtidos na figura 4.1 são provenientes da tabela 4.1 referente ao primeiro DOE. Foram analisadas as variáveis que exercem maior influência na forma do cavaco. Neste caso os fatores importantes são respectivamente: Geometria da broca, velocidade de corte, e avanço.

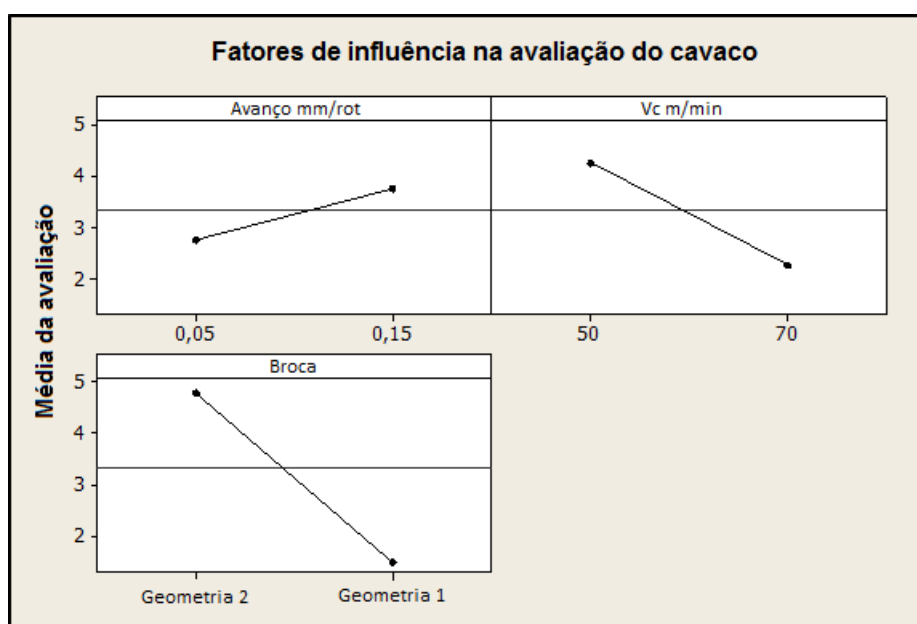


Figura 4.1 – Fatores que exercem maior influência no comportamento da forma do cavaco durante a furação utilizando sistema MQL.

Uma das principais dificuldades encontradas no processo de furação é a extração dos cavacos de dentro do furo (DINIZ *et al.*, 2006). Se os cavacos não forem forçados a sair do interior do furo, eles podem causar o entupimento do

mesmo, aumentando o momento torsor e por consequência a quebra da ferramenta. Neste estudo a furação profunda com o sistema lubri-refrigerante MQL com 10 bar de pressão, necessita cavacos curtos. Um dos responsáveis pela retirada do cavaco é o ar comprimido, que comparado a fluidos lubri-refrigerantes líquidos, possui menor densidade e conseqüentemente menor força de arrasto para a retirada dos cavacos. O ângulo de hélice do canal de saída de broca também é uma característica responsável pela retirada do cavaco para fora do furo. A forma do cavaco mais conveniente é a helicoidal; o cavaco em lascas é preferido somente quando houver pouco espaço disponível ou o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante como no caso da furação profunda (FERRARESI, 1995). Com base nestas afirmações obrigatoriamente o cavaco que deve ter a melhor avaliação é do formato de lascas ou vírgula, como alguns autores o denominam.

Concorda-se com KÖNIG e KLOCKE (1997), que as principais influências sobre a formação do cavaco são as condições de corte e a geometria da ferramenta. A quebra do cavaco pode ser obtida pela diminuição da deformabilidade do material da peça ou pelo aumento da deformação do cavaco. Como a capacidade de deformação do material depende da temperatura na região de corte, uma redução da velocidade de corte ou a refrigeração da região de corte levam a cavacos mais quebradiços. Os resultados obtidos estão condizentes com esta afirmação. As melhores avaliações dos cavacos obtidos no DOE foram com as velocidades de corte mais baixas. A figura 4.1 mostra que a velocidade de corte de 50 m/min apresentou cavacos mais curtos.

A utilização do método DOE correlaciona as variáveis possibilitando os melhores resultados. É possível verificar que a geometria da ferramenta associada aos parâmetros de corte possibilitou o melhor cavaco (tabela 4.1 rodada 7). A geometria do canal de saída de cavacos da broca tem relação direta com a afiação de ponta. A afiação cruzada associada à geometria do canal helicoidal necessita da correção do ângulo de saída. Esta afiação forma o ângulo de cunha da broca, conforme descrito na definição da ferramenta no capítulo 3. A eficiente quebra do cavaco esta associada ao ângulo de saída e a espessura do cavaco, fatores relativos à geometria da ferramenta e avanço respectivamente.

Com a análise do cavaco e considerando também o fator produtividade, a melhor escolha são os parâmetros da rodada número 7 com velocidade de corte de

50m/min, avanço de 0,15mm/rot e broca com geometria 2 de afiação cruzada desenvolvida para MQL.

4.1.3 Resultado dos fatores de influência na temperatura da peça.

A figura 4.2 mostra os fatores de maior influência na variação de temperatura da peça. Analisando os resultados obtidos, nota-se que os fatores que exerceram maior influência na temperatura da peça durante a furação, são consecutivamente: geometria da ferramenta, avanço e velocidade de corte.

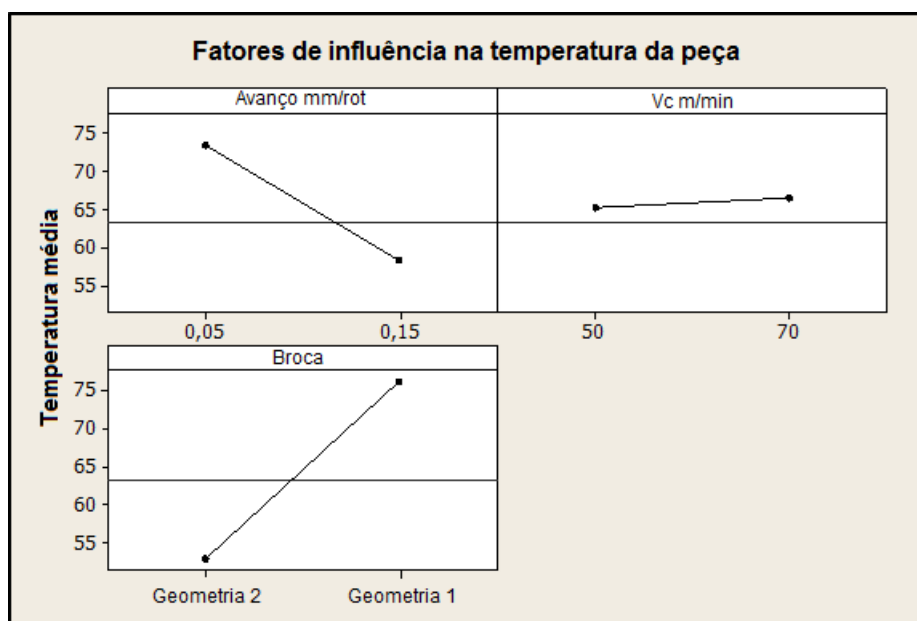


Figura 4. 2 – Fatores que exercem maior influência no comportamento de temperatura da peça durante a furação utilizando sistema MQL.

Algumas observações importantes são: o avanço exerceu grande influência, devido à variação entre o valor máximo e o valor mínimo ser de 300%, enquanto que a variação da velocidade de corte foi de 40%.

Segundo Zeilmann *et al.* (2006), a temperatura aumenta com o aumento da profundidade dos furos, devido ao atrito dos cavacos e a ferramenta na parede do furo. No atrito entre a parede do furo usinado e a broca, a lubrificação entre ferramenta e material da peça é garantida pelo lubrificante que adere à parede do

furo. Apenas uma quantidade mínima de lubrificante consegue entrar na interface ferramenta / parede do furo, de forma que com o aumento do percurso deslocado do ponto genérico da parede do furo sobre a guia, as propriedades do lubrificante vão se perdendo (devido ao aumento da temperatura, perda da viscosidade e até a vaporização do fluido de corte) e a partir de certo ponto, passa-se a atrito seco que eleva a temperatura e iniciam-se processos de desgaste por aderências.

A condutibilidade térmica dos corpos em contato e as dimensões das secções onde a temperatura dissipa é relevante (FERRARESI, 1995). Estas afirmações explicam o fato de que, com avanços menores a temperatura é maior. Devido ao maior tempo de contato entre peça e ferramenta, a temperatura gerada pelo atrito se dissipa para a região externa de medição da temperatura.

Com base nestas informações é possível explicar porque o formato geométrico da broca apresentou maior influência. As guias da broca com geometria 1 foram feitas em toda a extensão do canal de saída de cavacos, com comprimento de 66mm, enquanto as guias da broca com geometria 2 possuem comprimento de 30mm. Além disso, os diâmetros dos furos de refrigeração interna da broca com geometria 1, são menores. Conseqüentemente a vazão do meio lubri-refrigerante é reduzida comparado a geometria 2. O maior comprimento de guia provoca maior atrito da ferramenta na parede do furo. Os diâmetros menores dos furos refrigeração reduzem a quantidade de lubrificação. Este dois fatores provocam o aumento da temperatura.

4.1.4 Resultado do comportamento da temperatura e da forma do cavaco em função da Velocidade de corte e do avanço

A figura 4.3 mostra o comportamento da temperatura em função da velocidade de corte e avanço e também as formas de cavaco correspondentes a cada região. Com este resultado é possível visualizar a região com a melhor combinação dos parâmetros de corte.

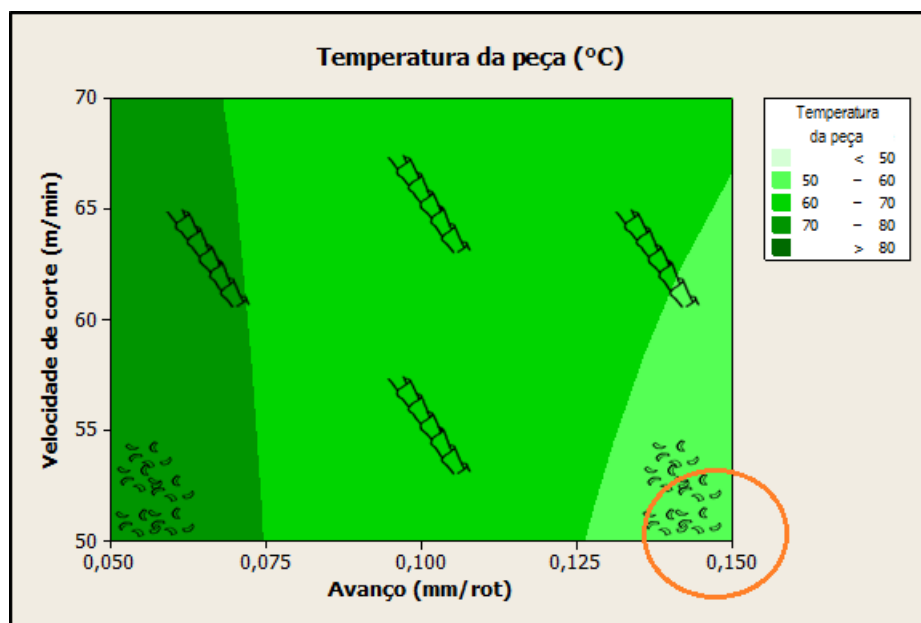


Figura 4. 3 – Correlação dos fatores de temperatura da peça e forma do cavaco em função da Vc e do avanço utilizando sistema MQL.

A maioria das ocorrências de alta temperatura da peça foi com avanços de 0,05mm/rot. A escolha das variáveis a serem analisadas e os resultados dos parâmetros de corte, foram determinados conforme as referências. O processo de mudança das condições de corte com o fim especial de obter uma forma adequada do cavaco deve ser fixado pelas condições econômicas de usinagem. Este processo foi aplicado em uma indústria de autopeças que busca constantemente o aumento de produtividade. Neste caso a velocidade de produção dos furos e a vida útil da broca são importantes. Os parâmetros de velocidade de corte de 50m/min e o avanço de 0,15mm/rot atendem ao ciclo planejado para a operação. Esta velocidade de corte esta abaixo de parâmetros recomendados para a utilização, com fluido lubri-

refrigerante convencional, óleo integral mineral 10 mm²/s. Porém, o alto avanço compensa a perda de produtividade em função da velocidade de corte com sistema MQL ser reduzida.

4.1.5 Resultados da medição da força de avanço

A figura 4.4 mostra os resultados da força de avanço em função da velocidade de corte e avanço, com a utilização do sistema lubri-refrigerante MQL e broca com geometria 2.

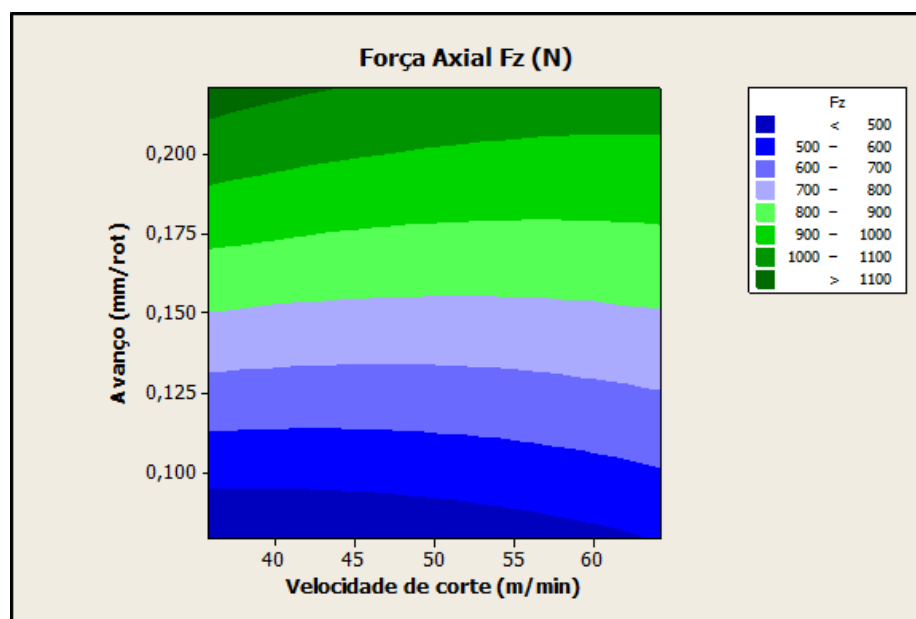


Figura 4. 4 – Força axial em função de velocidade de corte e avanço.

Este resultado mostra que quanto menor for o avanço, menor é a força de penetração da broca. Segundo Stemmer (2006), a força de penetração da broca é composta por três fatores: O esforço de corte nos dois gumes principais, (40% a 50%); o esmagamento do material no gume transversal, (45% a 58%); o atrito das guias da broca e dos cavacos na parede do furo, (2% a 5%). Conforme analisado anteriormente os valores de temperatura são maiores com menores avanços, enquanto que os valores de força de avanço são proporcionais ao avanço. Ou seja,

quanto menor for o avanço menor a força de penetração. Com esta análise é possível afirmar que a temperatura elevada da peça não é proveniente de esforços de corte elevados, mas principalmente pelo maior intervalo de tempo, em que ocorre o atrito das guias e do cavaco na parede do furo.

A velocidade de corte exerce baixa influência no resultados de força, porém é possível verificar que com velocidades de corte menores as forças de avanço são maiores. De acordo com König e Klocke (1997), a redução da velocidade de corte é um fator de aumento da deformação do cavaco, conseqüentemente o aumento da força de corte. Esta análise de força confirma a assertividade da metodologia usada nos experimentos, para encontrar as velocidades de corte, avanço e geometria da ferramenta para furação profunda com broca helicoidal e MQL.

4.1.6 Resultados do teste de longa duração utilizando jorro de óleo pressurizado

O objetivo principal deste experimento é verificar a diferença relativa ao desgaste da ferramenta comparando os dois sistemas lubri-refrigerantes deste trabalho. O primeiro caso analisado foi com fluido lubri-refrigerante convencional, com óleo integral de 10 mm²/s pressurizado a 50 bar, broca geometria 1, velocidade de corte de 80 m/min e avanço de 0.1 mm/rot. Conforme estratégia descrita no capítulo 3, após 300 furos ou 21 metros lineares furados, houve uma mudança da forma do cavaco de lascas para fita. Esta modificação indicou a mudança na geometria de corte da ferramenta, assim o teste foi interrompido para análise da ferramenta. A figura 4.5 mostra alguns desgastes gerados durante a furação.

A figura 4.5 (a) mostra o canal de saída de cavacos da broca, é possível verificar regiões mais claras onde houve o deslocamento do revestimento, deixando o substrato da ferramenta exposto. A figura 4.5 (b) mostra a região ampliada da aresta de corte sem o revestimento TiAlN. A ausência do revestimento deixa o substrato exposto na região de corte, nesta condição os mecanismos de desgaste aceleram a deterioração da geometria da corte da ferramenta, modificando a forma do cavaco a temperatura e os esforços envolvidos no processo. Esta condição

acelera de forma exponencial o desgaste da broca, que rapidamente pode chegar ao colapso indesejável.

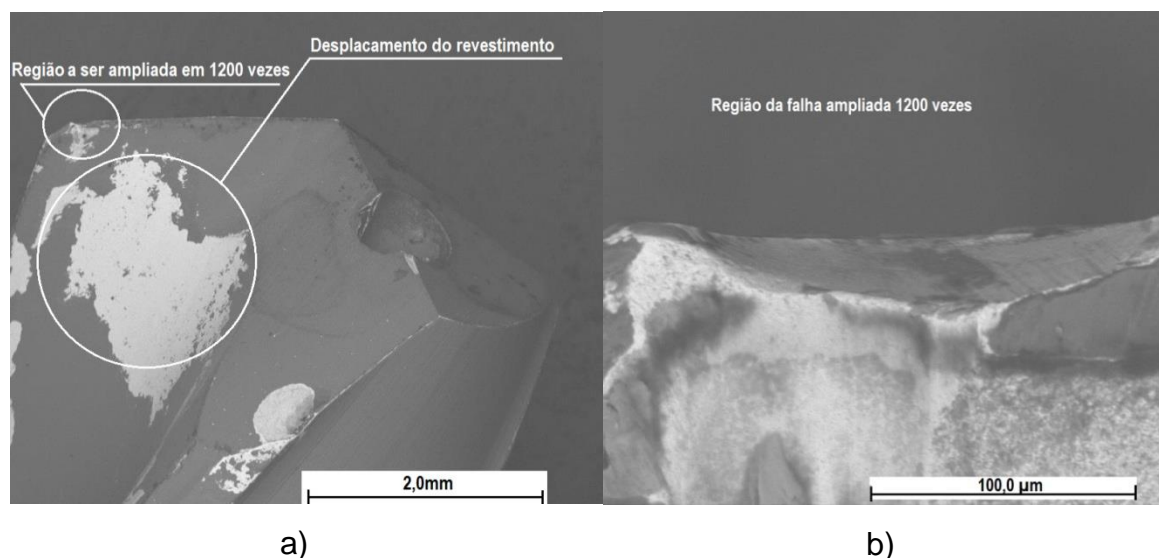


Figura 4.5 – Broca Ø 4,8 TiAlN 300 furos com sistema lubri-refrigerante convencional óleo integral, (a) broca com ampliação de 50 vezes e (b) detalhe do desgaste com ampliação de 1200 vezes

Segundo Oliveira *et al.* (2010), a partir do momento que o revestimento não esta mais presente se intensificam os mecanismos de desgaste. Mattox (1998), afirma que o deslocamento ou delaminação de um revestimento pode envolver tanto falha adesiva como coesiva. De acordo com Rosa (2013), o revestimento pode falhar em diversos modos, mas a delaminação e a fratura são as falhas mais observadas em ferramentas de corte. A delaminação de um revestimento refere-se à perda de adesão do revestimento com o substrato, e se as tensões residuais do revestimento são de compressão, geralmente envolve a formação de bolhas. Tensão residual, tensão térmica, ataque ambiental e tensão de impacto ou contato são frequentemente citados como causas de delaminação.

Analisando a figura 4.5 (a) é possível verificar que a região da aresta de corte não possui delaminação. Portanto, provavelmente houve um problema na adesão do revestimento na superfície da ferramenta, que se agravou devido a solicitações térmicas provenientes do processo com meio lubri-refrigerante convencional. O sistema lubri-refrigerante a jorro proporciona um resfriamento rápido da região de corte acelerando a fadiga térmica da região.

Outro mecanismo de desgaste com grande influência é a abrasão. DINIZ *et al.* (2006) e MATTES (2009) comentam que esta forma de desgaste se torna mais

intensa com o aumento no número de inclusões e partículas duras no material usinado, tais como: carbonetos e óxidos. Estes constituintes são facilmente encontrados em aços ao cromo com tratamento térmico de têmpera. Agravado pela alta velocidade de corte utilizada neste teste.

4.1.7 Resultados do teste de longa duração utilizando MQL

O segundo caso analisado no teste de vida útil foi com fluido lubri-refrigerante MQL, com óleo sintético a 43 mm²/s pressão a 10 bar de pressão, broca geometria 2, velocidade de corte de 50 m/min e avanço de 0.15 mm/rot, utilizando o mesmo critério de mudança da forma do cavaco.

Após 800 furos, 56 metros lineares furados, houve uma pequena diferença na forma do cavaco, neste momento o teste foi interrompido para análise no MEV. A figura 4.6 (a) foi feita com ampliação de 50 vezes e a figura 4.6 (b) foi com ampliação de 1200 vezes. Foram constatadas pequenas avarias na ferramenta, geradas por abrasão e micro-lascamentos que provocaram a exposição do substrato. Esta região está disposta à concentração de tensões, devido o canto vivo formado entre a guia e o canal de saída da broca.

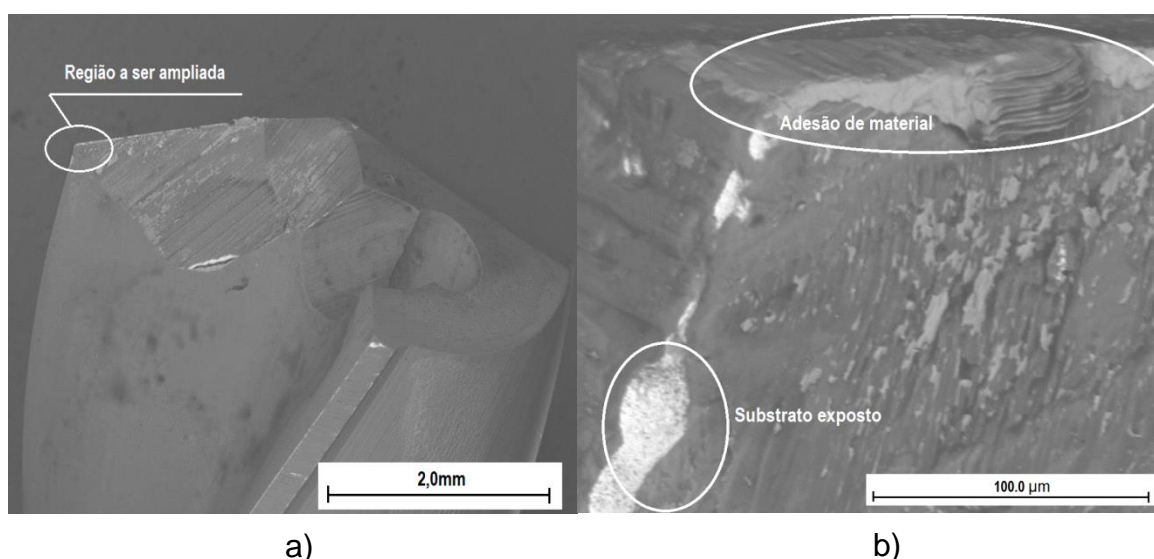


Figura 4. 6 – Broca Ø 4,8 TiAlN 800 furos com sistema lubri-refrigerante MQL, (a) broca com ampliação de 50 vezes e (b) detalhe do desgaste com ampliação de 1200 vezes

Neste caso a mudança de comportamento do cavaco foi oriunda da adesão de material na aresta de corte, também denominada de aresta postiça de corte. É possível verificar na figura 4.6 (b) que há material da peça aderido na superfície de folga da ferramenta (região circulada) e pequenas quantidades podem ser observadas na superfície de saída da broca. Fenômeno explicado por Ferraresi (1995), que relata que em velocidades de corte baixas, os desgastes das ferramentas ocorrem predominantemente devido à adesão, ou seja, por causa do cisalhamento da aresta postiça de corte. Na medida em que se eleva a velocidade de corte, aumenta a participação das componentes que dependem da temperatura, tais como a abrasão, difusão e a oxidação. Os únicos mecanismos de desgaste presentes em todas as faixas de velocidade de corte são a deformação e a abrasão. Porém ao comparar os resultados do meio lubri-refrigerante convencional e MQL, é possível verificar que os danos ocorridos na ferramenta que utilizou MQL foram menores, e que a condição do revestimento esta mais íntegra.

As condições estabelecidas para este processo como: parâmetros de corte, geometria da ferramenta e parâmetros do MQL são fundamentais para atingir a produtividade máxima no processo, que resultou em 500 furos (35 metros lineares de furação) a mais do que o processo convencional a jorro. Este resultado mostra a eficácia do processo de furação profunda utilizando o sistema lubri-refrigerante MQL.

4.1.8 Resultados da integridade superficial do furo utilizando MQL

A fim de verificar a integridade superficial do furo foram analisados danos provenientes da influência térmica e danos por deformação plástica na superfície do furo. As figuras 4.7 (a), (b) mostram um corte paralelo ao eixo do furo que possibilita a análise da influência do corte da ferramenta no material.

A figura 4.7 (a) mostra o corte do material furado com sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo pressurizado. Neste caso, observa-se que na região circulada alguns defeitos superficiais são deixados pela ferramenta durante a furação, tais como: deformações plásticas e dobras de material na superfície do furo que atingiram profundidades de 6 μm , (Linha de coloração mais clara na superfície

do furo). Não foram encontrados danos de origem térmica no material, provenientes da temperatura durante a furação.

A figura 4.7 (b) mostra o corte do material furado com sistema lubri-refrigerante MQL, neste caso observa-se que a linha de coloração mais clara entre a superfície do furo e o material é maior com $14\ \mu\text{m}$. Esta linha representa as deformações plásticas e dobras deste processo de furação. Não foram encontrados danos no material, provenientes da temperatura durante a furação.

Observa-se que a integridade superficial do furo foi mais afetada com os parâmetros do processo utilizando o sistema MQL.

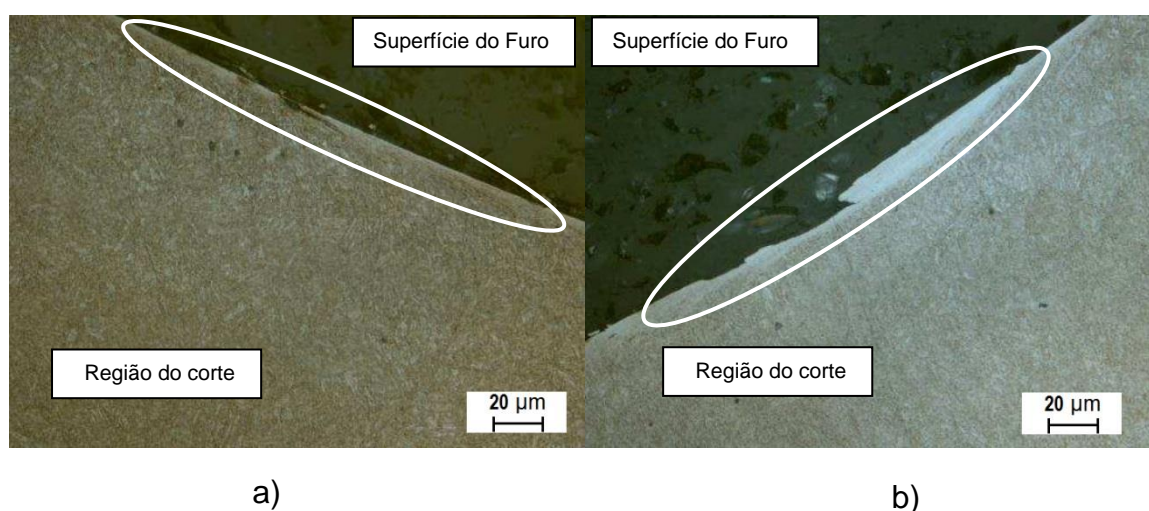


Figura 4. 7 – Deformações ocorridas na parede do furo, (a) teste com sistema lubri-refrigerante convencional óleo integral. (b) teste com sistema lubri-refrigerante MQL.

Em componentes sujeitos a solicitações mecânicas cíclicas, a análise da integridade da superfície é importante, pois deformações plásticas podem ocasionar trincas durante o funcionamento. Segundo Jawahir *et al.* (2011), nestes casos a qualidade superficial deixa de ser um fator que depende somente da rugosidade e das ondulações da superfície, o autor define o conceito de integridade superficial como a condição inerente ou aprimorado de uma superfície produzida por processo de usinagem. Neste contexto, observa-se que na figura 4.7 (a) usinada com processo lubri-refrigerante convencional a jorro de óleo, os defeitos na superfície do furo foram menores quando comparados ao processo com MQL, provavelmente em função do menor avanço empregado no processo.

A figura 4.7 (b) mostra o processo que utilizou os parâmetros de corte provenientes dos testes e MQL, neste caso a velocidade de corte é menor e o avanço é maior. Para esta condição a integridade da superfície piorou, com deformações plásticas de até 14 μ m de profundidade. Estas deformações são semelhantes ao estudo de Zeilmann *et al.* (2012), que relatou que com o aumento da velocidade de corte e avanço a deformação plástica aumenta. Neste caso o fator que contribuiu intensamente para o aumento da deformação plástica foi o avanço. As deformações plásticas são provenientes dos esforços e conforme visto anteriormente o avanço esta diretamente relacionada à força de avanço.

Houve também a presença de material aderido na superfície, Nicola *et al.*, (2010), dizem que: O escoamento do cavaco durante o processo de corte faz com que uma porção do material deslize entre o flanco da ferramenta e a peça. As temperaturas geradas no processo de corte auxiliam na redução da resistência mecânica do material fazendo com que o material escoado plastifique sobre a superfície e seja comprimido contra a mesma, caracterizando uma superfície com material micro soldado por um fenômeno comumente chamado de caldeamento. Com as condições usinadas a menores velocidades de corte à maior presença de material aderido a superfície.

A finalização desta fase experimental instigou a análise de alguns fenômenos envolvidos no processo com MQL. Assim foi proposto uma furação com grau de dificuldade maior, de 24 vezes o diâmetro com broca de 4 mm.

4.2 RESULTADO EXPERIMENTAL DA SEGUNDA FASE

Os resultados experimentais da segunda fase foram obtidos com broca de diâmetro de 4 mm, e com 96mm de profundidade ($L/D=24$). Foram empregados conceitos semelhantes, porém, devido a maior dificuldade desse processo, a forma de medição dos cavacos passou de qualitativa para quantitativa. A forma do cavaco foi classificada por valores relativos à sua massa e volume.

4.2.1 Resultado do comportamento da temperatura do processo entre os sistemas lubri- refrigerantes.

Os resultados deste teste foram obtidos com todos os parâmetros do processo inalterados, como: mandril, broca, velocidade de corte e avanço, variando somente o sistema lubri-refrigerante. As figuras 4.8 e 4.9 mostram os comportamentos das temperaturas no momento da passagem da ferramenta pelo sensor.

Para análise da temperatura é importante considerar que existe um espaço de um milímetro entre a ponta do sensor termopar e a parede do furo analisado. O tempo é contado a partir do início da medição até o ponto máximo, como mostram as curvas de medições de temperatura (figura 4.8 e 4.9). Nestes resultados foram desprezados os cálculos de condução inversa, uma vez que o objetivo principal é verificar a diferença de temperatura entre os dois sistemas. Alguns estudos que empregaram o método de condução de calor inverso utilizaram técnicas para monitorar temperatura, com o emprego de termopares inseridos na peça de trabalho, para gravar as temperaturas durante o processo. O método inverso de condução de calor considera o fluxo de calor e o coeficiente de convecção do processo de furação. (COTTA *et al.*, 2009; LUCHESI *et al.*, 2012; BRANDÃO *et al.*, 2011).

Neste experimento a temperatura da aresta de corte é maior do que foi registrada próxima à parede do furo.

A figura 4.8 mostra o comportamento da temperatura na furação convencional com jorro de óleo. Após a última medição realizada a ferramenta é retirada do furo e ocorre o resfriamento a temperatura do ambiente.

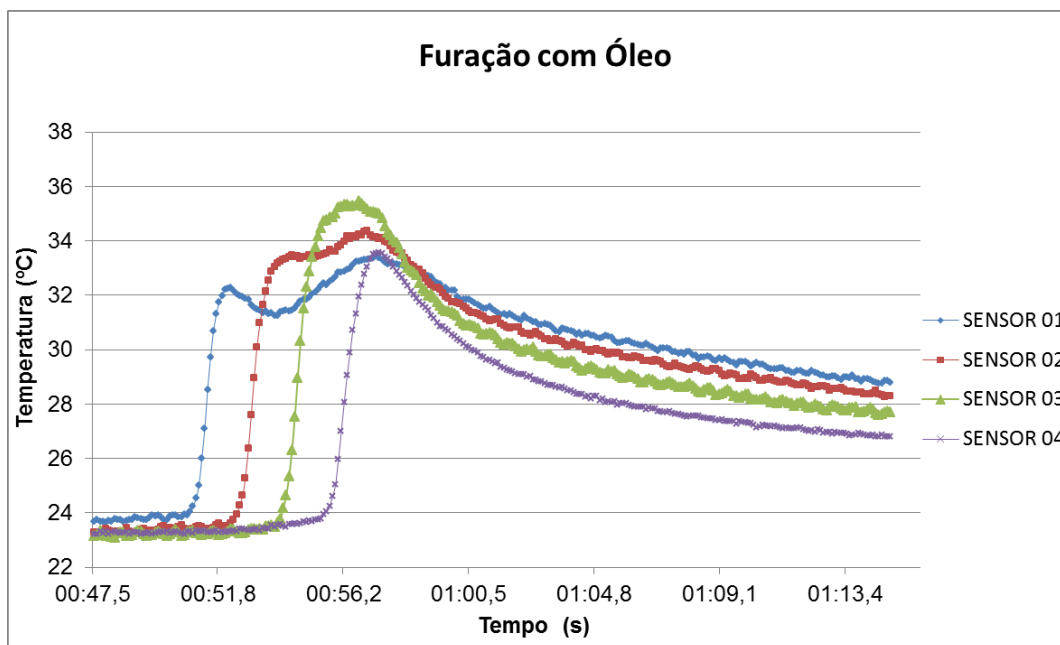


Figura 4. 8 – Medições da temperatura durante a furação com sistema lubri-refrigerante convencional

Foi possível verificar que o sensor 1 registrou a menor temperatura, neste momento todo o sistema que compõe a medição não teve influência térmica da usinagem. Porém é possível perceber uma anomalia no início do resfriamento, novamente a temperatura volta a subir, influenciando a medição dos sensores 2 e 3. Um efeito semelhante aconteceu no experimento de ZEILMANN *et al.* 2006, cuja a explicação é que, devido o excesso de cavaco emaranhado em torno da ferramenta, ocorre o aumento do contato do cavaco com a parede do furo, propiciado um aumento no momento torçor. Outro fator a considerar é o aumento da temperatura ocasionado pela maior área de contato entre a ferramenta e a parede do furo. A maior temperatura registrada foi de 35,45 °C no sensor 3 porém, com influência do atrito do cavaco na parede do furo. Para a comparação entre os sistemas lubri-refrigerantes foi considerada a média de 34°C.

A figura 4.9 mostra os resultados obtidos com sistema lubri-refrigerante MQL, utilizando as mesmas condições de obtenção dos dados descritas anteriormente.

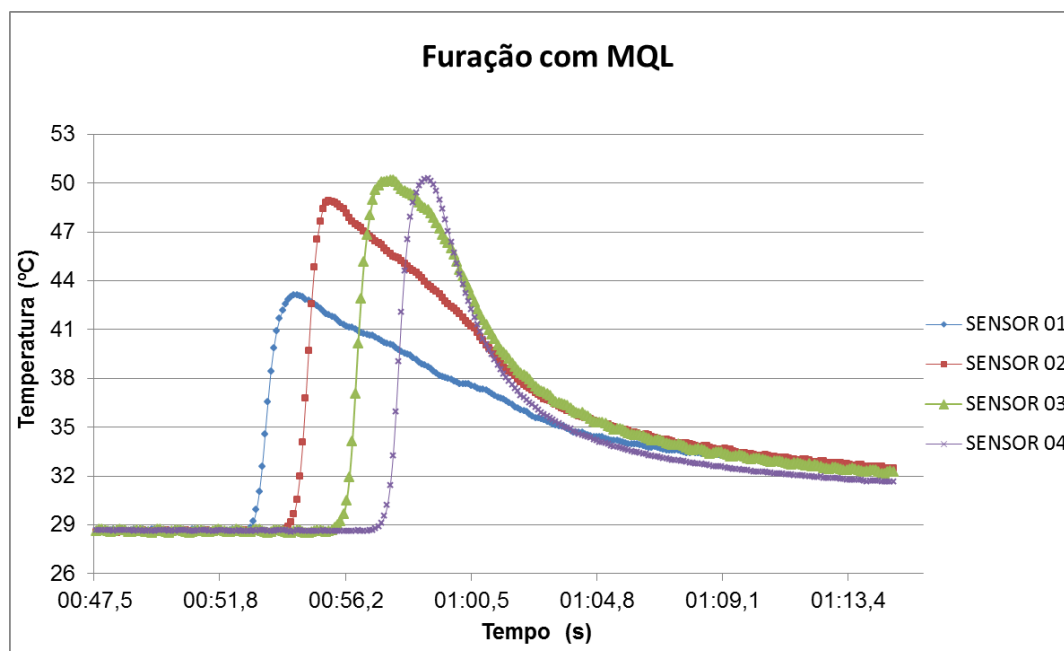


Figura 4. 9 – Medições da temperatura durante a furação com sistema lubri-refrigerante convencional

O resultado da medição de temperatura com sistema lubri-refrigerante MQL mostrou um comportamento esperado, conforme as discussões anteriores. Neste caso ocorre o acréscimo significativo da temperatura com o aumento da profundidade do furo. Após a medição feita pelo sensor 2, houve o aumento constante relativo as medições anteriores. Para verificar a diferença de temperatura entre os dois casos foram levados em conta à diferença de 5°C antes do início da furação. Observa-se que para os dois experimentos a temperatura média foi de 11°C maior no sistema MQL. Portanto, comprova-se que a furação com sistema lubri-refrigerante MQL gera maior calor e maior temperatura de corte em relação ao jorro de óleo convencional integral pressurizado.

Segundo Zeilmann *et al.* (2006), e Astakhov (2006), as temperaturas afetam o comportamento do material, isto é, com o aumento da temperatura, há uma tendência de diminuição dos esforços de penetração, principalmente na força de avanço. Com esta observação é possível explicar que, a força de avanço é reduzida principalmente quando é atingida a temperatura ótima de corte. Esta temperatura

proporciona condições favoráveis ao corte e conseqüentemente há uma tendência e estabilização da temperatura durante o corte. ASTAKHOV (2006) define este fenômeno como temperatura ótima de corte.

Com a comprovação de que o processo com MQL gera maior temperatura, torna-se fundamental a eficiência dos revestimentos em brocas de pequeno diâmetro, para as furações profundas, pois o revestimento protege o substrato de metal-duro e a integridade da geometria de afiação da ferramenta. (HEINEMANN, 2005)

Os resultados analisados nas medições de temperatura, entre os sistemas lubri-refrigerantes evidenciam a importância de um método adequado para escolha dos parâmetros de corte. Assim como a escolha da geometria da broca e o tipo de revestimento, que precisa ser resistente a altas temperaturas durante a usinagem.

As definições adequadas são fundamentais para o bom resultado nas aplicações do sistema lubri-refrigerantes MQL.

4.2.2 Resultados da Qualidade do furo

Os corpos de prova do teste de temperatura também foram empregados para análise da forma, rugosidade e diâmetro do furo. Estes resultados mostram somente a influência dos sistemas lubri-refrigerantes. Os parâmetros de corte, ferramentas, mandris e outras variáveis não foram alterados. Devido ao pequeno número de medições este experimento foi inconclusivo, os resultados apenas indicam alguns valores para análise do comportamento das grandezas comparado aos resultados de outros autores. Os resultados mostrados na tabela 4.2 são as medições de circularidade, diâmetro e de rugosidade dos furos de 4 mm.

Tabela 4.2 – Resultado das características de dimensionais e de formas entre os dois sistemas.

	Circularidade (μm) Prof.10mm	Circularidade. (μm) Prof.20mm	Circularidade (μm) Prof.30mm	\varnothing 4mm Prof.10mm	\varnothing 4mm Prof.20mm	\varnothing 4mm Prof.30mm	Ra 20mm	Rz 20mm	Rt 20mm
MQL	0,0037	0,0068	0,0106	4,015	4,017	4,017	0,44	4,55	7,31
ÓLEO	0,0025	0,0016	0,0023	4,012	4,011	4,011	0,43	5,72	7,82

Apesar de uma variação micrométrica entre os furos feitos com diferentes sistemas lubri-refringentes, é possível verificar que os valores de diâmetro para a furação com MQL são maiores do que os furos feitos com lubri-refrigerante a óleo. Estes resultados estão são semelhantes aos do estudo de Zeilmann (2003) que afirma que o aumento do diâmetro é resultante do aumento da temperatura na região de corte. A temperatura gerada no MQL é superior que a obtida com sistema lubri-refrigerante convencional a jorro, tem-se então uma maior dilatação da broca e, conseqüentemente, um maior diâmetro.

Observa-se na furação com jorro de óleo os maiores resultados de rugosidade Rz e Rt, que provavelmente foram afetados pelo atrito do cavaco na parede do furo. Esta condição foi observada no teste de temperatura, cuja medição foi influenciada pelo arraste de cavacos na parede do furo.

A característica do furo que apresentou maior influência do sistema lubri-refrigerante foi a circularidade. A figura 4.10 possui linhas de referência regulares (vermelhas) e três linhas irregulares (azuis) que mostram os resultados da circularidade das medições em três profundidades diferentes do furo.

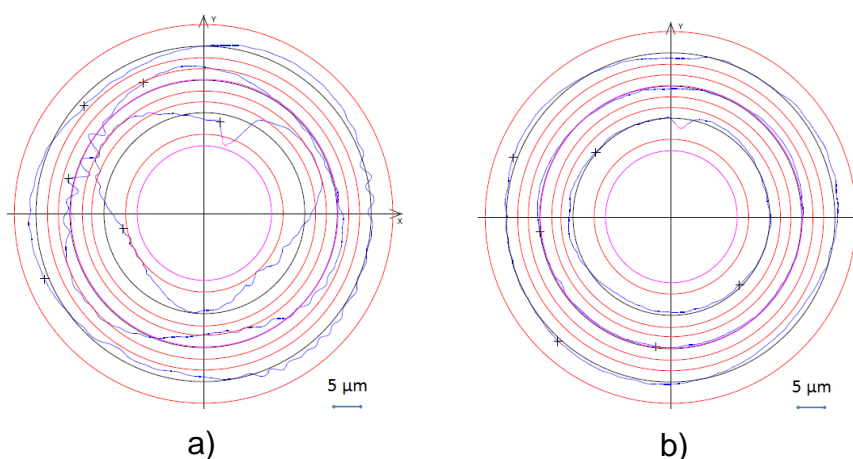


Figura 4. 10 – Medições da circularidade dos furos com profundidades de 10; 20 e 30mm.
(a) furo com MQL (b) furo com sistema lubri-refringente convencional

Nota-se que com o aumento da profundidade a circularidade piorou. Este comportamento pode ser explicado quando, comparado com a análise do comportamento da temperatura, do item anterior. À medida que aumentou a profundidade do furo a temperatura também aumentou. Com o aumento da temperatura aumenta a ocorrência do caldeamento, neste caso Zeilmann (2003),

explica que os caldeamentos são os principais responsáveis pelos grandes erros de circularidade. Com a utilização do sistema MQL a frequência dos defeitos na superfície do furo aumentam, influenciando diretamente na circularidade do furo.

Estes resultados mostram que a qualidade do furo, sofre maior influência com o sistema MQL, devido à quantidade mínima de lubrificante, entre as guias da broca e a parede do furo. Nesta condição ocorre o aumento da temperatura, provocando a redução da viscosidade do óleo, que por sua vez aumenta o atrito na parede do furo, ocasionando maiores danos superficial.

4.2.3 Análise da forma dos cavacos em função do coeficiente volumétrico

A tabela 4.3 mostra os resultados de coeficiente volumétrico e temperatura em cada rodada do DOE. Nas rodadas 4 e 11 foram obtidos os menores coeficientes volumétricos dos cavacos.

Tabela 4.3 Rodadas do DOE furo de 24 vezes o diâmetro

Rodada	Variáveis de entrada		Resultados			
Cavaco	Vel. Corte (m/min)	Avanço (mm/rot)	Temperatura (°C)	Massa(g)	Volume(cm³)	Coeficiente Volumétrico
1	75	0,10	74	7,87	40	39,90
2	50	0,10	106	23,7	35	11,59
3	50	0,13	55	23,7	22	7,29
4	25	0,10	64	19,57	13	5,21
5	50	0,15	48	16,68	15	7,06
6	50	0,05	80	19,95	21	8,26
7	50	0,10	44	14,11	25	13,91
8	68	0,14	43	18,35	20	8,56
9	50	0,10	61	12,53	18	11,28
10	63	0,10	56	20,47	17	6,52
11	32	0,14	64	27,69	24	6,80
12	32	0,06	84	28,42	30	8,29
13	68	0,06	80	18,28	35	15,03

Os resultados de temperatura e coeficiente volumétrico de cada rodada foram inseridos no software Minitab™, que possibilita escolher a maior correlação entre a menor temperatura da peça, e o menor coeficiente volumétrico do cavaco. Desta

forma, foram obtidas as curvas relativas aos resultados de temperatura e coeficiente volumétrico (Figura 4.11).

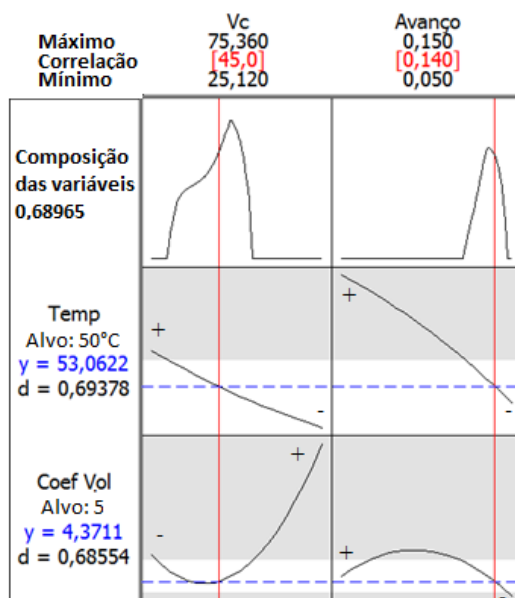


Figura 4. 11 – Correlação entre os parâmetros de corte, temperatura da peça e coeficiente volumétrico do cavaco

Com a análise destas curvas é possível escolher os parâmetros de corte e verificar qual a melhor correlação entre o menor coeficiente volumétrico e a menor temperatura. Neste caso foram escolhidos valores de velocidade de corte de 45 m/min e avanço de 0,14mm/rot. Estes parâmetros de corte resultaram em uma composição de aproximadamente 69% para atingir os alvos atribuídos de 50°C e coeficiente volumétrico igual a 5. Esta análise da combinação de velocidade de corte e avanço possibilita o ganho de produtividade reduzindo o tempo de furação.

Dada à complexidade da furação com a relação $L/D=24$ com a utilização do sistema MQL, a escolha de parâmetros adequados é fundamental para estabilidade do processo e durabilidade da ferramenta. O emprego do método de análise quantitativa do cavaco, e a medição da temperatura da peça, através dos dados coletados no DOE, gerou a formação do gráfico de superfície da figura 4.12. Este gráfico possibilita a análise das áreas de interesse, para a escolha dos parâmetros. Permitindo ajustes durante a implantação do processo na área de manufatura, adaptando-se a condições diversas e condições econômicas de corte.

A figura 4.12 mostra os resultados dos experimentos e o ponto de correlação escolhido, em função da velocidade de corte e do avanço. É possível observar que as regiões de interesse correspondem as menores velocidades de corte, e os maiores avanços. Característica encontrada na primeira fase do experimento.

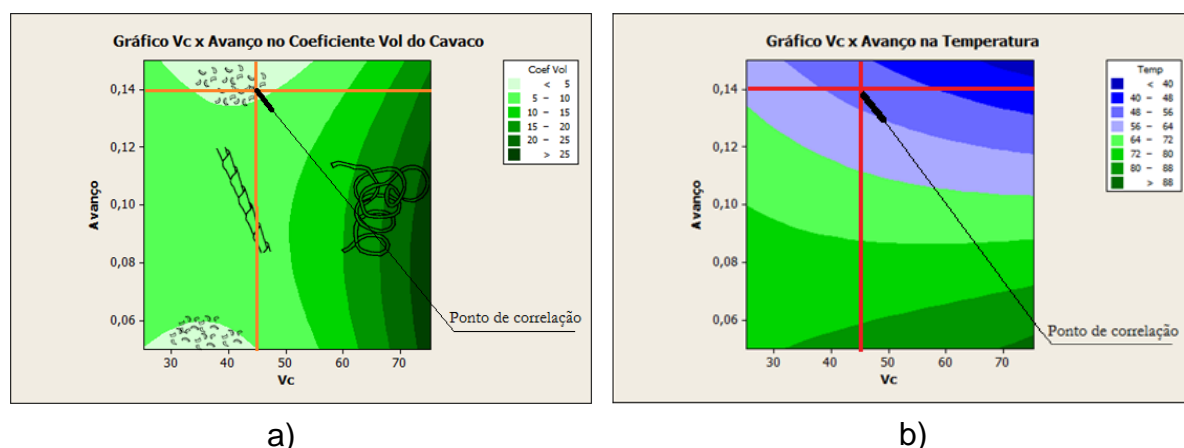


Figura 4. 12 – Figura (a) os resultados de menor coeficiente volumétrico. Figura (b) de menor temperatura da peça.

Em furações profundas, a forma do cavaco é importante devido ao alto volume de cavaco retirado e o pequeno espaço entre a broca e o furo para a retirada do cavaco. Por este motivo, a escolha dos parâmetros adequados, que possibilitem a formação destes tipos de cavacos é importante. Wosniak (2011) afirma que o cavaco em forma de lascas é gerado em determinadas combinações de parâmetros (V_c e avanço), no entanto o motivo da sua formação é a diminuição do grau de deformação por uma curvatura menor do cavaco. A formação do cavaco é basicamente influenciada pela deformabilidade, ductilidade e resistência do material da peça. O efeito dos parâmetros na queda da ductilidade do material é justificado pela primeira lei da usinagem de Makarow (1976). Quando o material é levado à temperatura igual à temperatura de corte ótima, é alcançado também o mínimo alongamento que representa a deformação na fratura do material. Este menor alongamento ou diminuição da ductilidade, geralmente leva a uma melhor quebra do cavaco.

Considerando estas explicações, a variação dos parâmetros resulta em várias formas de cavaco, cuja relação é direta com, o material a ser usinado, a geometria da ferramenta e os meios lubri-refrigerantes. Os meios lubri-refrigerantes interagem

na passagem do material da peça sobre a superfície da ferramenta, influenciando na curvatura do cavaco, devido à resistência imposta pelo atrito entre a superfície da ferramenta e o material da peça. Todos estes aspectos influenciam na temperatura durante o corte. Isto explica a particularidade dos parâmetros de cada processo com utilização de MQL ou jorro de óleo

4.2.4 Determinação do limite da quantidade de furos para o comparativo entre os sistemas lubri-refrigerantes

Para estabelecer um comparativo entre os sistemas lubri-refrigerantes, parâmetros de corte e os revestimentos TiAlN e AlCrN-based, foi feito um novo experimento. Neste comparativo, foram feitos furos com uma ferramenta revestida com TiAlN e parâmetros comerciais de $V_c=62\text{m/min}$ e $f=0,06\text{mm/rot}$ e sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo pressurizado.

Após 240 furos realizados totalizando 22 metros furados linearmente, houve a mudança da forma do cavaco passando do formato de lascas conforme figura 4.13 (a), para fitas conforme figura 4.13 (b). A mudança na forma do cavaco ocorreu devido, um desgaste abrasivo na superfície de saída do cavaco e pequenos lascamentos nas quinas das ferramentas.

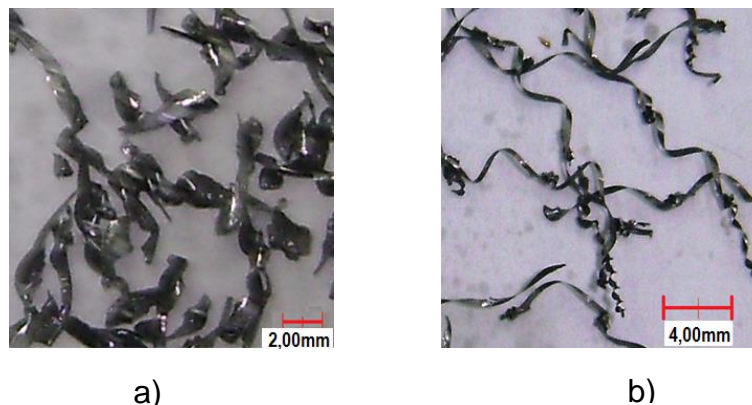


Figura 4. 13 – Figura (a) forma dos cavacos com ferramenta íntegra. Figura (b) Forma dos cavacos após danificação do gume com 240 furos.

Com este resultado foi estabelecido à vida útil de 200 furos para análise do revestimento da ferramenta e dos parâmetros de corte escolhidos no DOE. Este teste comprova a eficácia das condições escolhidas.

4.2.5 Resultados do desgaste de flanco (Vb)

A principal forma de análise de desgaste em uma broca é através do desgaste de flanco (DINIZ *et al.*, 2006). Porém durante os experimentos notou-se que, o desgaste de flanco foi inexpressível, quando comparado ao desgaste na superfície de saída da broca.

A figura 4.14 (a)(b) mostra a região onde ocorre o desgaste principal em brocas, denominado desgaste de flanco “Vb”.

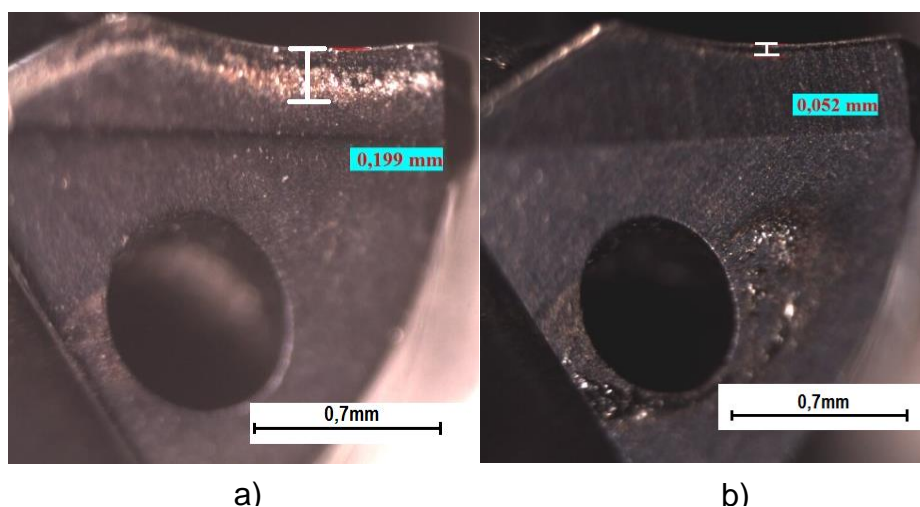


Figura 4. 14 – Figura (a) Broca com TiAlN que utilizou avanço de 0,15mm/rot, Vc 45m/min e MQL.
Figura (b) broca com TiAlN que utilizou avanço 0,06mm/rot e Vc 60m/min e MQL.

Neste caso a figura 4.14 (a), mostra a broca revestida com TiAlN, que utilizou avanço de 0,15mm/rot, Vc 45m/min e apresentou uma marca com 0,199mm na superfície de folga após 200 peças. Esta marca é resultado da abrasão do material na superfície de saída da broca, neste caso iniciou o desgaste do revestimento. Nota-se que esta broca possui um marca maior do que a região mostrada na figura 4.14 (b) que foi de 0,052 mm. Isto ocorreu pela diferença de avanço empregado

durante os testes, na figura 4.14 (b) a broca utilizou avanço de 0,06mm/rot e V_c 60m/min. Ambas utilizaram MQL. Quanto maior for o avanço empregado na furação, maior é a força de avanço e maior é a penetração da broca no material, com esta condição o ângulo de folga penetra mais no material, aumentando o esforço e o desgaste nesta região. Em casos de avanços elevados, pode ocorrer a fratura da aresta da ferramenta que não resiste à força de avanço (ZEILMANN *et al.*, 2011).

4.2.6 Resultados dos comparativos entre tipos de revestimentos, sistemas lubri-refrigerantes e parâmetros de corte

A figura 4.15 mostra os resultados obtidos relativos a revestimento TiAlN, com os parâmetros de corte de 62m/min e 0,06 mm/rot e sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo. Para caracterizar as superfícies das arestas das brocas foi utilizada a técnica MEV, possibilitando a visualização do detalhe da ferramenta com ampliação de 600 vezes. Para a análise das composições química dos materiais presentes na aresta da broca, foi utilizado o sistema EDS.

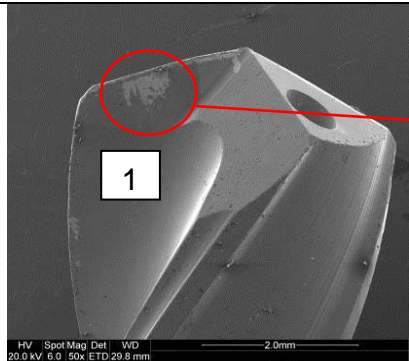
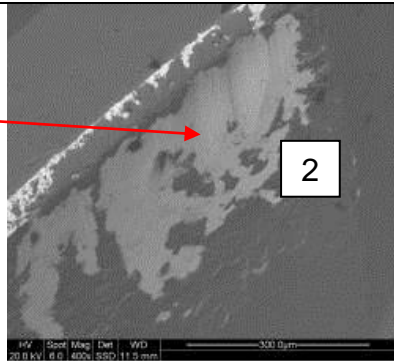
1-Revestimento de TiAlN utilizando fluido-lubri-refrigerante com jorro de óleo						
Zoom 50x	Zoom 600X				Resumo	
					<p>Delaminação do revestimento, substrato exposto.</p> <p>Desgaste na aresta por abrasão e início da formação de desgaste de cratera.</p>	
<p>Elemento % / Região da broca</p> <p>Ti</p> <p>Al</p> <p>N</p> <p>C</p> <p>W</p> <p>Co</p>	38,73	18,16	38,48	x		
<p>1-Revestimento (região escura)</p> <p>2-Substrato (região clara)</p>	x	x	x	12,43	69,29	9,20

Figura 4.15 – Broca \varnothing 4mm revestimento TiAlN, utilizado jorro de óleo, V_c 62 m/min e f 0,06 mm/rot com análise química na região de corte da broca

Os elementos mais significativos e suas proporções estão listados abaixo das imagens, que é destacada pela diferença de tonalidade. A região 1 é mais escura e representa o revestimento, os materiais encontrados nesta região com análise próxima a aresta de corte, foram: nitrogênio, alumínio e titânio, que são os materiais provenientes do revestimento TiAlN. A tonalidade mais clara é a região 2 da ferramenta que foi analisada quimicamente, apresentando maiores percentuais de cobalto e tungstênio, materiais provenientes da liga do metal-duro.

Nota-se na imagem da aresta da ferramenta que houve o desgaste do revestimento. Possibilitando o desgaste abrasivo e iniciando a formação do desgaste de cratera. Com a ausência do revestimento o substrato da ferramenta fica exposto, acelerando os mecanismos de desgaste, devido sua resistência ser menor quando comparado à resistência do revestimento.

Nos resultados da primeira fase (figura 4.5), foi apresentada uma condição semelhante com a utilização de revestimento de TiAlN e fluido-lubri-refrigerante a jorro de óleo. Nota-se o mesmo comportamento de desgaste da ferramenta, com a delaminação do revestimento. Este resultado descarta uma possível falha no revestimento, e reforça a influência da fadiga térmica.

Devido ao melhoramento térmico do revestimento com tribofilmes protetivos, o calor é largamente transferido para o cavaco, que amolece sua superfície, e o fluxo de metal na interface cavaco/ferramenta se torna maior. Sabe-se que a temperatura durante a furação com jorro de óleo é menor comparativamente ao MQL, fato este, ocorrido pela velocidade de troca térmica com sistema a jorro ser mais eficiente. Associado a esta troca rápida de temperatura existe um fenômeno chamado choque térmico. Zeilmann *et al.* (2007), afirma que o maior desgaste apresentado para a condição de emulsão, pode ser explicado pelo choque térmico acentuado, quando ela entra em contato com o fluido, aplicado em abundância. Devido à diminuição rápida da temperatura na superfície da broca, surgem tensões de tração que podem ultrapassar o limite de resistência do material e enfraquecer o gume. A cada furo estes defeitos aumentam, caracterizando uma falha por fadiga térmica. Neste caso a maior influência foi no revestimento. Possivelmente a delaminação ocorreu próxima a 200 furos. Conforme visto anteriormente no teste de longa duração com jorro de óleo pressurizado, a análise da broca com 240 furos apresentou delaminação do revestimento. Neste experimento ocorreu novamente a delaminação do revestimento

com o mesmo sistema lubri-refrigerante, este comportamento indica a importância da influência térmica no processo, durante a furação com sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo pressurizado ocorre com frequência o choque térmico devido ao ciclo de aquecimento e resfriamento rápido da região de corte, comprometendo a durabilidade do revestimento. Após a delaminação do revestimento o substrato de metal duro ficou exposto, possibilitando o aumento do desgaste por abrasão devido ao atrito do material da peça na superfície de saída da broca.

A figura 4.16 mostra o resultado de desgaste da aresta com os parâmetros de corte de 62 m/min e 0,06 mm/rot, porém neste caso com a aplicação do sistema lubri-refrigerante MQL. Foram analisados: revestimento da região 1, aresta de corte na região 2 e a superfície de saída na região 3. Foram identificados os materiais correspondentes em cada região com a utilização do sistema EDS. Neste caso a figura 4.16 mostra que a geometria da aresta de corte esta íntegra, com pequenos desgastes por abrasão. O mecanismo mais presente nesta análise foi a adesão de material na superfície de saída da ferramenta.

2-Revestimento de TiAlN utilizando MQL										
Zoom 50x			Zoom 600X					Resumo		
								Aresta íntegra com pequeno desgaste por abrasão. Adesão de material da peça na superfície de saída da broca e na aresta de corte.		
Elemento % / Região da broca	Ti	Al	N	Si	Cr	Mn	Fe	C	Co	W
1- Revestimento (região escura)	38,92	17,15	37,32	x	x	x	x	x	x	x
2- Substrato (região clara)	x	x	x	x	x	x	x	26,39	2,61	62,74
3 – Material aderido	x	x	x	0,37	1,05	0,87	84,63	13,08	x	x

Figura 4.16– Broca Ø 4mm revestimento TiAlN, utilizado MQL, Vc 62 m/min e f 0,06 mm/rot com análise química na região de corte da broca

Neste caso é possível verificar na região 2, cuja figura, mostra o detalhe da aresta de corte com pequenas ausências do revestimento, as quais possivelmente foram removidas pelo processo de abrasão. A região 2 mostra um pequeno chanfro na aresta de corte da broca, conforme foi descrito no desenho de construção da ferramenta, este chanfro de 0,05 a 0,07mm com 15° reforça a aresta da broca, reduzindo lascamentos. Porém quando são empregados avanços menores, como neste caso, que foi de 0,06 mm/rot, todo o cisalhamento do material acontece nesta região, assim sendo os mecanismos de desgaste se concentram na aresta de corte da ferramenta, intensificando o desgaste da ferramenta nesta região.

A região 3 mostra à adesão de material na superfície de saída da broca, neste caso a ocorrência deste mecanismo foi maior quando comparado a broca que utilizou jorro de óleo. Com a utilização do sistema MQL o mecanismo de adesão é agravado pela maior temperatura do processo, associado ao maior atrito do material na superfície da broca, porém o revestimento continua íntegro, assim como a afiação da aresta da broca.

A figura 4.17 mostra a broca com revestimento TiAlN, que utilizou os parâmetros do DOE de 45m/min e 0,14 mm/rot, e sistema lubri-refrigerante MQL. Neste caso a região 3 possui material aderido, porém em quantidades menores do que no ensaio anterior que utilizou parâmetros comerciais. Esta característica possivelmente foi influenciada pela temperatura reduzida em função do menor tempo de furação, devido ao maior avanço que foi empregado neste experimento e da menor velocidade de corte, quando comparado aos parâmetros utilizados no teste anterior. Com o emprego do maior avanço é possível verificar que a abrasão se concentra na parte superior da ferramenta, proporcionando o início do desgaste de flanco, comum para este tipo de operação. Observa-se que houve melhora no desgaste abrasivo comparado a broca da figura 4.15. Nota-se a redução da quantidade de material aderido na superfície de saída da ferramenta quando comparado aos resultados das brocas mostradas na figura 4.16.

Observa-se nos três experimentos que o fator de maior influência no desgaste da ferramenta foi o sistema lubri-refrigerante. O revestimento TiAlN teve melhor comportamento relativo ao desgaste utilizando sistema MQL do que com jorro de óleo.

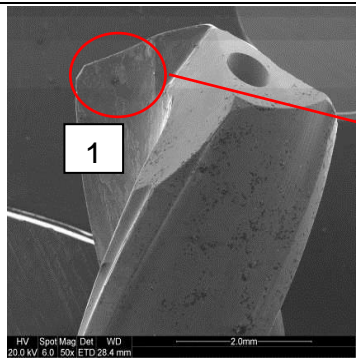
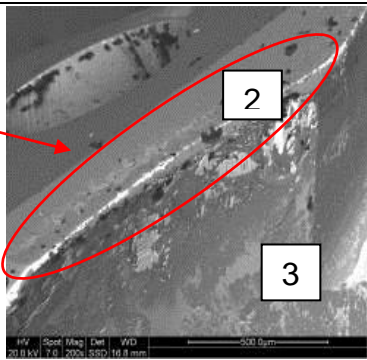
3 - Revestimento de TiAlN utilizando MQL e parâmetros do DOE										
Zoom 50x			Zoom 600X					Resumo		
								Aresta íntegra com adesão de material em algumas regiões. Desgaste na aresta por abrasão.		
Elemento % / Região da broca	Ti	Al	N	Si	Cr	Mn	Fe	C	Co	W
1- Revestimento (região escura)	24,2	12,21	27,48	x	x	x	x	x	x	x
2- Substrato (região clara)	x	x	x	x	x	x	x	26,06	0,67	67,29
3 – Material aderido	x	x	x	x	0,87	0,71	62,9	27,16	x	x

Figura 4.17 – Broca Ø 4mm revestimento TiAlN, utilizado MQL, Vc 45 m/min e f 0,14 mm/rot com análise química na região de corte da broca

A figura 4.18 mostra o resultados da broca revestida com *AlCrN-based*, MQL e parâmetros do DOE, neste caso houve uma redução significativa da adesão de material na região número 3. Na região 2 relativa à aresta da ferramenta apresentou um pequeno desgaste abrasivo e uniforme em todo o comprimento da aresta. Não foi encontrado desgastes no revestimento na superfície de saída, guias e no flanco.

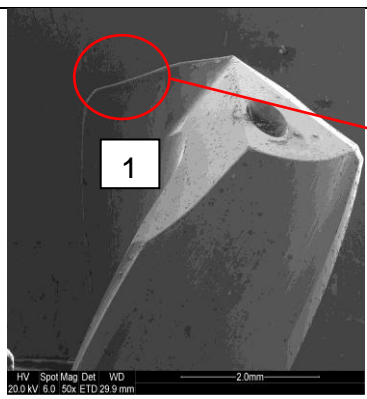
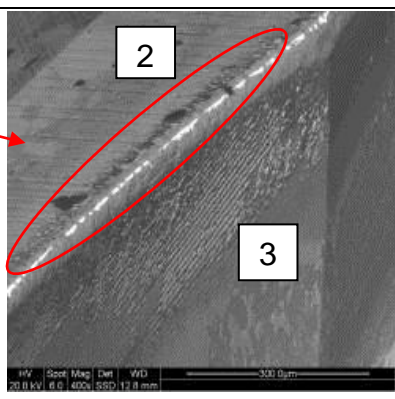
4 - Revestimento de <i>AlCrN-based</i> utilizando MQL e parâmetros do DOE										
Zoom 50x		Zoom 600X							Resumo	
									<p>Revestimento integro</p> <p>Aresta integra, com pequenos sinais de abrasão</p> <p>Pequenas adesões de material</p>	
Elemento % / Região da broca	Ti	Al	N	Si	Cr	Mn	Fe	C	Co	W
1- Revestimento (região escura)	17,72	16	39,98	1,58	15,3	x	x	x	x	x
2- Substrato (região clara)	x	x	x	x	x	x	x	15,01	2,83	52,41
3 – Material aderido	x	x	x	0,26	1,78	0,77	72,31	16,73	x	x

Figura 4.18 – Broca \varnothing 4mm revestimento *AlCrN-based*, utilizado MQL, V_c 45 m/min e f 0,14 mm/rot com análise química na região de corte da broca

Conforme Rosa, (2013) o revestimento TiAlN é mais duro do que o *AlCrN-based*. Conclui-se que nem sempre um revestimento mais duro resiste mais ao desgaste, outras condições que fazem parte do processo devem ser consideradas. Viana, (2009) conclui que nos ensaios de microabrasão por esfera livre, para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo, o revestimento *AlCrN-based* mostrou maior resistência seguido pelo TiAlN e *AlCrN*. Neste experimento a broca revestida com *AlCrN-based* que é mais resistente à temperatura suporta o calor produzido durante o processo de furação com MQL e oferece boa resistência à abrasão do material. A redução dos mecanismos de desgaste abrasão e adesão em função dos estudos dos parâmetros de corte, escolha do revestimento e sistema lubri-refrigerante MQL

empregados contribuíram para a melhor condição da ferramenta minimizando o desgaste.

5. CONCLUSÕES

A partir da realização deste trabalho foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Os cavacos que apresentaram melhor formato para a utilização em furação profunda com MQL foram com velocidades de corte menores e avanços maiores. Os avanços menores contribuíram para o aumento de temperatura da peça devido ao maior tempo da furação.
- Os principais fatores que exercem grande influência na temperatura da peça durante o corte são: sistema lubri-refrigerante, parâmetros de corte e geometria da ferramenta.
- A forma geométrica da broca oferece influência direta com a temperatura no processo de furação profunda. A afiação cruzada associada ao comprimento de guia reduzido ofereceu bom desempenho na furação com sistema MQL.
- O comprimento das guias em toda a extensão da ferramenta contribui para o aumento da temperatura da peça durante a furação com MQL. Afiação com formato “S” e com o comprimento reduzido das guias é eficiente na furação profunda utilizando MQL.
- Quanto menor for o avanço menor é a força de penetração. Com esta análise é possível afirmar que a temperatura elevada da peça não é proveniente de esforços de corte elevados, mas principalmente pelo maior intervalo de tempo, em que ocorre o atrito das guias e do cavaco na parede do furo.
- As menores velocidades de corte associadas ao sistema lubri-refrigerante MQL apresentaram maior formação de adesão ou aresta postiça, enquanto a utilização do sistema lubri-refrigerante com óleo pressurizado apresentou maior desgaste no revestimento e maior abrasão.
- A troca térmica com o sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo pressurizado é mais rápida do que com MQL, esta velocidade de troca térmica provoca fadiga térmica da ferramenta, provocando o a delaminação do revestimento e deixando o substrato exposto, acelerando o desgaste da ferramenta.
- As brocas que utilizaram o sistema MQL desgastaram menos quando comparadas ao sistema a jorro.

- A integridade superficial do furo e a circularidade com sistema MQL são piores quando comparados ao sistema lubri-refrigerante a jorro de óleo pressurizado. Devido às deformações causadas pelas forças de avanço e a temperatura mais elevada do processo com MQL.
- A temperatura do processo com sistema lubri-refrigerante MQL foi maior do que a temperatura do processo que utilizou sistema lubri-refrigerante jorro de óleo pressurizado.
- Com a utilização do sistema lubri-refrigerante MQL o revestimento AlCrN-based que é mais resistente a altas temperaturas, apresentou menor formação dos mecanismos de desgaste de adesão e abrasão quando comparado ao revestimento TiAlN.

Estes resultados possibilitaram a implantação do processo de furação profunda utilizando MQL em uma linha de usinagem da Robert Bosch. A definição prévia dos parâmetros de processo possibilitou a implantação rápida e assertiva na cadeia produtiva. O aumento da vida útil das brocas com o processo MQL foi de 150% em relação ao processo com jorro de óleo pressurizado. Este aumento de vida útil possibilitou a redução do consumo e do número de afiações das brocas e consequentemente o aumento da produtividade em função da redução das interrupções na máquina. Estes fatores possibilitaram a redução do custo do produto nesta operação. Foram observados ganhos não mensuráveis, como a satisfação dos operadores devido à limpeza do posto de trabalho pela ausência de óleo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar o efeito da variação do diâmetro do furo de refrigeração interna da broca na temperatura do processo com a utilização de MQL.
- b) Equacionar a taxa de resfriamento em função da expansão do meio lubri-refrigerante MQL após a saída do furo de refrigeração da ferramenta.
- c) Verificar a influência da variação da viscosidade do óleo na furação com MQL.
- d) Verificar se o óleo utilizado na refrigeração durante o processo de afiação da ferramenta promove alguma reação química no metal-duro e posteriormente oferece alguma influência na durabilidade revestimento.
- e) Analisar a utilização do MQL em furos profundos com brocas canhão.
- f) Desenvolver melhorias no processo de furação com MQL para melhorar a qualidade e integridade da superfície furada.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; DÖRR, J., **Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica**, n.439, *Máquina e Metais*, São Paulo, ago. 2002, p. 38-53.

ANSHU D. JAYAL 1, A.K. BALAJI, **Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features**. *Wear* 267, p. 1723-1730, 2009.

AOYAMA T.; **Development of a Mixture Supply System for Machining with Minimal Quantity Lubrication**. *Cirp Annals – Manufacturing Technology*, v. 51, p 289 – 292, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Brocas Helicoidais: Terminologia: NBR 6176**. Rio de Janeiro, 2000.

_____ **ABNT - TB – 111-** Brocas helicoidais, Rio de Janeiro, 1977

_____ **ABNT – EB – 621-** brocas helicoidais de aço rápido, Rio de Janeiro, 1982

ASTAKHOV, V.P., **Tribology of Metal Cutting**, Tribology and Interface Engineering series, No. 52, Editora Elsevier, 2006.

BALZERS, disponível em <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/Balzers> Acessado em 05/05/2012.

BIELOMATIK, a company of the Leuze group GmbH, Neuffen, Alemanha, Disponível em: <http://www.bielomatik.com/en/lubrication/minimalquantitylubrication/2337?pms=2337>. Acessado em: 03/02/2011.

BOOTHROYD, GEOFFREY, KNIGHT, WINSTON A., **Fundamentals of Machining and Machine Tools**, third ed. CRC Taylor & Francis. 2005.

BRANDÃO L.C., TEIXEIRA R.C., LAURO C.H., **Contribution to dynamics characteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow.** Applied thermal engineering, v. 31, p. 3806 – 3813, 2011.

BUNSHAH R. F. **Handbook of hard coatings: depositions technologies, properties and applications.** New Jersey: Noyes Publications, 550 p., 2001.

CALLISTER, William D. **Ciencia e Engenharia de Materiais: Uma introdução.** 5 ed. New York: J. Wiley 871p., 2000.

CASTILLO, W., **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-duro com Canais Retos.** 2005. 134 f. Dissertação de Mestrado UFSC, Florianópolis. 2005.

CHEN Y. C., LIAO Y. S. **Study on wear mechanisms in drilling of inconel 718 superalloy.** Journal of Materials Processing Technology, v. 140, p. 271-273, 2003.

COTTA, C.P.N., **Problemas inversos de condução de calor em meios heterogêneos: análise teórico-experimental via transformação integral, inferência bayesiana e termografia por infravermelho.** 2009. 288 f., Tese (Doutorado) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

DHAR, N. R., AHMED, M. T., ISLAM, S., **An Experimental investigation o effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 748-753, 2006.

DIN Deutsches Institut für Normung. **DIN 8589-2-2003-09.** Fertigungsverfahren Spanen – Teil 2: Bohren, Senken, Reiben, Einordnung, Unterteilung, Begriffe.

DIN Deutsches Institut für Normung. **DIN 50320-1979.** Systemanalyse von verschleibvorgängen – Gliedeung des verschleibgebietes, Begriffe.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N.. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 5. ed., São Paulo: Artliber Editora LTDA., 2006. 255 p.

ENDRINO J.L.; RABNIVICH G.S.; GEY C.. **Hard AlTiN AlCrN PVD coatings for machining of austenitic stainless steels.** Surface & coatings technology, v. 200, p. 6840 – 6845, 2005.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9. ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995. 751 p.

FOX RABINOVICH G. S.; BEAKE B.D.; ENDRINO J.L.; VELDHUIS S.C.; PARKINSON R.; SHUSTER L.S.; MIGRANOV M.S. **Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings**. Surface & coatings technology, v. 200, p. 5738 – 5742, 2006.

GÜHRING – **Ferramentas de corte de precisão**. Catálogo do fabricante. Albstadt, 2009. 1648 p.

HEINEMANN R., HINDUJA S. , BARRO G., PETUELLI G., **Effect of MQL on the tool life on small twist drills in deep hole drilling**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 46, p. 1 - 6, 2005.

HEISEL, U., LUTZ,M., SPATHD., WASSMER,R. WALTER, U., **A tecnica da mínima quantidade de fluido e sua aplicação nos processo de corte**, Revista maquinas e metais, p. 22-38, 1998.

ISO 513 (2004) Classification and application of hard cutting materials for removal with defined cutting edges: designation of the main groups and groups of application. International organization fo standardization, 3 f. 2004.

JAWAHIR, I. S.; BRINKSMEIER, E.; M'SAOUBI, R.; ASPINWALL, D. K.; OUTEIRO,J. C.; MEYER,D.; UMBRELLO, D.; JAYAL, A. D.; Surface Integrity in material removal process: Recent advances. Cirp Annals manufacturing technology, v. 60, p. 603-626, 2011.

KALSS W.; REITER, A.; DERFLINGER V.; GEY C.; ENDRINO J.L.. **Modern coatings in high performance cutting applications**. International journal of refractory metals & hard materials. v. 24, p. 399 – 404, 2005.

KANAI M. *et al.* **Statisticals characteristics of drill wear and drill life for standardized performance tests**. Cirp Annals manufacturing technology, v. 27, p. 61-66, 1978.

KLOCKE, Fritz; KUCHLE, Aaron. **Manufacturing Process 1 – Cutting**, RWTH ed., Aachen: Editora Springer, 2011 504 p.

KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. **Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren**, 5. ed., Aachen: Editora Springer, 1997.

LAWAL S. A., CHOUDHURY I. A., NUKMAN Y. **A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant**. Journal of Cleaner Production, v. 41, p. 210 - 221, 2012.

LE BOURHIS E.; GOUDEAU P.; STAIA M.H.; CARRASQUERO E.; CABRERA P.E.S.. **Mechanical properties of hard AlCrN-based coated substrates**. Surface & coatings technology, v. 203, p. 2961 – 2968, 2009.

LE COZ G.; MARINESCU M.; DEVILLEZ A.; DUDZINSKI D.; VELNOM L.. **Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys**. Applied thermal engineering, v. 36, p. 434 – 441, 2011.

LUCHESI, V.M., COELHO R.T., **An inverse method to estimate the moving heat source in machining process**, Applied Thermal Engineering. v. 45 – 46, p. 64–78, 2012.

LUBRIX GmbH. Disponível em: <http://www.lubrix.de>. Acessado em 14/05/2012.

MARMENTINI M. M.; BELTRÃO P. C. ; . **Análise comparativa do desempenho de brocas helicoidais revestidas com TiAlN e AlCr na furação do aço SAE 4144 beneficiado**. Anais do Congresso brasileiro de engenharia e fabricação, 4, Águas de São Pedro, SP, 2007: UTFPR 2007.

MASAHIKO S.; TOMOYUKI A.; A, HISATAKA T.; SATOSHI T.; **Variation of temperature at the bottom surface of a hole during drilling and its effect on tool wear**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 68, p. 40 – 47, 2013.

MATTES W. **Influência dos revestimentos de brocas na furação do ferro fundido nodular austemperados**. Dissertação de mestrado, SOCIESC, 97 f. Joinville, 2009.

MEENA A.; M. EL MANSORI A.; **Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications.** *Wear*, v. 271, p. 2412 – 2416, 2010.

NOUARI, M., LIST, G., GIROT, F., GÉHIN, D., **Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 45, p. 1436-1432, 2005.

NICOLA, G. L.; MISSEL, F. G.; ZEILMANN, R. P.; Surface quality in milling of hardened H13 steel. *International Journal of advanced manufacturing technological.* v. 49, p.53-62, 2010.

OLIVEIRA V.; BERKENBROCK E.; ARIAS M.; FAGALI A., BELTRÃO C.; **Influência do revestimento na vida útil de brocas de metal duro na usinagem do aço P20.** Congresso nacional de engenharia mecânica, Campina grande PB, 2010, ABCM, 1471: Instituto Federal de Santa Catarina, 2010.

OLIVEIRA, Valter Vander de. **Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular**, 153 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, UTFPR, Curitiba, 2008.

PIERSON H. O. Handbook o **chemical vapor deposition (CVD): principles, technology and applications**. 2 ed. New York: Noyes Publications, v. 498, p. 184-190, 1999.

POULACHON, G., BANDYOPADHYAY, B.P., JAWAHIR, I.S., PHEULPIN, S., SEGUIN, E., **Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels**, *Wear* v. 256 p. 302–310, 2004.

QUINTO, D. T. **New generation of PVD films.** *Cutting Tool Engineering Magazine*, October 2005, v. 57, number 10.

RAHIM E.A., SASAHARA . H, **A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys.** *Trybology international*, v. 44 p. 309 – 317, 2011.

ROSA S.N.; **Avaliação da superfície modificada de brocas de metal duro pelo processo da deposição física de vapor**, 153 f. 2013, Tese (Doutorado) UNICAMP, Campinas SP, 2013.

SANTOS, C. S. **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal-duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**, 200 f. 2002, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

SANTOS, S. C.; SALES, W.F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1ª ed., São Paulo: Artliber Editora Ltda, 248 p., 2007.

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

SKF Ferramentas S.A.. **Manual Técnico SKF**, 1. ed., São Paulo: Laborgraf S.A, 1988. 258 p.

STAHL-EISEN-PRÜFBLATT 1160-1169: **Allgemeines und Grundbegriffe**. Düsseldorf, Editora Stahleisen GmgH.

STEMMER, Erich Gaspar. **Ferramentas de Corte 2**. 4. ed., Florianópolis: Editora da UFSC, 314 p., 2008.

TRENT, Wdward; WRIGHT, Paul. **Metal Cutting**. 4 ed., Woburn: Butterworth Heinemann, 446 p., 2000.

VIANA, R.; **Estudo da caracterização de ferramentas de corte texturizadas a laser e revestidas utilizadas no fresamento frontal de ferro fundido vermicular**. 2009. 131 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Uberlândia, 2009.

WEINERT, K., INASAKI, I., SUTHERLAND, J. W., WAKABAYASHI, T., **Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 53, 2ª Ed., pp. 511-537. 2004.

WOSNIAK, F. A, **Estudo da usinabilidade do aço 50CrMoS4 no processo de furação profunda**, 142 f., 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2011.

WOSNIAK, F. A., OLIVEIRA, O., MACHADO, E., **Estudo de usinabilidade do aço SAE 4144 no processo de furação profunda utilizando metodologia de “design of experiment” e emissão acústica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia Mecatrônica) UTFPR, Curitiba, 2007.

ZEILMANN R. P., WEINGAERTNER W. L., **Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimum quantity of lubricant.**, Journal of Materials Processing Technology, v. 179, p. 124–127, 2006.

ZEILMANN R.P.; NICOLA G.L.; VIDOR M.;VACARO T.; **Análise do desgaste em ferramentas de metal duro na furação do aço AISI P20.** Congresso brasileiro de engenharia e fabricação. 6, ABCM, Caxias do sul RS, 2011: Universidade de Caxias do Sul, 2011.

ZEILMANN R.P.; **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de lubrificante**, 207 f., Tese (Doutorado), UFSC, 2003.

ZEILMANN R.P; WEINGAERTNER W.L.; Desgaste em brocas de metal duro quando na furação da liga de titânio Ti6Al4V. Anais do Congresso brasileiro de engenharia e fabricação, 4, Águas de São Pedro, SP, 2007: Universidade de Caxias do Sul 2007.

ZEILMANN, R.P., NICOLA, G.L., TEIXEIRA, C.R., HEILER, R., VACARO, T. E BORDIN, F., **Desgaste em brocas helicoidais de metal-duro na usinagem do aço AISI P20.** Anais do 9º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Las Palmas de Gran Canaria, 2009.

ANEXO A – ARTIGO PUBLICADO NO CONGRESSO IBERO AMERICANO DE ENGENHARIA 2013

1. FURAÇÃO PROFUNDA COM BROCA HELICOIDAL EM AÇO SAE 4144 ENDURECIDO UTILIZANDO MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICAÇÃO

Marlon José Cardoso¹, Milton Luiz Polli², Renan Paris Curce³.

1- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro 3165, Curitiba PR, Brasil cardoso.marlon@ig.com.br

2- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro 3165, Curitiba PR, Brasil polli@utfpr.edu.br

3- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro 3165, Curitiba PR, Brasil renan.paris@live.com

Palavras chave: MQL, mínima quantidade de lubrificação, broca helicoidal, furação profunda, aço *SAE 4144*.

Resumo

Os processos de furação são largamente utilizados na indústria metal mecânica e envolvem grande complexidade quando possuem profundidade maiores que 5 vezes o diâmetro. Para estes casos é necessário emprego de máquinas e ferramentas especiais, fluidos geralmente pressurizados para remoção de cavacos, com propriedades de refrigeração e lubrificação que atendam as solicitações severas. Esta complexidade agrega custos ao processo, aumenta o impacto ambiental e os riscos à saúde do operador. O propósito deste estudo é avaliar as variáveis lubrificação e refrigeração em um processo de furação profunda com broca helicoidal de metal duro utilizando sistema mínima quantidade de lubrificante (MQL). O material é o aço SAE 4144 forjado e temperado com 38 HRC de dureza, furado com profundidade de aproximadamente 23 vezes o diâmetro. O sistema MQL funciona com ar comprimido e óleo, que formam uma névoa denominada spray, o óleo em quantidades mínimas funciona como lubrificante de corte e o ar comprimido como agente de transporte e troca térmica para o controle da temperatura no processo. O spray pressurizado também contribui para a remoção de cavacos através do canal da ferramenta. O estudo compara processos utilizando óleo integral de base mineral pressurizado a 50 bar versus o sistema MQL utilizando óleo sintético a 10 bar de pressão. A formulação dos experimentos é dada por design of experiment (DOE), considerando as variáveis: desgaste, temperatura da peça e empacotamento do cavaco. Constatou-se que o desgaste superficial da broca com MQL foi menor que no processo convencional, devido ao fato que a temperatura de corte é mais estável, porém maior, por este motivo a escolha de revestimentos mais resistentes ao calor apresentou melhores resultados aliada a parâmetros de corte adequados.

Introdução

Os processos de usinagem são à base das indústrias metal mecânica. É por meio destes processos que ocorrem as transformações de peças do estado bruto em produtos manufaturados de alta tecnologia e com responsabilidades funcionais de grande importância. Com a evolução das máquinas, ferramentas e revestimentos a usinagem em materiais endurecidos é viável, melhorando o fluxo produtivo e eliminando operações com ferramentas de geometria não definida que são mais caras e complexas. Inúmeros processos de usinagem são aplicados para esta transformação, dentre este universo um processo que se destaca em função de sua grande utilização e complexidade é o processo de furação. Conforme norma DIN 8589-2, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal. [7]. A ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça [10]. Esta cinemática possui particularidades que exigem muito da ferramenta durante o corte do material, dentre elas as mais importantes: a velocidade corte varia, é máxima na periferia e reduz em direção ao centro tendendo a zero. Outro fator relevante é a dificuldade de remoção do cavaco e a refrigeração da aresta de corte [12] [18]. Estima-se que 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica referem-se a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta [5]. No entanto, um grande número de operações na indústria exige profundidades de furos maiores que cinco vezes o diâmetro. Este tipo de operação é denominado furação profunda, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais [7][8][19]. A furação profunda é um processo que possui um grau de complexidade maior do que a furação convencional, devido às condições críticas de usinagem em que é realizada [5][22]. Tais condições envolvem a dificuldade da formação e do escoamento do cavaco, o comprimento em balanço da ferramenta, qualidade da superfície e as tolerâncias geométricas e de forma do furo.

O processo de furação profunda distingue-se da furação convencional pelos tipos de ferramentas empregadas e pela alimentação do fluido lubri-refrigerante, que é fornecido sob pressão diretamente sobre as regiões de corte. Em geral são utilizados óleos de base mineral integral que devem ser reciclados e tratados para manter as características de lubrificidade resistindo às temperaturas do corte e resfriado a região mais afetada pela temperatura e esforços [18].

O óleo de corte é benéfico à usinagem, porém sua aplicação e reutilização envolvem vários custos, tais como: tanques, bombas, máquinas especiais para pressurizar o sistema e tratar o óleo, constantes reposição de fluido devido o arraste na peça, ambiente de trabalho insalubre devido à exposição do produto químico ao operador, complicações ambientais que devem ser monitoradas e mapeadas como risco de incêndio devido grandes quantidades armazenadas próximas à máquina e o descarte do óleo no fim da vida útil para empresas especializadas [6].

O objetivo principal deste estudo é analisar a alternativa de substituir o óleo de corte a jorro por um sistema MQL que lubrifica e refrigera o corte através de um spray formado por ar comprimido e óleo em mínimas quantidades, atendendo somente a exigência de lubrificar o corte reduzindo o atrito e consequentemente a temperatura na região do corte [1]. O ar comprimido funciona como agente de transporte do óleo, agente refrigerante e auxilia no transporte de cavacos da região do corte até a saída do furo. Sem a utilização de fluidos, o controle sobre o processo deve ser maior e as estratégias e parâmetros utilizados devem ser adequados a esta condição [16].

O sistema MQL funciona por meio de um jato de ar pressurizado que impacta em uma gota de óleo e a fragmenta, formando uma mistura de ar pressurizado e micro gotas de óleo, denominado spray. Esta mistura é conduzida por meio de tubulações até o furo de refrigeração interna da máquina, mandril-ferramenta. Quando esta mistura sai do furo de refrigeração interna da ferramenta ocorre uma expansão rápida que subtrai o calor da região de corte, princípio semelhante a um evaporador de geladeira. Este fenômeno físico contribui com o resfriamento da ferramenta na região de corte. Em seguida este spray pressurizado empurra o cavaco através do canal helicoidal da broca até a saída do furo. [1] [13] [21].

O calor gerado durante a usinagem com MQL é maior relacionado ao jorro de óleo e menor relacionado à usinagem a seco. O óleo diluído no spray é apenas uma quantidade mínima necessária para lubrificar a região de corte, melhorando as propriedades tribológicas da região. Esta é a razão do termo “Mínima Quantidade de Lubrificante”. Qualquer quantidade acima do necessário para lubrificação da região é desperdício de óleo [13][21].

Basicamente existem dois tipos de sistemas MQL, sistema com 1 canal e sistema de 2 canais conforme Fig. (1). O sistema 2 canais funciona com um canal que conduz o óleo até a entrada dos furos de refrigeração da ferramenta e outro canal que leva o ar pressurizado até esta região. Neste ponto ocorre a vaporização do óleo formando o spray, que em seguida sai na região de corte. Este modelo evita perdas de fluidos refrigerantes por centrifugação no fuso da máquina e perdas na tubulação, porém a formação spray não é precisamente controlada e a quantidade de lubrificante não é constante na região de corte. Entre os intervalos do gotejamento ocorre uma redução da quantidade de lubrificante. Outro agravante é que peças são desenvolvidas especificamente [4].

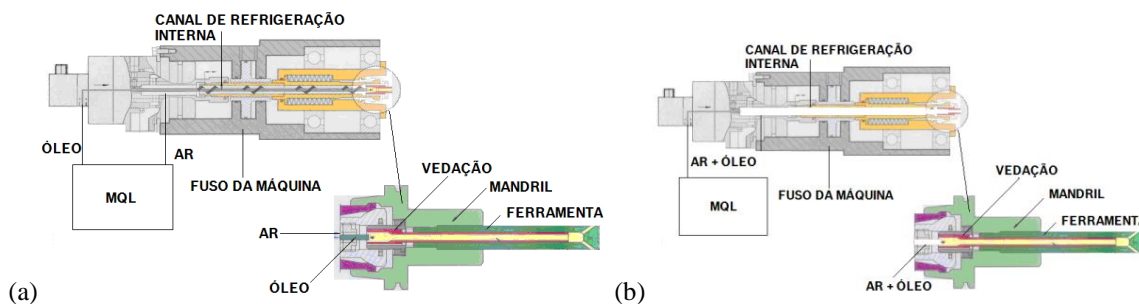


Figura 1. (a) Sistema MQL 2 canais. (b) Sistema MQL 1 canal (O autor).

No sistema 1 canal a formação do spray é feita no aparelho simples que se adapta a vários tipos de máquinas. Desta forma a nevoa fica controlada e precisa [15]. É preciso cuidado com a tubulação evitando cotovelos e outras conexões que propiciem a separação do óleo e do ar comprimido [9].

As ferramentas para utilização do sistema MQL são especiais, devem ser revestidas com coberturas que melhoram as propriedades tribológicas na região entre cavaco e peça [20]. Outro fator relevante é a geometria da ferramenta com canais apropriados a extração do cavaco e uma afiação que resista aos esforços concentrados na aresta cortante. O calor deve ser transferido em torno de 71% para o cavaco 26% para a peça e 2% para a ferramenta. Com esta distribuição, a dinâmica do corte é apropriada. Lembrando que este fator é analisado em conjunto com a formação do cavaco [10]. Para furações profundas a análise do cavaco é fundamental devido à dificuldade de extração pelo canal da ferramenta. Em caso de má formação do cavaco ocorre à obstrução dos canais pressionando a ferramenta-cavaco-peça, danificando a parede do furo e quebrando a ferramenta.

Na furação profunda o tamanho e a forma do cavaco representam em primeiro lugar a condição do processo, pois a remoção do cavaco é complexa devido à relação profundidade-diâmetro ser alta. Caso o cavaco não apresente a forma em lascas, pode causar o travamento do canal e quebra da ferramenta. Através da forma e tamanho do cavaco também é possível encontrar uma combinação ótima dos parâmetros de corte [22].

O coeficiente volumétrico de cavaco (ω) é a relação entre o volume ocupado pelo cavaco (V_e) e o volume correspondente a sua massa (V_p), demonstrado na equação (1). [10].

Para execução dos testes foi utilizado uma técnica de projeto de experimento (DOE – Design of Experimento) permite alcançar melhorias significantes na metodologia de testes de usinagem. Encontrar o máximo rendimento do processo é algo que pode ser alcançado através de um estudo detalhado da usinagem, utilizando ferramentas de experimentação para obtenção de conhecimento [2][3].

$$\omega = \frac{V_e}{V_p} = \frac{V_e}{\frac{m}{\rho}} = \frac{\rho \times V_e}{m \times 1000} \quad (1)$$

V_e = volume ocupado pelo cavaco (cm^3);

V_p = volume específico do material do cavaco (cm^3)

m = massa do cavaco (kg);

ρ = peso específico do material do cavaco (g/cm^3).

Esse coeficiente resulta num valor que está relacionado com a forma do cavaco conforme a Fig. (2).

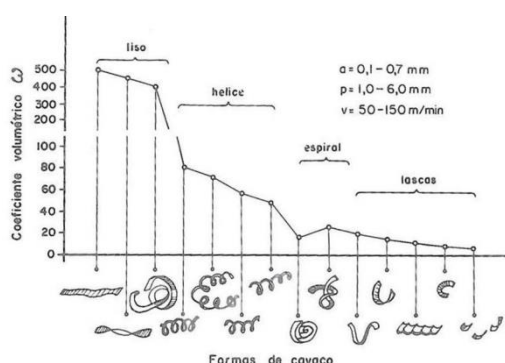


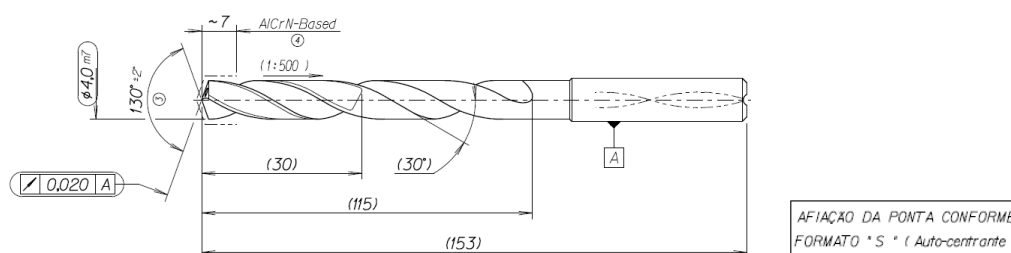
Figura 2. Relação do coeficiente volumétrico com a forma do cavaco [10].

Materiais e métodos

A máquina utilizada foi um centro de usinagem Robodrill comando FANUC, cone MAS BT 30 com refrigeração interna, fuso com rotação máxima de 24000 RPM. O sistema MQL utilizado no experimento foi de um canal modelo V7, desenvolvido pela empresa alemã Lubrix especialmente para utilizações em furações com refrigeração por meio de canais internos da ferramenta. A vazão é proporcional aos canais de refrigeração da ferramenta, quanto maior área da seção transversal do canal, maior volume de óleo injetado. Para esta ferramenta o equipamento trabalha com pressão de 10 bar e vazão de óleo de aproximadamente 20 ml/hora, medidos com uma proveta graduada.

O óleo utilizado nos testes a jorro foi o EcoCut 610B integral mineral de viscosidade 10 cSt a 40°C, segundo o fabricante. O óleo utilizado nos testes com MQL foi o LubriOil E47, éster sintético de viscosidade 47 cSt a 40°C, segundo o fabricante, este óleo é próprio para furação com MQL, possui aditivos e propriedades exigidas durante o processo.

O principal objeto de análise no processo é uma broca de metal duro de diâmetro $\varnothing 4\text{mm}$ Fig. (3) e (4), afiação de ponta tipo “S”, cobertas parcialmente (Tip coating) com TiNAl (nitreto de titânio alumínio) de micro-dureza 3300 (HV 0,05), coeficiente de atrito no aço (seco) 0,25 temperatura máxima de serviço 900°C e AlCrN-based (nitreto de cromo alumínio) de micro-dureza 3000 (HV 0,05), coeficiente de atrito no aço (seco) 0,25 temperatura máxima de serviço 1100°C, segundo o fabricante. O canal é feito com rebolo perfilado que fornece uma geometria de corte mais positiva e sem correção de aresta e com fase negativa de 0,05mm com 15° na aresta de corte.



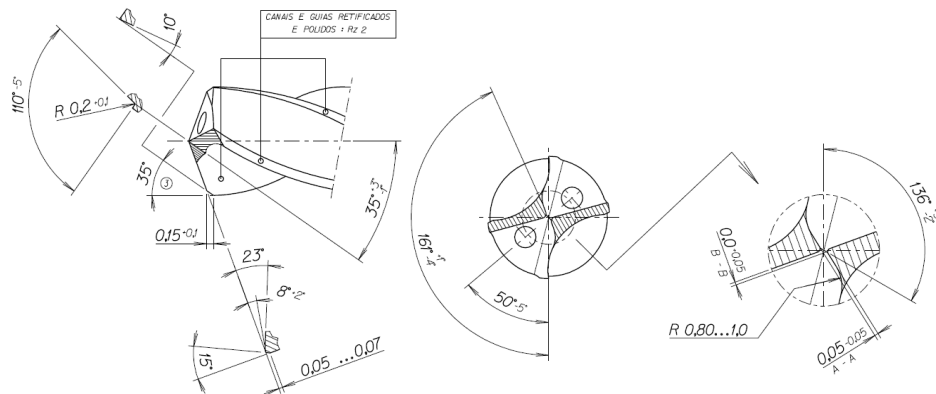


Figura 3. Projeto da broca utilizada nos testes (O autor).

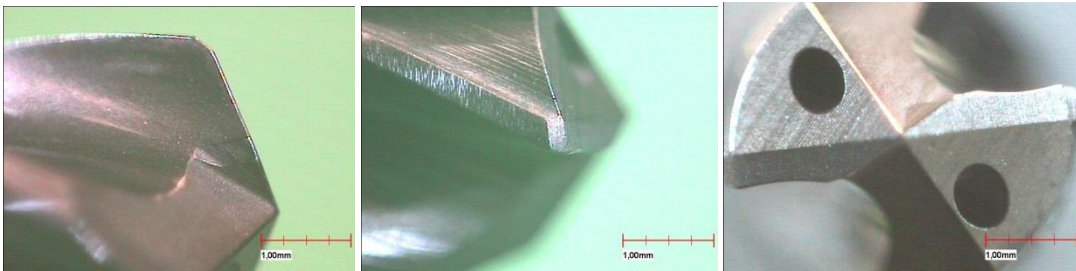


Figura 4. Broca utilizada nos testes com revestimento de AlCrN-based (O autor).

O material testado foi o SAE 4144 forjado e temperado com 38,7 HRC de dureza. A medição de temperatura da peça foi feita com sensores termopar alojados no corpo de prova. Fig. (5).

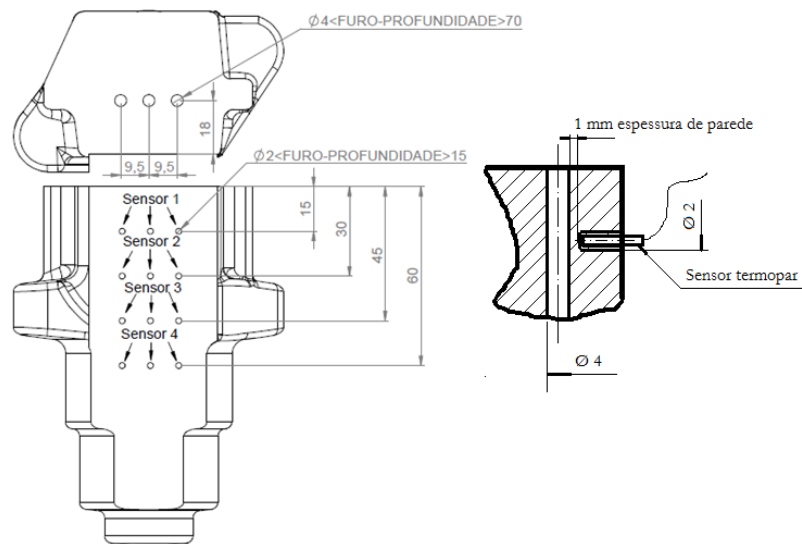


Figura 5. Corpo de prova para medição de temperatura (O autor).

Para medições de temperatura durante a furação foi utilizado um equipamento de aquisição de dados marca Agilent, modelo 34870 A. O equipamento capta medições simultâneas nos quatro sensores com intervalos de captação de sinal em 0,1 segundos. Os valores de velocidade de corte e avanço foram fixados para as duas condições de refrigeração, óleo e MQL a fim de verificar diferenças de temperatura entre os sistemas. A tabela 1 contempla os valores de entrada e saída. A temperatura foi maior com a utilização do sistema MQL do que com o sistema jorro de óleo.

Tabela 1. Medição de temperatura em ambos os sistemas de refrigeração

	Variáveis de entrada			Variável de saída
Rodada	vc (m/min)	Avanço (mm/U)	Lubrificação	Temperatura máxima (°C)
Óleo	80	0,085	Jorro	35,4
MQL	80	0,085	MQL	43,4

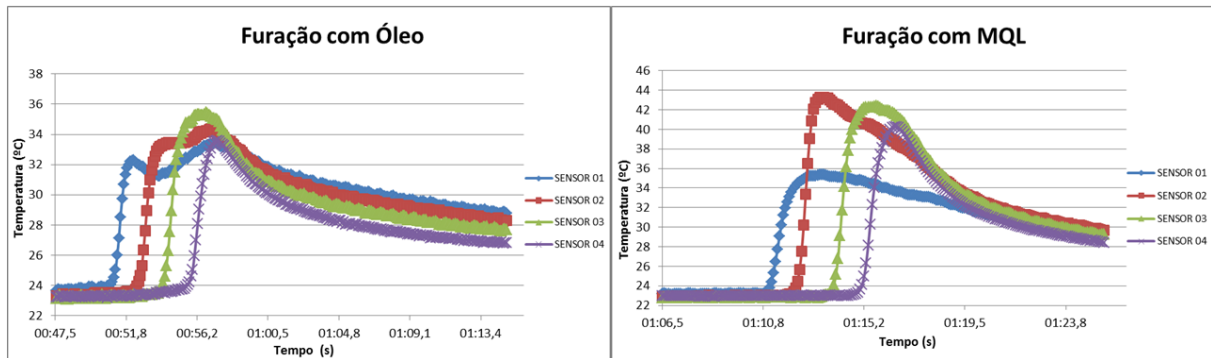


Figura 6. Gráfico de temperatura (O autor).

O próximo passo foi verificar o desgaste da ferramenta revestida com TiNAl utilizando os parâmetros especificados pelo fabricante (tabela 2). O critério de do teste foi a modificação da forma do cavaco ao longo de vários furos utilizando a estratégia demonstrada na figura 7 na qual é feito um furo piloto de diâmetro $\varnothing 4,02$ mm com um ângulo de ponta de 150° e profundidade de 5 mm utilizando sistema MQL. Então a ferramenta é trocada e entra no furo guia a uma profundidade de 4 mm e 1000 rot/min. Após muda-se para a rotação que será utilizada na usinagem e realiza-se o furo com profundidade de 95 mm.

Tabela 2. Resultado do teste de desgaste

	Variáveis de entrada			Variável de saída
Rodada	vc (m/min)	Avanço (mm/U)	Lubrificação	Vida útil (n° de furos)
1	62	0,06	MQL	240

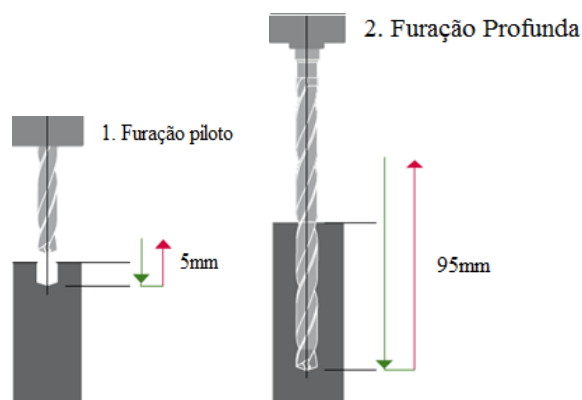


Figura 7. Estratégia de usinagem utilizada nos testes (O autor).

O fim do teste das ferramentas foi determinado no momento da mudança da forma do cavaco passando do formato de lascas em forma de vírgula, figura 8(a) para lascas mais longas e fitas, figura 8 (b).

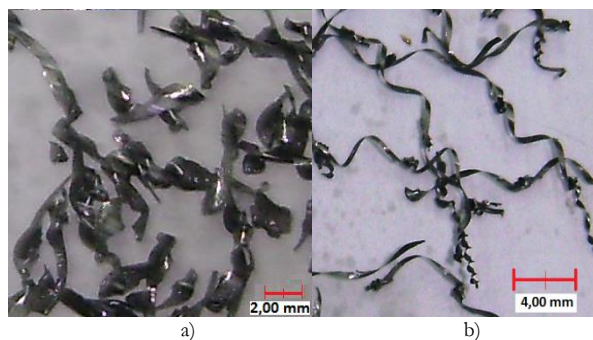


Figura 8. Análise dos cavacos (O autor).

A mudança na forma do cavaco ocorreu devido o desgaste abrasivo na superfície de saída do cavaco e pequenos lascamentos nas quinas das ferramentas, figura 9. Para análise do desgaste da ferramenta foi utilizado um microscópio ótico Blicke Multicheck PC500 com lente de ampliação de 75x.



Figura 9. Análise de desgaste da broca com parâmetros comerciais (O autor).

Após este teste realizou-se a técnica de projeto de experimento (DOE – Design of Experimento). O estudo da usinabilidade do processo permite compreender como os fatores envolvidos influenciam a usinagem e como estes devem ser ajustados. Esta metodologia permite visualizar o efeito principal de cada fator do processo, e a interação entre fatores.

Foram atribuídos parâmetros máximos de velocidade de corte de 75 m/min e de avanços de 0,15 mm/rot e valores mínimos de velocidade de corte 25 m/min e avanço de 0,05 mm/rot. Estes valores foram escolhidos no campo de utilização possível da ferramenta, com esta definição é possível ampliar a área de análise e aumentar a probabilidade fazer a melhor escolha através do método. Estes valores iniciais foram inseridos no software Minitab™ que faz um cálculo estatístico e gera valores intermediários, formando os valores de entrada na tabela 2 que são denominados rodadas. Cada rodada recebe duas variáveis de saída que são temperatura da peça e volume do cavaco, visto na equação 1.

Os cavacos de cada rodada foram coletados e numerados, após 30 furos para determinar os respectivos coeficientes volumétricos. A Tab. (2) contém os resultados obtidos durante as 13 rodadas do DOE.

Após o término das rodadas iniciou-se a medição do coeficiente volumétrico do cavaco medido a massa em uma balança marca Precisa modelo 240 com divisão de 0,1 gramas. Para obter o volume utilizou-se uma proveta graduada de 100 ml, modelo PIREX. O calculo foi feito tomando como base a equação 1, foi colocada uma determinada quantidade de cavacos dentro da proveta e pesada, então se divide o volume ocupado pela massa, o melhor resultados é menor valor porque o cavaco pequeno ocupa menos espaço dentro da proveta com uma massa maior. Obtendo assim as variáveis de saída que seriam os resultados de cada rodada.

Para determinar a temperatura da peça foi utilizada a pistola a laser Raytek Minitemp™, que mede temperatura por infravermelho. A medição foi obtida logo após o término dos 30 furos, posicionando a pistola sempre no mesmo ponto e considerando a temperatura inicial da peça antes da furação. Na rodada 2 houve uma elevação da temperatura devido o tamanho e forma do cavaco que não saiu pelo canal da ferramenta e atritou na parede do furo. Quanto menor o cavaco mais rápido é o escoamento para fora do furo. Além deste fato ocorreram também variações conforme os parâmetros de corte. O melhor resultado neste caso foi a menor temperatura, a fim de reduzir o impacto termico na ferramenta. Os cálculos estatísticos, formulação das tabelas e a geração dos gráficos também foram feitos pelo software.

Tabela 2. Rodadas do DOE

Rodada	Variáveis de entrada		Variáveis de saída	
	vc (m/min)	Avanço (mm/rot)	Temperatura (°C)	Coef. Vol. Cavaco
1	75	0,10	74	39,90
2	50	0,10	106	11,59
3	50	0,125	55	7,29
4	25	0,10	64	5,21
5	50	0,15	48	7,06
6	50	0,05	80	8,26
7	50	0,10	44	13,91
8	68	0,14	43	8,56
9	50	0,10	61	11,28
10	62	0,10	56	6,52
11	32	0,14	64	6,80
12	32	0,06	84	8,29
13	68	0,06	80	15,03

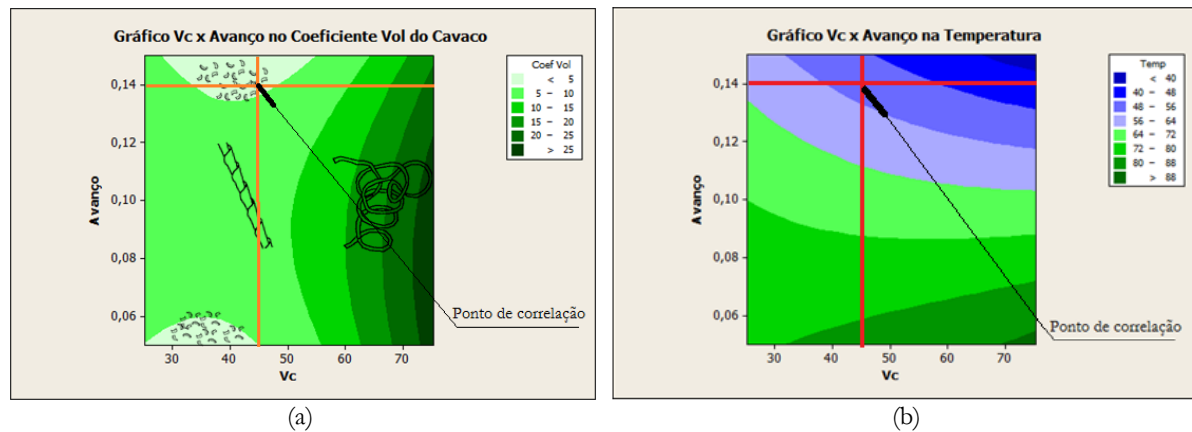


Figura 9. (a) Influência da velocidade de corte e avanço no coeficiente volumétrico do cavaco. (b) Influência da velocidade de corte e avanço na temperatura (O autor).

Com estes resultados geraram-se os gráficos da Fig. (9), que permitem analisar os resultados e determinar os melhores parâmetros a serem utilizados. Este resultado é denominado superfície de resposta. Esta resposta permite observar as áreas de interesse possibilitando a escolha dos melhores parâmetros em função das variáveis de resposta. A escolha dos melhores parâmetros é a referência para o início do processo com segurança e precisão, porém ao longo do tempo outras variáveis podem influenciar no desgaste, no caso a vida útil da ferramenta que pode ser impactada por desgastes sistemáticos, como por exemplo, uma deformação plástica. Com esta referência gráfica feita é possível escolher novos parâmetros que se enquadrem na área de interesse e possibilitem resolver o desgaste sistemático.

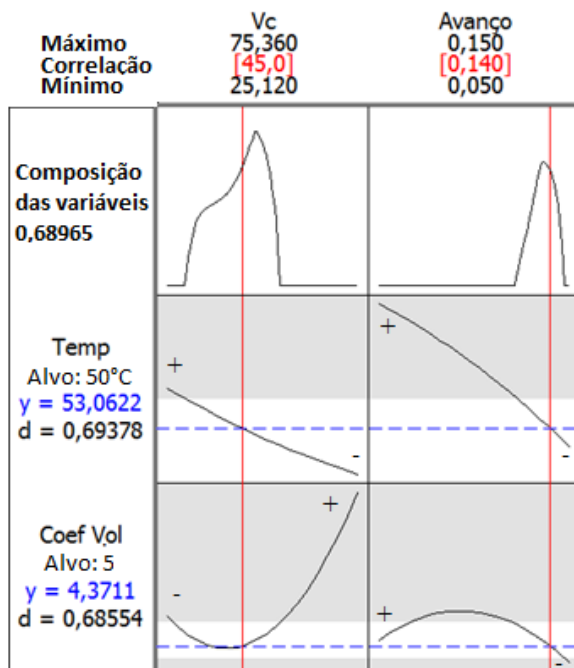


Figura 10. Correlação entre os resultados das rodadas (O autor).

Os resultados de temperatura e coeficiente volumétrico de cada rodada, tabela (2) são realimentados no software Minitab™ que correlaciona a melhor combinação possível da menor temperatura da peça com o menor coeficiente volumétrico. A composição das variáveis é correlacionada de modo que seja mais próxima a um. Fig (10). Neste caso houve uma correção apenas para efeito de arredondamento, mas dentro da área de interesse. A correlação foi de 0,68965 resultando com um avanço de 0,14 mm/rot e uma velocidade de corte de 45 m/min. Estes resultados são uma combinação de avanço e rotação considerando tamanho do cavaco e temperatura da peça ou consequentemente do cavaco.

Com as definições estabelecidas foi feito um comparativo entre sistema de refrigeração MQL e jorro de óleo, revestimento TiNAl e AlCrN-based, parâmetros comerciais, otimizados. Para a análise das ferramentas foram feitas imagens utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca FEI Quanta 500 e estão ampliadas 50x a visão geral das brocas e 600x no detalhe do desgaste da aresta. Todos os testes limitaram-se a 200 furos por ferramenta para que houvesse a possibilidade de comparação.

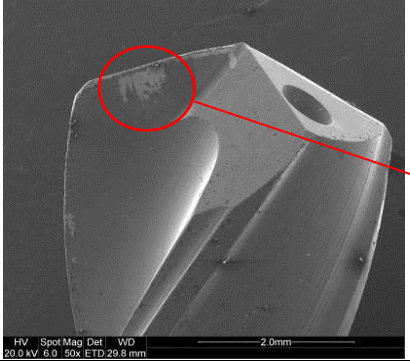
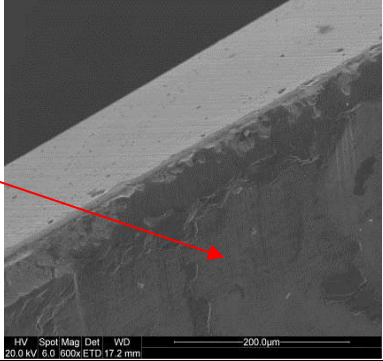
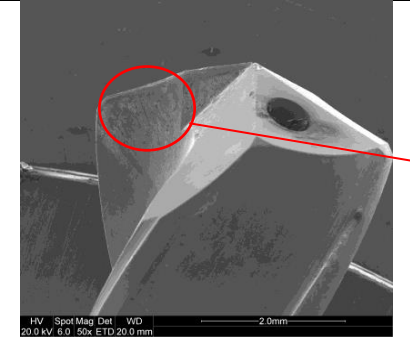
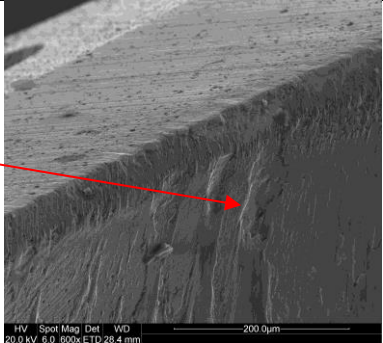
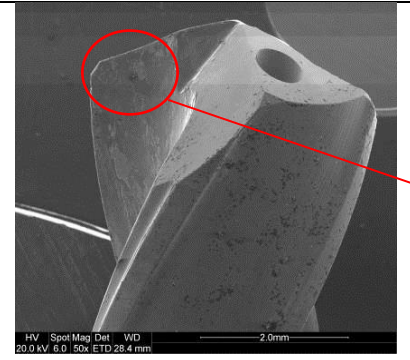
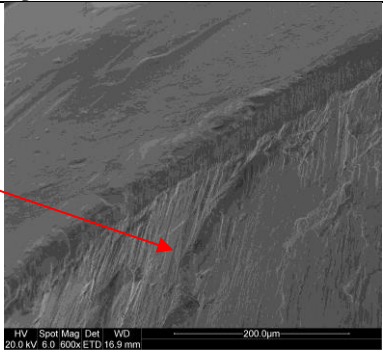
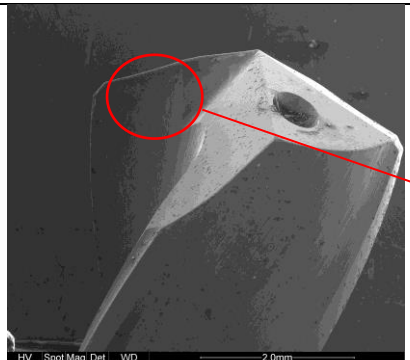
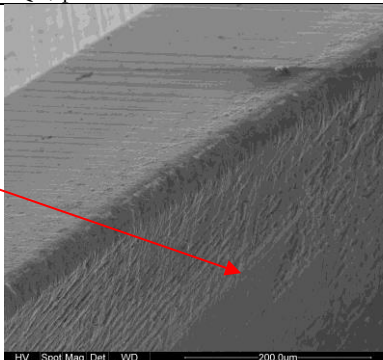
Resultados e discussões

As imagens da tab. (3) são da aresta e da superfície de saída da ferramenta é possível verificar através da diferença de cores e textura da superfície. O revestimento deslocado no caso do experimento 1 e material aderido no caso ou revestimento 2, 3 e 4.

As imagens encontradas na tab.(3) demonstram que com revestimento de TiNAl utilizando lubrificação com jorro de óleo e parâmetros de 62 m/min e avanço de 0,06 mm/rot apresentou pouco desgaste porem um deslocamento do revestimento na região de abrasão do cavaco no canal de saída da broca neste caso é uma região mais clara que expõe o metal duro base da broca. Com a mesma condição porem utilizando sistema de refrigeração MQL houve adesão de material no canal de saída de cavaco, porem o revestimento esta integro não apresentando desgaste.

Com a utilização do parâmetro otimizado e revestimento de TiNAl utilizando MQL, houve adesão de material no canal porem sem desgaste na ferramenta. Com o revestimento AlCrN-based e parâmetros DOE a ferramenta apresentou pouca quantidade de material aderido e nenhum desgaste ou deslocamento.

Tabela 3. Comparativo dos testes todos com 200 furos (19 metros)

Zoom 50x	Zoom 600X	Vc m/min	f mm/rot	Condição
1-Revestimento de TiNAl utilizando lubrificação com jorro de óleo				
		62	0,06	Deslocamento do revestimento substrato exposto. Desgaste na aresta por abrasão, micro trincas perpendiculares à aresta, desgaste de cratera e formação de aresta postíça.
2-Revestimento de TiNAl utilizando MQL				
		62	0,06	Revestimento íntegro Aresta íntegra Adesão de material em algumas regiões
3-Revestimento de TiNAl utilizando MQL, parâmetros DOE				
		45	0,14	Revestimento íntegro Aresta íntegra Adesão de material em algumas regiões
4-Revestimento AlCrN-based utilizando MQL, parâmetros DOE				
		45	0,14	Revestimento íntegro Aresta íntegra Pequenas adesões de material

A medição de temperatura demonstrou que a usinagem utilizando o sistema MQL possui temperatura maior que a usinagem com jorro de óleo, a diferença de temperatura é um fator importante neste processo, pois oferece impacto direto na escolha da geometria da ferramenta, revestimentos e parâmetros do processo. Os métodos e resultados obtidos no experimento estão de acordo com os resultados encontrados nas referências [14] e [17]. Para análise da diferença de temperatura é importante considerar que existe um espaço de 1 mm entre a ponta do sensor termopar e a parede do furo analisado, existe a convecção que é a taxa de transferência de calor neste espaço. O tempo em que o sensor de temperatura inicia a medição até a passagem de ferramenta pelo ponto mais próximo do sensor, com os parâmetros testados é em torno de 1 segundo. Devido esta condição a diferença de temperatura na aresta da ferramenta é muito maior do que foi apresentado na análise do primeiro teste. Referenciado no estudo [14].

Devido o fato da furação com sistema MQL possuir maior temperatura é importante escolher um revestimento da ferramenta que seja mais resistente ao calor. Heinemann [11] comprova em seu estudo a eficiência do revestimento em brocas de pequeno diâmetro utilizadas em furações profundas, pois o revestimento protege o substrato de metal duro e a integridade da geometria de afiação da ferramenta.

O estudo dos parâmetros é fundamental para atingir o máximo rendimento da ferramenta em volume de material retirado por afiação. Foi evidenciada nas imagens a diferença de desgaste entre os parâmetros. É possível verificar que o desgaste com parâmetros otimizados combinado a um revestimento mais resistente ao calor AlCrN-based teve um resultado melhor que a ferramenta que utilizou parâmetros comerciais e revestimento de TiNAl. Ainda relativo à temperatura esta evidenciado no comparativo com revestimento de TiNAl utilizando lubrificação com jorro de óleo (tabela 3) foi o deslocamento do revestimento, que confirma a ocorrência de choques térmicos, o jorro proporciona fadiga térmica, gera o deslocamento do revestimento e ocorrência de micro fissuras, que é um defeito tipicamente proveniente de choque térmico, este resultado foi semelhante ao demonstrado em [20].

A adesão de material verificada nas furações com sistema MQL é em função da temperatura elevada, por isto uma característica importante além do revestimento é a utilização do sistema MQL com óleo adequado que sempre possui viscosidade maior que em fluidos utilizados com jorro de óleo, a fim de reduzir o atrito e melhorar a lubrificidade entre cavaco ferramenta.

Para furações profundas que são complexas o sistema MQL pode ser utilizado, porem todas as variáveis envolvidas como geometria da ferramenta, revestimento, óleo de corte, devem ser pré-definidas com critério. Os testes também demonstram a eficiência do MQL com relação aos sistemas convencionais. Concorda-se com Weinert [21], que a substituição da lubrificação convencional por mínima quantidade de lubrificante é muito vantajosa e aplicável na indústria. Não há gasto com descarte de óleo, economiza-se com ferramentas, propicia um ambiente de trabalho melhor, melhora a imagem da empresa e contribui com o meio ambiente, porém, os custos com óleo não se alteram significativamente devido o custo o óleo de MQL ser elevado.

Conclusões

O estudo demonstra a importância da verificação dos parâmetros de corte e cobertura adequados. Estas variáveis do processo impactam diretamente na vida útil da ferramenta. O experimento comprova que em condições severas de corte utilizando o sistema MQL, o processo mostrou-se viável, estável e capaz. Com isso, o sistema convencional com óleo integral de 10 cSt pode ser substituído por um sistema MQL para este tipo de operação.

O processo utilizando MQL não há grandes variações de temperatura, porém a temperatura de trabalho é maior. Por isso o MQL apresenta menor impacto no revestimento da ferramenta, por isto é indicado a utilização de revestimentos que suportam maiores temperaturas como o AlCrN-based.

A alta complexidade da furação profunda com 23 vezes o diâmetro em um aço endurecido a 38 HRC confirma que a substituição da lubrificação convencional por mínima quantidade de lubrificante apresenta notória vantagem e vasta aplicabilidade. Vantagens mensuráveis como: redução de gastos com ferramentas, sistema de refrigeração mais simples com baixas pressões envolvidas, lavagem de peças e cavacos. Não mensuráveis como: ambiente de trabalho limpo, melhoria na imagem da empresa contribuindo com o meio ambiente.

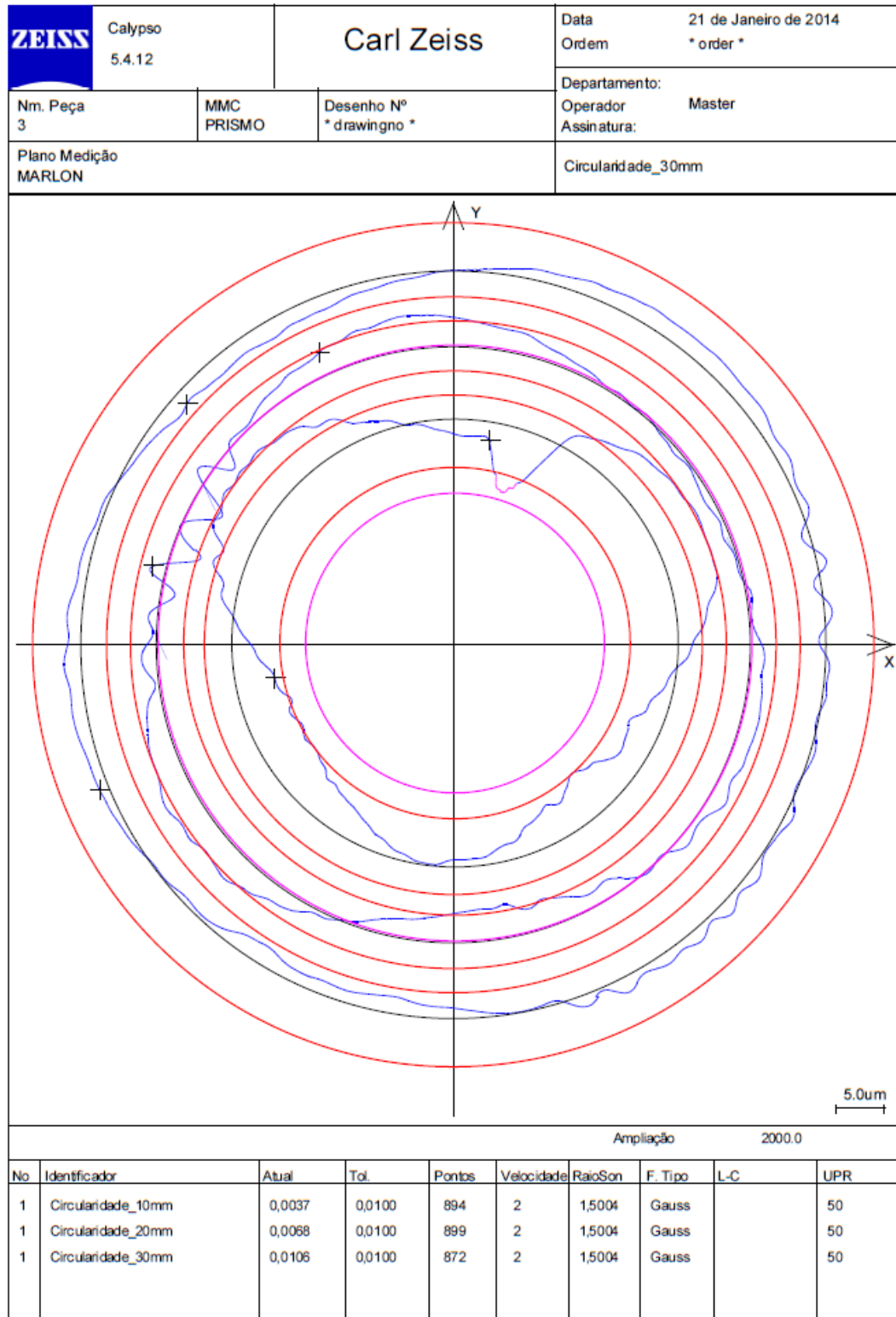
Agradecimentos

Agradecemos a empresa Robert Bosch Ltda. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Congresso Ibero-Americano 2013



Referências

- [1] Anshu D. Jayal 1, A.K. Balaji, Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features. *Wear* 267, pages 1723-1730, 2009.
- [2] Astakhov, V.P., Osman, M.O.M., Al-ata, M., Statistical design of experiments in metal cutting. Part 1: Methodology, *Journal of Testing and Evaluation*, 25 (1997), 322–327.
- [3] Astakhov, V.P., An application of the random balance method in conjunction with the Plackett-Burman screening design in metal cutting tests, *Journal of Testing and Evaluation*, 32 (2004),32–39.
- [4] Bielomatik a company of the Leuze group GmbH, Neuffen, Alemanha, Disponível em: <http://www.bielomatik.com/en/lubrication/minimalquantitylubrication/2337?pms=2337>. Acessado em: 03/02/2011.
- [5] Castillo, W., 2005, “Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal Duro com Canais Retos”, Florianópolis, Brasil.
- [6] Dhar, N. R., Ahmed, M. T., Islam, S., 2006, “An Experimental investigation o effect of minimum quaity lubrication in machining AISI 1040 steel” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, p. 748-753.
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung. DIN 8589-2-2003-09. *Fertigungsverfahren Spanen – Teil 2: Bohren, Senken, Reiben, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*.
- [8] Diniz, A.; Marcondes, F.; Coppini, N. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais.” 5. ed., São Paulo: Artliber Editora LTDA., 2006. 255 p.
- [9] Gühring – Ferramentas de corte de precisão. Catálogo do fabricante. Albstadt, 2009. 1648 p.
- [10] Ferraresi, D., 2003, “FUNDAMENTOS DE USINAGEM DOS METAIS”, 9Ed. Edgard Blücher, Campinas, Brasil.Franceschini, G., Macchietto, S., 2007, “Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art”. Londres, Inglaterra.
- [11] Heinemann R., Hinduja S. , Barro G., Petuelli G., 2005, Effect of MQL on the tool life on small twist drills in deep hole drilling, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46.
- [12] KÖNIG, Wilfried; KLOCKE, Fritz. *FERTIGUNGSVERFAHREN DREHEN, FRÄSEN, BOHREN*, 5. ed., Aachen: Editora Springer, 1997.
- [13] Lawal S. A., Choudhury I. A., Nukman Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, pages, 210 e 221, 2012.
- [14] Lincoln Cardoso Brandao a*, Reginaldo Teixeira Coelho b, Carlos Henrique Lauro Contribution to dynamic haracteristics of the cutting temperature in the drilling process considering one dimension heat flow
- [15] Lubrix GmbH. Disponível em: <http://www.lubrix.de>. Acessado em 14/02/2011.
- [16] Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D., 2005, “Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1436-1432.
- [17] Rodrigo Panosso Zeilmann a, Walter Lindolfo Weingaertner b Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4Vwith minimal quantity of lubricant
- [18] Stemmer, C.E., 2005, “FERRAMENTAS DE CORTE”, 2ª Ed., UFSC, Florianópolis, Brasil.
- [19] Trent, Wdward; Wright, Paul. *Metal Cutting*. 4 ed., Woburn: Butterworth Heinemann, 2000. 446 p.
- [20] Zeilmann, R.P., Nicola, G.L., Teixeira, C.R., Heiler, R., Vacaro, T. e Bordin, F., 2009, “Desgaste em brocas de metal duro na usinagem do aço AISI P20”, *Anais do 9º Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Las Palmas de Gran Canaria*.
- [21] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., Wakabayashi, T., 2004, “Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”*CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 53, 2ª Ed., pp. 511-537.
- [22] Wosniak, F. A., 2011, “Estudo da usinabilidade do aço 50CrMoS4 no processo de furação profunda”. Curitiba, Brasil.
- [23] Wosniak, F. A., Oliveira, O., Machado, E., 2007, “Estudo de usinabilidade do aço SAE 4144 no processo de furação profunda utilizando metodologia de “design of experiment” e emissão acústica”. Curitiba, Brasil.

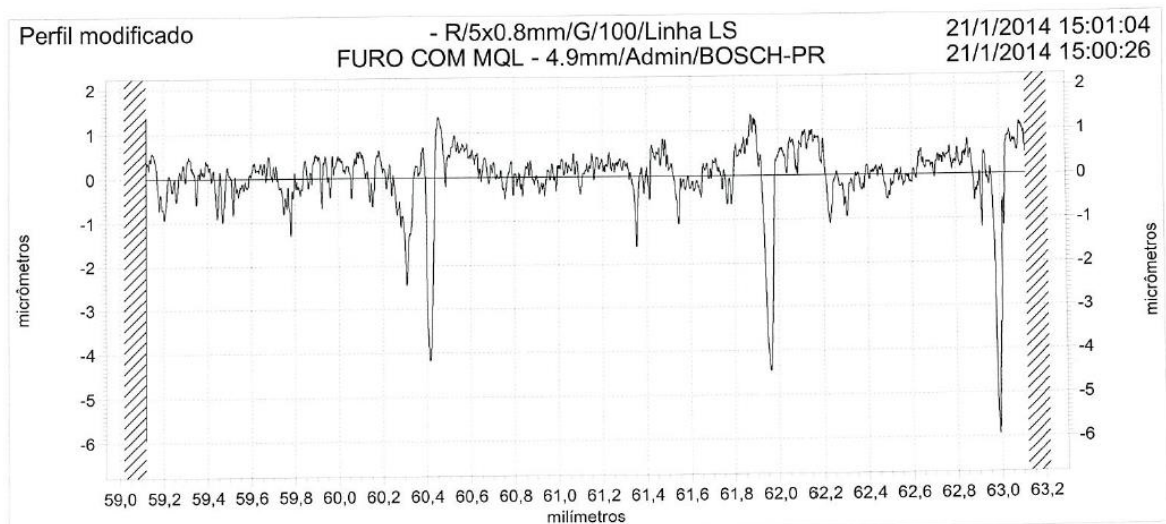
ANEXO B – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE DO FURO COM MQL



ANEXO C – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO GEOMÉTRICA E RUGOSIDADE DO FURO COM MQL

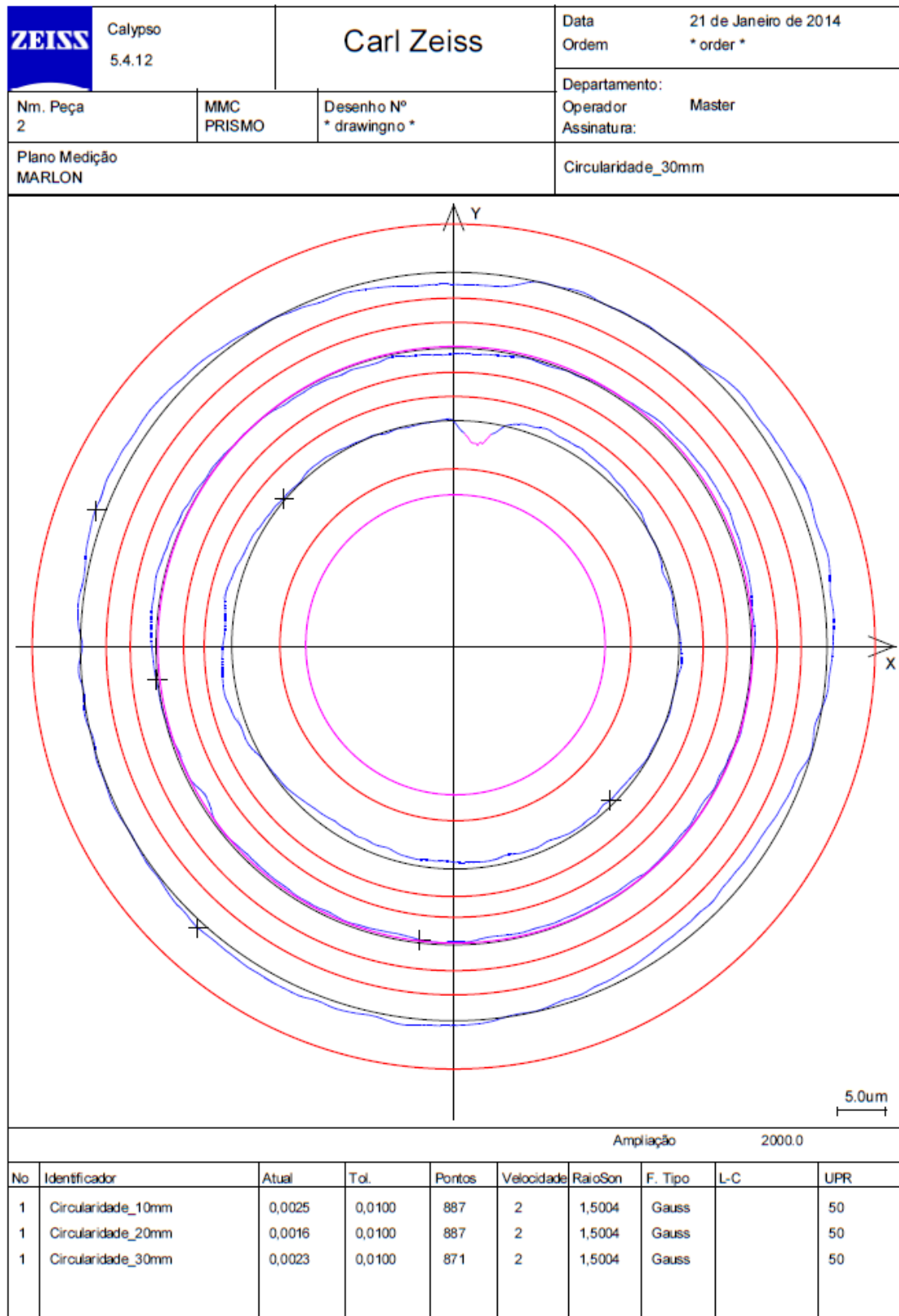
	ZEISS PRISMO 2741	Data 21 de Janeiro de Hora 3:27:29 pm	
Inspetor Roque	Turno de Trabalho 2º turno	Nome Plano MARLON	
Numero de tipo	Maquina QMM61	Nr_Maquina 0	
N.º de Peça Incremental 4	Solicitante Marlon / MQL	Duração Medição 00:01:49,0	Pagina De 1

Name	ID	Actual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<- -->
Diametro_10mm	D	4.0150	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0150	-
Diametro_20mm	D	4.0167	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0167	-
Diametro_30mm	D	4.0173	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0173	-
Circularidade_10mm	Circ GDT	0.0037	0.0000	0.0100		0.0037	-
Circularidade_20mm	Circ GDT	0.0068	0.0000	0.0100		0.0068	--
Circularidade_30mm	Circ GDT	0.0106	0.0000	0.0100		0.0106	0.0006
Posição	Pos2d GDT	0.0750	0.0000	0.1000		0.0750	--
	X	0.0355	0.0000			0.0355	
	Y	-0.0122	0.0000			-0.0122	





Ra	0,4473 μm	Rt	7,3180 μm
Rz	4,5573 μm		
Rz1max	7,0965 μm		

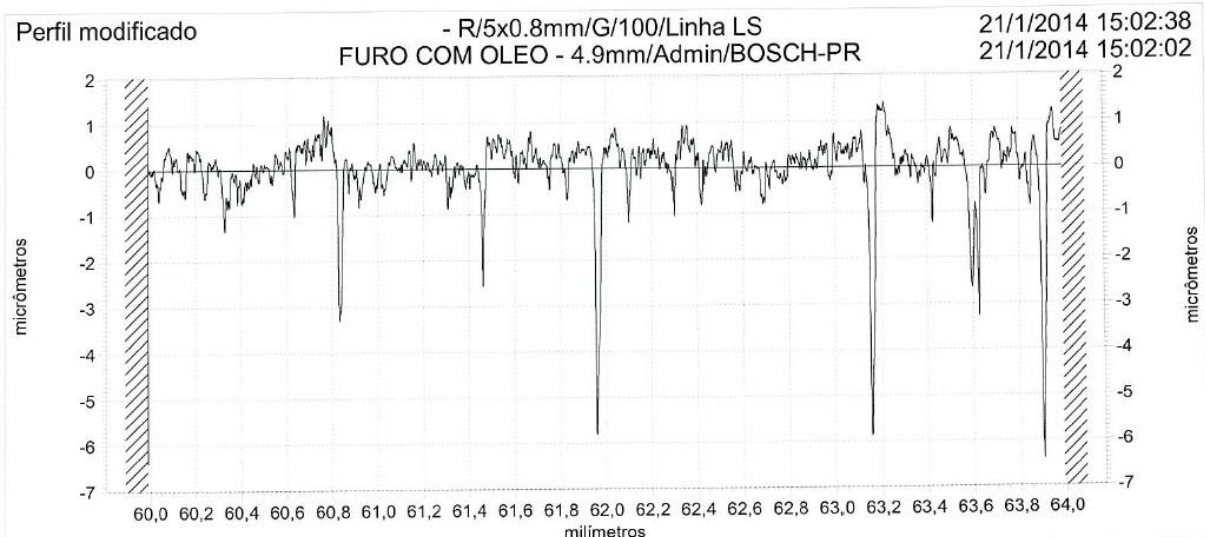
ANEXO D – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DA CIRCULARIDADE DO FURO COM JORRO DE ÓLEO



ANEXO E – RELATÓRIO DE MEDIÇÃO GEOMÉTRICA E RUGOSIDADE DO FURO COM JORRO DE ÓLEO

	<u>ZEISS PRISMO 2741</u>	Data 21 de Janeiro de 2014 Hora 3:10:55 pm	
Inspetor Roque	Turno de Trabalho 2º turno	Nome Plano MARLON	
Numero de tipo	Maquina QMM61	Nr_Maquina 0	
N.º de Peça Incremental 2	Solicitante Marlon / Oleo	Duração Medição 00:02:08,0	Pagina De 1

Name	ID	Actual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<- ->
Diametro_10mm	D	4.0119	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0119	-
Diametro_20mm	D	4.0115	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0115	-
Diametro_30mm	D	4.0110	4.0000	0.0500	-0.0500	0.0110	-
Circularidade_10mm	Circ GDT	0.0025	0.0000	0.0100		0.0025	-
Circularidade_20mm	Circ GDT	0.0016	0.0000	0.0100		0.0016	-
Circularidade_30mm	Circ GDT	0.0023	0.0000	0.0100		0.0023	-
Posição	Pos2d GDT	0.0726	0.0000	0.1000		0.0726	--
	X	-0.0172	0.0000			-0.0172	
	Y	0.0320	0.0000			0.0320	



Ra	0,4383 μm	Rt	7,8230 μm
Rz	5,7206 μm		
Rz1max	7,8230 μm		