



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

AValiação DO DESEMPENHO DE BROcas HELICOIDais DE Aço RAPIDO
REVESTIDAS NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR GGG50

FERNANDO MICHELON MARQUES

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

PORTO ALEGRE,
2012

FERNANDO MICHELON MARQUES

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BROCAS HELICOIDAIS DE AÇO RAPIDO
REVESTIDAS NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO NODULAR GGG50

Dissertação submetida ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha.

Área de Concentração: Processo de Fabricação

PORTO ALEGRE,
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng^o. Eduardo Luis Schneider

Prof. Dr. Eng^o. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler

Prof. Dr. Eng^o. Alexandre Milanez

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGE3M

Dedico este trabalho

*A meus pais Luiz Carlos e Rosemeri, por nunca
terem deixado render-me diante de situações
adversas e todo carinho, a minha esposa Daiany
que mesmo em momentos de desconforme sempre
esteve a meu lado. E ao meu filho Luis Felipe
responsável pela minha razão de viver.
A todos que incentivaram e foram
responsáveis pelo sucesso de mais uma etapa.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha pela orientação e apoio durante todo transcorrer do trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler pela co-orientação, mesmo que não oficializada procurou auxiliar de alguma forma.

A Sr. Marcos Aurélio Spillere, proprietário da empresa Fundação Nobre, pelo fornecimento dos materiais e realização dos testes em campo, e pela confiança depositada durante o ano de 2011.

Ao Sr. Maurício, da empresa Oerlikon Balzers, pela realização dos revestimentos nas brocas de forma espontânea.

Aos colegas Rodrigo Cardoso Costa, Richard de Medeiros Castro, Giovanni Rocha Santos, Patrik Neves, Richard Costa, que apoiaram a realização do trabalho sempre com incentivo e comprometimento para conclusão de mais uma etapa de nossas vidas.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	2
1.2	OBJETIVO GERAL	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2.	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	PROCESSO DE FURAÇÃO	4
2.2	TIPOS DE BROCAS	7
2.3	BROCAS HELICOIDAIS	8
2.4	PARTES QUE COMPÕEM UMA BROCA HELICOIDAL.	9
2.5	GEOMETRIA DA BROCA HELICOIDAL	10
2.6	AFIAÇÃO DE BROCAS HELICOIDAIS	12
2.7	SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE BROCAS HELICOIDAIS	14
2.7.1	<i>Porta Pinça</i>	15
2.7.2	<i>Hidráulico</i>	15
2.7.3	<i>Contração Térmica</i>	16
2.7.4	<i>Sistema Híbrido (Sistema Hidro-Mecânico);</i>	17
2.8	DESGASTE DE FERRAMENTAS	18
2.9	PARÂMETROS DE USINAGEM	20
2.10	MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO	23
2.11	MATERIAIS DE FERRAMENTAS	24
2.11.1	<i>Aço Rápido Comum;</i>	25
2.11.2	<i>Aço Rápido Sinterizado;</i>	27
2.11.3	<i>Metal Duro;</i>	28
2.11.4	<i>Revestimentos</i>	28
2.12	FERROS FUNDIDOS	31
2.12.1	<i>Ferro Fundido Cinzento</i>	32

2.12.2	<i>Ferro fundido branco</i>	33
2.12.3	<i>Ferro fundido vermicular</i>	34
2.12.4	<i>Ferro fundido maleável</i>	34
2.12.5	<i>Ferro fundido nodular</i>	35
2.13	TESTE DE INDENTAÇÃO	36
2.14	QUALIDADE DA SUPERFÍCIE	37
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	CORPOS DE PROVA	40
3.2	FIXAÇÃO DAS FERRAMENTAS:	43
3.3	MÁQUINA PARA REALIZAÇÃO DE TESTES:	43
3.4	BROCAS UTILIZADAS	45
3.5	MEDIÇÃO DOS FUROS:	47
3.6	CARACTERÍSTICAS DO ESTEREOSCÓPIO:	47
3.7	ENSAIO DE ADESÃO DO REVESTIMENTO	48
3.8	PARÂMETROS UTILIZADOS	49
3.9	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE DOS FUROS:	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	ENSAIO DE ADESÃO VDI	52
4.2	ENSAIOS DE FURAÇÃO	53
4.3	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	58
4.4	MEDIÇÃO DOS FUROS	62
4.5	ANÁLISE DO DESGASTE E CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
4.6	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DAS FERRAMENTAS COM REVESTIMENTO ALCrN	66
5.	CONCLUSÕES	71
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7.	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipos de furação com ferramentas de geometria definida segundo DIN 8589....	6
Figura 2.2 Algumas formas de obtenção de furos	6
Figura 2.3 Analogia de uma broca helicoidal com uma ferramenta de torneamento	9
Figura 2.4 Broca helicoidal segundo DIN 1412	9
Figura 2.5: Gumes de uma broca helicoidal	10
Figura 2.6 Tipos de broca quanto a hélice: (a) tipo H, (b) tipo N e (c) tipo W	11
Figura 2.7 Geometria da ponta de uma broca helicoidal	12
Figura 2.8 Afinação da aresta transversal de corte	13
Figura 2.9 Afiação cruzada da aresta transversal de corte	13
Figura 2.10 Afiação com ângulo de ponta duplo	14
Figura 2.11 Sistema de fixação porta pinça	15
Figura 2.12 Dispositivo de fixação hidráulico	16
Figura 2.13 Sistema de contração térmica (a) em corte, (b) indicação de aquecimento	17
Figura 2.14 Sistema de fixação hidro-mecânico	17
Figura 2.15 Falhas em ferramentas de corte.....	18
Figura 2.16 Diagrama dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte	19
Figura 2.17 Desgaste de flanco de broca helicoidal	21
Figura 2.18 Representação de parâmetros de usinagem em brocas helicoidais	22
Figura 2.19 Diagrama da aresta de corte com formação de cavaco	24
Figura 2.21 Comparativo entre os revestimento TiAlN monocamada (a) e TiAlN multicamada (b)	30
Figura 2.22 Classes de qualidade da adesão de revestimentos em PVD de acordo com a norma VDI 3198: 1991	37
Figura 2.23 Avaliação de superfície	38
Figura 3.1 Amostra de ferro fundido, sem ataque, ampliação de 200X	41
Figura 3.2 Amostra de ferro fundido com ataque de nital 2%, ampliação de 200X	41

Figura 3.3 Desenho das placas após furação (a) dimensões das margens e (b) dimensão das placas	42
Figura 3.4 Placas de ferro fundido nodular após os ensaios de furação.....	43
Figura 3.5 Sistema de fixação da ferramenta na máquina.....	43
Figura 3.6 Broca em processo de batimento para realização de testes de usinagem.....	44
Figura 3.7 Broca helicoidal conforme DIN 338 (a) comprimento total e (b) detalhe do ângulo de ponta.....	45
Figura 3.8 Brocas para início dos testes de usinagem, (a) sem revestimento, (b) com revestimento do composto TiAlN e (c) com revestimento do composto AlCrN	46
Figura 3.9 Micrômetro interno utilizado para realização de medições dos furos.....	47
Figura 3.10 Sistema de aquisição de imagens	48
Figura 3.11 Estereoscópio realizando aquisição de imagens	48
Figura 3.12 Corpos de prova para ensaio de indentação	49
Figura 3.13 Rugosímetro realizando medição em furo de uma das placas de ferro fundido nodular.....	51
Figura 4.1 Ensaio de adesão do revestimento TiAlN com aumento de 100X.....	53
Figura 4.2 Ensaio de adesão do revestimento AlCrN com aumento de 100X	53
Figura 4.3 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	54
Figura 4.4 Desgaste de flanco das brocas não revestidas desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm	55
Figura 4.5 Desgaste de flanco das brocas com AlCrN desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm	55
Figura 4.6 Desgaste de flanco das brocas com TiAlN desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm	55
Figura 4.7 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=35$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	56
Figura 4.8 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=25$ m/min e $f_n=0,25$ mm/rot.....	57
Figura 4.9 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=35$ m/min e $f_n=0,25$ mm/rot.....	58
Figura 4.10 Rugosidade com parâmetros de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	59
Figura 4.11 Rugosidade com parâmetros de $v_c=35$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	60
Figura 4.12 Rugosidade com parâmetros de $v_c=25$ m/min. e $f_n=0,25$ mm/rot	61
Figura 4.13 Rugosidade com parâmetros de $v_c=35$ m/min. e $f_n=0,25$ mm/rot.....	61
Figura 4.14 Valor de diâmetro com valores de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	62
Figura 4.15 Valor de diâmetro com valores de $v_c=35$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.....	63
Figura 4.16 Valor de diâmetro com valores de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,25$ mm/rot.....	64

Figura 4.17 Valor de diâmetro com valores de $v_c= 35$ m/min e $f_n= 0,25$ mm/rot.....	65
Figura 4.18 Teste de fim de vida das ferramentas.....	66
Figura 4.19 Flanco de uma das brocas com AlCrN, após teste de usinagem.....	67
Figura 4.20 Desgaste do gume principal da ferramenta revestida com AlCrN.....	67
Figura 4.21 Gume transversal de uma broca com AlCrN	68
Figura 4.22 Superfície da broca com material aderido.....	69
Figura 4.23 Espectro do material aderido.....	69
Figura 4.24 Espectro da superfície desgastada.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Condições e tipos mais comuns de aços rápidos	26
Tabela 2.2 Propriedades físicas de revestimentos de ferramentas	31
Tabela 2.3 Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns	32
Tabela 2.4 Propriedades mecânicas dos ferros cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT	33
Tabela 2.5 Composição química do ferro fundido maleável	34
Tabela 2.6 Classificação dos ferros fundidos nodulares, segundo a DIN	36
Tabela 2.7 Valores de R_a para processos de fabricação	38
Tabela 3.1 Composição química das placas	40
Tabela 3.2 Resultado da análise do ferro fundido nodular	42
Tabela 3.3 Programa utilizado para ensaios de furação	44
Tabela 3.4 Equivalência entre número de furos e comprimento usinado.....	46
Tabela 3.5 Parâmetros utilizados para os testes de usinagem	50
Tabela 3.6 Parâmetros para remoção de rebarbas das brocas.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
b	[mm] largura de usinagem
CG	classe de ferro fundido cinzento
CGI	classe de ferro fundido vermicular
GGG50	classe de ferro fundido nodular
d	[mm] diâmetro
DIN	<i>Deustschland Institut Normalzustand</i>
f	[mm/rot] avanço
h	[mm] espessura de usinagem
l	[mm] largura
MCI	classe de ferro fundido mesclado
M2	classe de aço rápido
n	[RPM] rotação
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>
V_c	velocidade de corte
V_f	velocidade de avanço
VB_{max}	[μ m] Desgaste de flanco máximo
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
α	ângulo de incidência
β	ângulo de cunha
ε	ângulo de quina
σ	ângulo de ponta
ψ	ângulo de gume transversal
γ	ângulo de saída

RESUMO

O uso de revestimentos na furação de metais tem o potencial de aumentar a resistência da ferramenta a temperaturas maiores, além de possibilitar a redução ou eliminação do uso de lubrificantes, reduzindo o impacto ambiental. No presente trabalho foram realizados revestimentos do tipo AlCrN e TiAlN, todos monocamada, via PVD em brocas de aço rápido AISI M2. As brocas foram testadas em ensaios de furação em cheio, a seco (sem lubrificação), no ferro fundido GGG 50 com matriz ferrítica. Foram realizados ensaios empregando-se como parâmetro de quantificação do desgaste, o valor de VB_{Max} , para brocas revestidas e não revestidas. Os parâmetros de corte trabalhados foram: velocidade de corte e avanço. Foi avaliado o comprimento usinado, entre brocas com e sem revestimento. Ensaios de adesão dos revestimentos das brocas foram realizados, além da análise de desgaste e composição química dos materiais. Os resultados mostram a influência da velocidade de corte e avanço em brocas revestidas no desgaste de flanco máximo $VB_{máx}$. A presença do desgaste por adesão mostrou-se evidente neste trabalho, porém não contribuindo para aumento significativo do desgaste de flanco VB_{Max} . Os testes realizados mostram que as aplicações de revestimentos aumentam a vida, em proporções significativas, das ferramentas testadas. As análises de tipo de desgaste predominante durante os ensaios de furação mostram o desgaste por abrasão como responsável por boa parte do fim de vida das ferramentas, seguido de um pequeno índice de adesão, em virtude da matriz predominante no ferro fundido nodular.

ABSTRACT

The use of coatings on metals drilling has the potential to increase the strength of the tool at higher temperatures and, besides enables the reduction or elimination of the use of lubricants reducing the environmental impact. In the present paper were performed coatings like TiAlN and AlCrN, all monolayer through PVD over drills HSS AISI M2. The drills were tested in essays full drilling, dry (without lubrication), in the cast iron GGG 50 with ferritic matrix. Essays were performed employing as the wear parameter, the value of VB_{Max} for coated and uncoated drill. The input parameters of the experiments were: cutting speed and feed rate, and was evaluated the length machined between coated and uncoated drills. Adhesion tests of the coatings of drills have been performed, besides the analysis of wear and chemical composition of the materials. The results showed the influence of cutting speed and feed on drills coated in maximum flank wear $VB_{m\acute{a}x}$. The presence of adhesive wear was evident in this work, but not contributing to a significant increase in flank wear VB_{Max} . It was verified that the coatings applications increase the life of the tools tested, in significant proportions. The analysis of the predominant wear type during drilling tests show the abrasive wear is responsible for much of the end of tool life, followed by a low rate of adhesion by virtue of predominant matrix nodular cast iron.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo utilizado na fabricação de componentes nos mais diversos setores industriais. Estima-se que entre 15 a 20% de todo o aço produzido no mundo seja transformado e removido por usinagem em forma de cavaco, o que evidencia que este processo apresenta perspectivas reais de aprimoramento tanto no que refere-se a maquinário quanto em ferramental (MARTINS, 2008).

A participação dos ferros nodulares na produção total de fundidos teve aumento, de 22% para 25%, no período de 2008. Estes dados demonstram que estes materiais continuam ganhando importância nas indústrias do setor metal-mecânico (POZZI, 2009).

A razão, ainda, desse baixo crescimento da aplicação do ferro fundido é sua usinabilidade, pela formação de cavacos do tipo cisalhado ou arrancado, que geram vibrações na ferramenta, e também produzem menores temperaturas na interface cavaco-ferramenta, devido ao menor atrito (SCHROETER, et al., 2001). A presença dos nódulos de grafita na estrutura dos ferros fundidos nodulares, atuando como quebra cavacos, aumentam a lubrificação entre a ferramenta de corte e a peça usinada, isso permite a melhor usinabilidade desses materiais, quando comparados com os aços ou até mesmos outras classes de ferros fundidos.

Já a matriz metálica dos ferros fundidos determina a vida da ferramenta, pois as estruturas presentes na matriz dos ferros nodulares são a ferrita e a perlita. A dureza e a usinabilidade dos ferros nodulares são determinadas pelo volume de perlita, quantidade e tamanho dos nódulos de grafita.

Para condições especiais de usinagem (corte interrompido, furação profunda), as brocas de aço rápido podem ser aplicadas, já que as mesmas apresentam maior tenacidade, possuindo, a peculiaridade de serem mais suscetíveis ao calor, porém o desgaste e as falhas prematuras das brocas de aço rápido reduzem a disponibilidade das máquinas, comprometendo a produtividade e elevando os custos de produção (NICKEL, et al., 2000).

Tratamentos superficiais são sugeridos para aumentar a dureza de peças e ferramentas empregadas na indústria, com intuito de otimizar as características físicas dos

materiais, ao mesmo tempo em que mantém um núcleo relativamente tenaz. Esta combinação de resultados pode melhorar a resistência ao desgaste abrasivo das brocas. As camadas aplicadas por PVD (*Physical Vapour Deposition*) são caracterizadas por uma alta dureza, excelente aderência, baixa porosidade, altas estabilidades química e térmica, entre outras características. Os revestimentos PVD são aplicados principalmente em ferramentas de aço rápido com temperaturas relativamente baixas (150° C e 550° C), e espessuras que variam entre 3µm a 8µm (TASSI, 2010).

1.1 Justificativa

A concorrência é a palavra de ordem da indústria automobilística e para sobreviver a essa competição a redução de custo e garantia da qualidade dos produtos são fundamentais (ROCHA, et al., 2001).

A participação da usinagem no custo final dos componentes mecânicos pode ser muito alta, mesmo existindo uma grande evolução tecnológica em usinagem, a aplicabilidade de brocas helicoidais de aço rápido continua sendo elevado em máquinas robustas, porém para processos de desbastes sem muita preocupação em tolerância dimensional, devido aproximação de medidas para posterior acabamento. Utilização esta, principalmente em empresas que estão iniciando nesta área, portanto sem muitos recursos financeiros para aquisição de maquinário moderno.

Devido a folgas e vibrações ou cortes interrompidos durante o processo de furação, brocas sólidas de metal duro são inerentemente rígidas, a carga à qual estão sujeitas é extremamente alta, aumentando os níveis de desgaste (SECO, 2002), podendo falhar em virtude de sua baixa resistência a flexão, incluindo rotações altíssimas em razão da velocidade de corte ser maior, possuir tenacidade bem maior e sendo suscetíveis em altas temperaturas, justifica-se o uso do aço rápido, mais especificamente o aço rápido M2.

O presente trabalho trata do desgaste de brocas de aço rápido revestidas e não revestidas, para o processo de furação em ferro fundido nodular GGG 50, utilizado na fabricação de cardam em máquinas agrícolas.

1.2 Objetivo Geral

Determinar a viabilidade do uso de brocas de aço rápido revestidas, na furação a seco de ferro fundido nodular GGG50, com parâmetros de corte definidos, tendo em vista o desgaste de flanco $VB_{m\acute{a}x}$.

1.3 Objetivos Específicos

- Analisar o desgaste de flanco $VB_{m\acute{a}x}$, de forma quantitativa e qualitativa, em furos realizados por brocas de aço rápido revestidas, comparando-as com não revestidas;
- Determinar o tipo de revestimento mais adequado para a aplicação em ferro fundido nodular, para posterior aplicação em escala industrial;
- Reduzir o impacto ambiental gerado principalmente com a aplicação de fluidos de corte, pela realização de ensaios a seco.
- Analisar o desempenho do revestimento realizado nas brocas diante dos mesmos parâmetros de cortes aplicados as brocas sem revestimentos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta, de forma sucinta, o embasamento teórico para auxiliar no entendimento desta dissertação. Basicamente esses conceitos serão divididos em subcapítulos que são: processo de furação, tipos de brocas, brocas helicoidais, partes que compõem uma broca helicoidal, geometria das brocas helicoidais, afiação das brocas, sistemas de fixação de brocas helicoidais, desgaste de ferramentas, parâmetros de usinagem, mecanismos de formação de cavaco, materiais de ferramentas, ferros fundidos, teste de indentação e qualidade da superfície. Com aquisição de conteúdo suficiente e bem embasado será possível sequência no trabalho realizado.

2.1 Processo de furação

Pelo fato da grande maioria das peças produzidas possuírem ao menos um furo, o processo de furação é um dos processos mais utilizados na indústria de manufatura (SMITH, 2008). Em geral, as peças são furadas em cheio ou tem seus furos aumentados pelo processo de furação (DINIZ, et al., 2008).

Conforme a norma DIN 8589, 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.

A furação com brocas está incluída no grupo de processos de fabricação por usinagem com gumes de geometria definida, sendo um dos processos mais utilizados. Junto com o torneamento, é uma das operações mais importantes, envolvendo aproximadamente 30% de todas as operações de usinagem de metal. O processo de furação é responsável por 75% do volume de material removido na usinagem de cavidades (CASTILLO, 2005).

Se a alta precisão e acabamento final são necessárias a furação, deve ser seguida por alguma outra operação, como mandrilamento e alargamento. A ferramenta de furação

mais comumente empregada é a broca helicoidal, que está disponível, comercialmente, nos diâmetros variando de 0,25 a 80 mm.

A ferramenta deste estudo é caracterizada por uma geometria conforme norma DIN 338, correspondente a uma broca helicoidal de haste cilíndrica, e a velocidade de corte é uma função do diâmetro dos gumes em relação ao centro da broca, material da ferramenta, material da peça, condições de usinagem, etc. (YOUSSEF, et al., 2008).

As operações de furação são realizadas sempre sob condições relativamente severas, principalmente quando o movimento de rotação esta na ferramenta e não na peça, havendo assim a possibilidade de problemas e excentricidade do furo (STEMMER, 2007). Problemas são classificados como severos em virtude da velocidade de corte não uniforme, pois varia desde zero no centro do furo até um máximo na periferia (KONIG, et al., 1997).

Além dos agravantes citados anteriormente pode ser citada a ausência ou carência de fluido de corte, que deve atuar como refrigerante e lubrificante, bem como meio de transporte dos cavacos, porém chega com dificuldades na aresta da ferramenta, onde é mais necessário.

O processo de furação pode ser classificado em (FERRARESI, 1970):

- Furação em cheio: processo destinado à obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, onde todo o material contido no volume do furo é retirado na forma de cavaco,
- Furo com rebaixo: processo de furação onde se tem dois diâmetros diferentes no mesmo furo, porém com profundidades diferentes. O diâmetro menor é passante e o maior tem uma menor profundidade, e geralmente é utilizado para alojar parafusos (ARMY, 1996).
- Furo escariado: processo de furação onde o diâmetro maior é em ângulo. Utiliza-se para alojar parafusos de cabeça chata ou cônica (YOUSSEF, et al., 2008).
- Furo cego: processo de furação onde uma parte do material contido no volume do furo não é removido, ou seja, a ferramenta não atravessa a peça.
- Trepanação: processo de furação em que apenas uma parte do material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço após a operação (SANTOS, 2008).

A figura 2.1 mostra alguns tipos de processos de furação com ferramentas de corte com geometria definida.

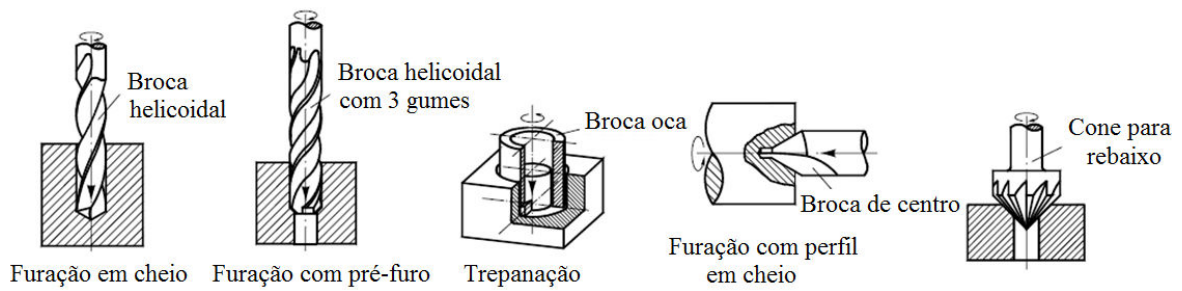


Figura 2.1 Tipos de processos de furação com ferramentas de geometria definida segundo DIN 8589 (KONIG, et al., 1997)

Os furos podem ser realizados por diferentes processos, fazer a escolha correta é uma questão de satisfazer a qualidade do furo com uma boa capacidade com menor custo por furo realizado (COROMANT, 2011). Sendo assim, cada processo torna-se importante com suas características dentro da manufatura.

Entre os processos mais utilizados, podem ser ilustrados na figura 2.2 e citados: a conformação por punções, feixes de energia, corte por remoção química, eletroerosão e outros, onde a produtividade é o objetivo principal destes processos (OBERG, et al., 2000). Nos processos tradicionais, têm-se a furação e o fresamento com furo interpolado (CAVALER, 2003), que são processos de usinagem realizados por remoção de material com geração de cavaco, e muitas vezes necessitam de um processo posterior para atingir o acabamento dimensional de superfície desejado no furo. Este processo posterior pode ser o mandrilamento, o alargamento, a retificação interna ou até mesmo o brochamento.

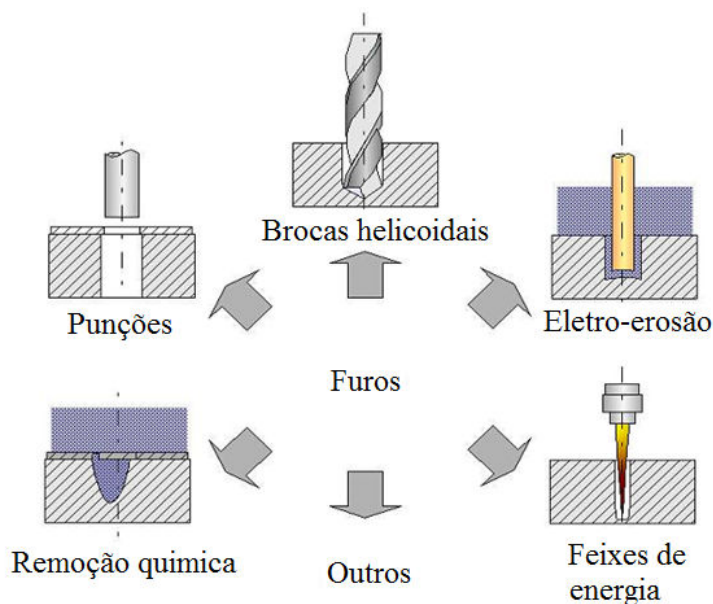


Figura 2.2 Algumas formas de obtenção de furos (STOETERAU, 2007)

Os processos de acabamento de furos são caracterizados pelo pequeno volume de cavaco que retiram e pela possibilidade de melhor qualidade de superfície e dimensional. Os processos são selecionados conforme as seguintes condições: o material a ser usinado, o tipo de furação a ser realizada, a relação comprimento/diâmetro, o acabamento de superfície e dimensões, e as tolerâncias geométricas (PANGRACIO, 2003).

A furação para grandes diâmetros pode ser realizada com a utilização de várias brocas até chegar ao diâmetro desejado. Faz-se necessário um investimento em brocas, e isso também aumenta o tempo despendido para as trocas de ferramentas (EVANS, 2010).

Recomenda-se chegar ao diâmetro máximo com uma única broca, porém, para alguns casos, tem-se que realizar várias operações de furação e trocas de ferramentas, podendo acarretar em desvios de linearidade e deficiência na centralização dos furos. Uma possibilidade é a furação com retração para remoção de cavaco (pica-pau), porém que também aumenta os tempos de usinagem.

Para brocas de pequenos diâmetros em que os canais também são menores, em comparação a brocas de diâmetros maiores, com relação de comprimento/ diâmetro, maior que três vezes, aconselha-se a retração da broca chamada furação “pica-pau”, com objetivo de facilitar a remoção do cavaco da ponta da broca e auxiliar a chegada do fluido na área de corte (OBERG, et al., 2000).

2.2 Tipos de brocas

Para a determinação do tipo de broca a ser utilizado deve-se conhecer a característica do processo como: diâmetro do furo, profundidade, erros de forma, medidas e volume de produção (STEMMER, 2007). Na sequência estão explanados os principais tipos de brocas, utilizados no setor metal mecânico:

- **Brocas helicoidais:** as brocas helicoidais são projetadas para furação em cheio e para peças com pré-furos. São classificadas de acordo com o tipo de material do qual são fabricadas, forma da haste, número de canais, sentido de corte, comprimento, diâmetro e afiação da ponta (CASTILLO, 2005).
- **Brocas helicoidais com pastilhas de metal duro:** são empregadas com sucesso, em materiais muito abrasivos como concreto, plásticos, cerâmica, não metálicos, ferros fundidos duros e ligas leves de silício. Em aços, empregada quando a vida das brocas de aço rápido torna-se pequena (STEMMER, 2007).

- **Brocas escalonadas:** são ferramentas que possuem dois ou mais diâmetros diferentes dispostos de forma escalonada e retificados conforme a padronização das brocas helicoidais. Utilizadas para produção em massa nas operações combinadas de furação, alargamento ou chanframento (STEMMER, 2007).
- **Brocas de centro:** são utilizadas para marcar o centro de furos. Utilizada em operações na qual a peça será fixa, para possível usinagem profunda ou de precisão. Também considerada uma broca para operações de furar e escarear (CASTILLO, 2005).
- **Brocas com dutos de refrigeração:** os canais que atravessam a broca no sentido longitudinal têm por objetivo permitir a injeção de fluido à alta pressão na região de corte, o que promove a retirada de cavacos, impedindo que estes venham a obstruir a saída do furo e causar danos a sua superfície interna. A haste deste tipo de broca pode apresentar forma cilíndrica ou cônica. As brocas com haste cilíndrica são adequadas para executar furos profundos em metais de dureza elevada. As brocas com hastes cônicas são utilizadas em furação normal ou quando há dificuldade de acesso do fluido à região do corte (CASTILLO, 2005).
- **Brocas canhão:** utilizadas para furos profundos em que a relação comprimento usinado (l) e diâmetro da ferramenta (d) seja superior a 5, chegando até 125, normalmente dotadas de pastilha de metal duro em sua parte cortante e dutos para refrigeração interna sob pressão, para expulsão do cavaco da área de corte (DINIZ, et al., 2008).
- **Broca oca de trepanação:** este tipo de broca é utilizado para furos de grandes diâmetros (acima de 120 mm) em operações onde a aplicação de outras brocas resultaria em grande desperdício de material na forma de cavaco e um maior tempo de usinagem. O uso deste tipo de broca é exclusivo para produção de furos passantes, uma vez que a usinagem acontece na periferia do furo mantendo intacto o material da parte central, que pode ser reaproveitado (OLIVEIRA, 2008).

2.3 Brocas helicoidais

Sua forma construtiva é composta de uma haste cilíndrica e uma parte cortante que pode ser afiada de maneiras distintas conforme o material a ser usinado. Geralmente apresenta dois gumes principais ligados através da aresta transversal, contudo podem ter três ou mais gumes cortantes, a fim de reduzir os erros de posicionamento, melhorar o fluxo de cavacos e reduzir as forças de corte e avanço (OLIVEIRA, 2008).

Analogicamente como representado na figura 2.3, a ferramenta de furação compara-se em sua estrutura com ferramentas de torneamento.

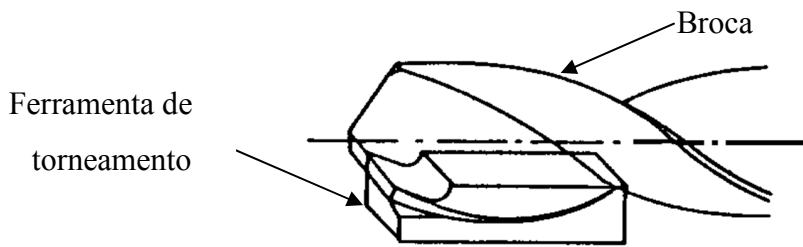


Figura 2.3 Analogia de uma broca helicoidal com uma ferramenta de torneamento (STEMMER, 2005)

O formato da haste juntamente com o diâmetro, tipo de afiação, comprimento total e do gume, sentido de corte, tipo de material da ferramenta e número de canais, são itens necessários para a especificação de brocas helicoidais, indicados na figura 2.4 (STEMMER, 2007).

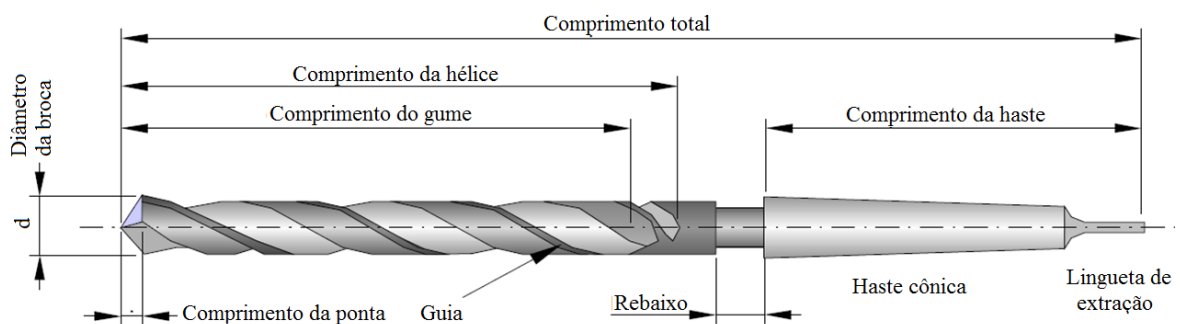


Figura 2.4 Broca helicoidal segundo DIN 1412 (KONIG, et al., 1997)

2.4 Partes que compõem uma broca helicoidal.

As partes que compõem uma broca helicoidal são:

- **Canais:** tem por função a remoção de cavados durante o processo além de facilitar a entrada de fluido de corte quando há inexistência de canais de refrigeração na broca (STEMMER, 2007).
- **Gume principal:** em brocas helicoidais existem dois gumes, diferentemente das ferramentas convencionais de torno que possuem apenas um gume, porém com mesmas funções destas. Os gumes são paralelos entre si olhando de frente e vistos de lado formam

o ângulo de ponta σ , que dependendo do tipo de material a ser furado possui um ângulo diferente. Para aplicação geral é de $\sigma = 118^\circ$.

- **Gume transversal:** formado pelos gumes principais e situado na ponta da broca (STEMMER, 2007). A geometria da broca helicoidal apresenta superfícies e arestas de corte como a ferramenta de torneamento, contudo há dois gumes na parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte, formadas pela intersecção das superfícies de saída e folga e pelo gume transversal que devido ao movimento de avanço se torna uma parte integrante do gume principal (JUNIOR, 2007).
- **Guias e nervuras:** tem a função de guiar a broca dentro do furo e evitar que toda parede externa da broca atrite com as paredes do furo, reduzindo os esforços necessários para a furação (DINIZ, et al., 2008).
- **Haste:** apresenta-se de forma cônica ou cilíndrica, as hastes cônicas respondem a norma DIN345, e variam de diâmetro de 5 a 100 mm (STEMMER, 2007).
- **Núcleo:** confere rigidez à broca e possui espessura de aproximadamente $0,16xd$, onde d é o diâmetro da broca (FERRARESI, 1970).

As partes da broca descritas anteriormente podem ser visualizadas de acordo com a figura 2.5

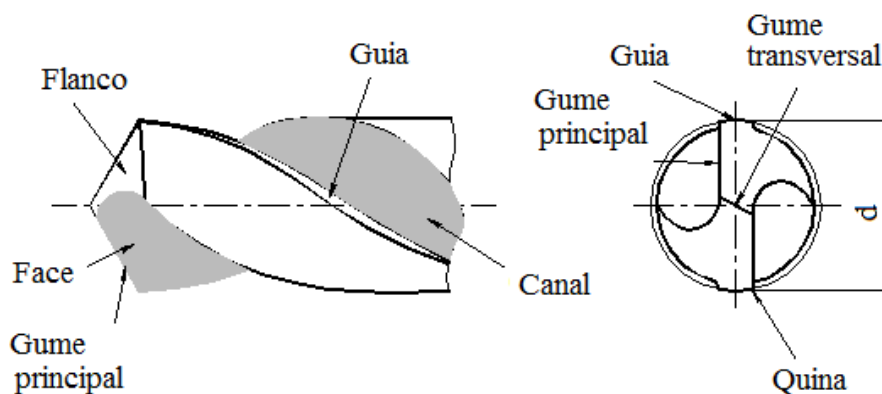


Figura 2.5: Gumes de uma broca helicoidal (MOCELIN, 2002)

2.5 Geometria da broca helicoidal

O desempenho de uma broca helicoidal está ligado a sua geometria, que compreende os seguintes elementos (STEMMER, 2007):

- **Ângulos de hélice δ :** é o ângulo da helicóide dos canais da broca. Classificam-se três tipos de brocas quanto ao ângulo de hélice, conforme a figura 2.6: tipo H possui passo

longo, recomendado para materiais que formam cavacos curtos, tais como ligas de cobre, liga de zinco, borracha dura, baquelite e certos materiais plásticos; tipo N possui passo normal e é recomendada para materiais mais comuns, como aços, ferros fundidos e materiais similares; tipo W: possui passo curto e é recomendada para materiais que formam cavacos longos, tais como ligas de alumínio, magnésio, etc (MARTINS, 2008).

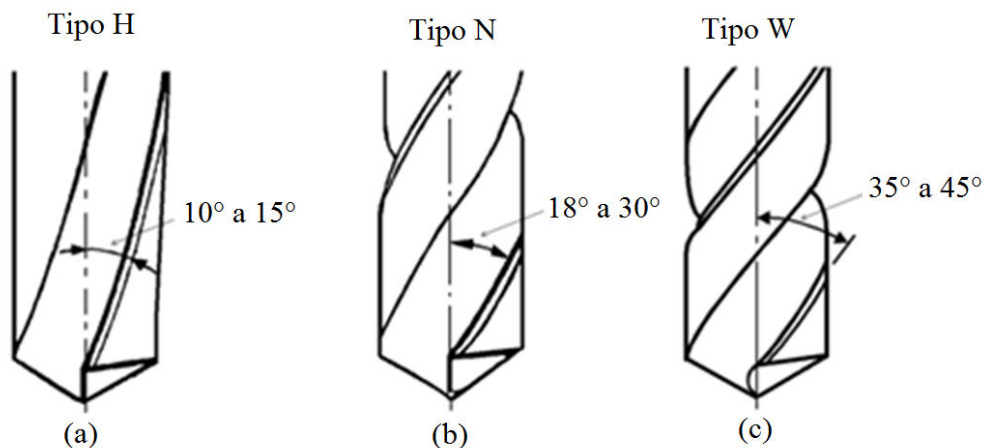


Figura 2.6 Tipos de broca quanto ao ângulo de hélice: (a) tipo H, (b) tipo N e (c) tipo W

- **Ângulos de ponta σ :** é o ângulo formado pelos dois gumes, no plano que contém o eixo principal da broca. Para ângulos de ponta menores que 118° os gumes principais ficam convexos. Para maiores que 118° os gumes ficam côncavos. O emprego de um ângulo de ponta menor faz com que o cavaco seja mais fino e mais largo. Para o caso de alguns materiais de difícil usinabilidade, o cavaco mais espesso é mais vantajoso, pelo fato de fazer contato na face, num ponto mais afastado do gume. Com o aumento do ângulo de ponta a centragem da ferramenta e o momento torçor tendem a diminuir (CASTILLO, 2005).
- **Ângulo de incidência α :** tem como função principal evitar o atrito entre a superfície de corte e o flanco da ferramenta e permitir que o gume penetre no material e o corte livremente. Se o ângulo de incidência é muito pequeno, o gume não pode penetrar convenientemente no material e a ferramenta cega, sem corte, rapidamente. Assim, ocorre forte atrito com a peça, superaquecimento da ferramenta e mau acabamento superficial. Se o ângulo de incidência é demasiadamente grande, o gume quebra ou pode sofrer pequenos lascamentos em virtude do apoio deficiente (CASTILLO, 2005).
- **Ângulo do gume transversal ψ :** é o menor ângulo formado entre os gumes principais e o gume transversal. Este ângulo é determinado pelo ângulo de incidência

(STEMMER, 2007). Na figura 2.7 é apresentado a geometria da ponta de uma broca helicoidal.

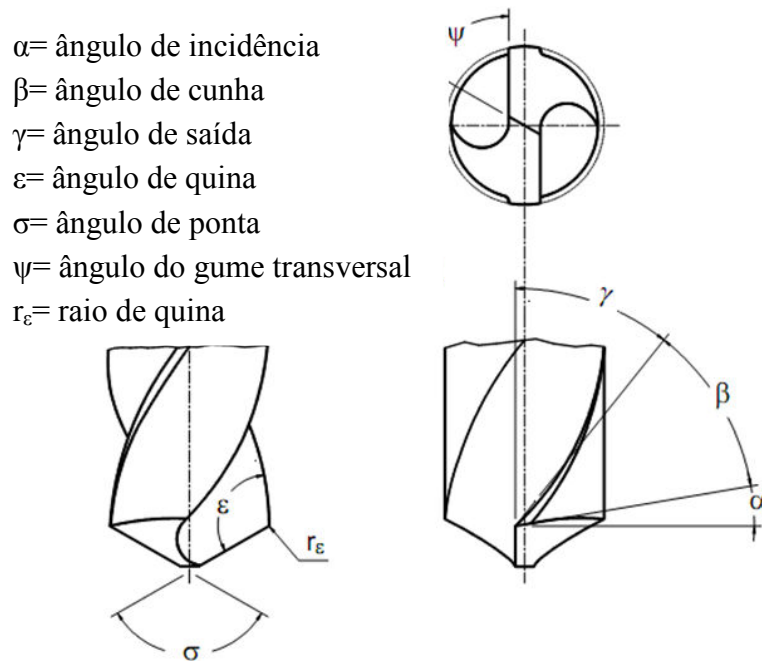


Figura 2.7 Geometria da ponta de uma broca helicoidal (CASTILLO, 2005)

2.6 Afição de brocas helicoidais

O desempenho das brocas helicoidais evoluiu de forma significativa com o surgimento de novos procedimentos e afiações. 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 (OLIVEIRA, 2008).

O desempenho das brocas helicoidais evoluiu de forma significativa com o surgimento de novos procedimentos e afiações, tais como determinadas na norma NBR-6176:

- Afição da aresta transversal, figura 2.8: 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, 1970).

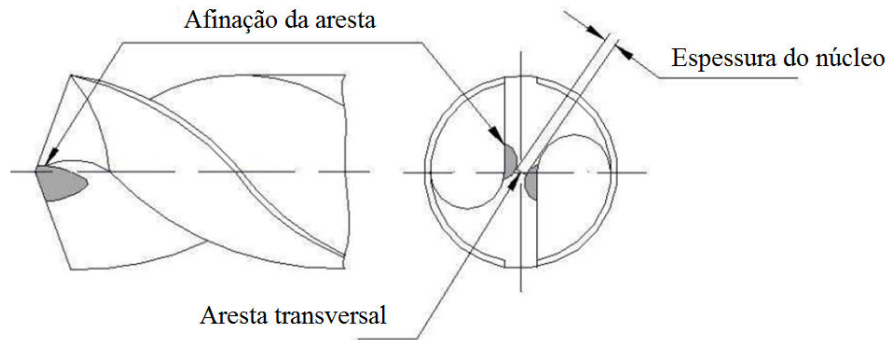


Figura 2.8 Afinação da aresta transversal de corte (OLIVEIRA, 2008)

- Afiação cruzada, figura 2.9: afiação especial (formato C), aplicada em furos profundos e na usinagem de materiais duros como o CGI. 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. Nesta afiação é retificado um rebaixo nos flancos da broca apresentando-se como uma segunda superfície de incidência que reduz ou mesmo elimina o gume transversal (STEMMER, 2007).

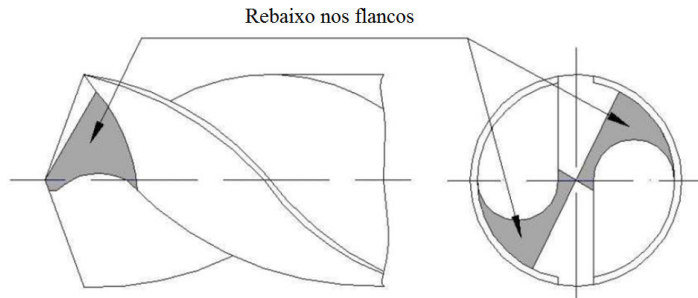


Figura 2.9 Afiação cruzada da aresta transversal de corte (OLIVEIRA, 2008)

- Afiação com ângulo de ponta duplo, figura 2.10: afiação especial (formato D), aplicada na usinagem do ferro fundido. Nesta ferramenta além do ângulo de ponta principal, em geral com 118° , é afiado um segundo ângulo de ponta com 90° na parte exterior da aresta principal de corte. Recomenda-se que o segundo ângulo de ponta (90°) tenha um comprimento de $1/3$ da aresta principal de corte. Este ângulo tem como objetivo aumentar o comprimento da aresta principal de corte e reforçar as pontas da broca, região onde as velocidades de corte são maiores. Este tipo de afiação possibilita o aumento da vida da ferramenta (STEMMER, 2007).

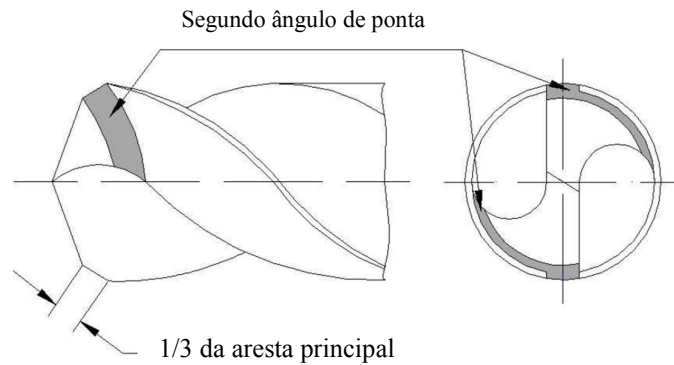


Figura 2.10 Afiação com ângulo de ponta duplo (OLIVEIRA, 2008)

- Afiação em S: Essa afiação apresenta a aresta transversal com ponta em espiral, ou *spiral point drill* em forma de S e gera 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 para a broca (CASTILLO, 2005).
- Afiação com ponta de centragem: é utilizada para furação de chapas. O ângulo de ponta σ varia de 150° a 180° , dependendo da espessura da chapa a ser furada. É empregado em furações de pouca profundidade ($l/d < 2$) (STEMMER, 2007).

2.7 Sistemas de fixação de brocas helicoidais

Para definir o sistema de fixação de ferramentas deve-se definir sua finalidade juntamente com a qualidade do processo de usinagem já que o mesmo pode ser definido sendo um dispositivo que age como elemento intermediário entre o fuso da máquina ferramenta e a ferramenta de corte, sem que haja diminuição de eficiência dos itens envolvidos (DORMER, 2008).

Batimento radial, resistência à deflexão, transmissão de torque, balanceamento para altas velocidades do fuso e refrigeração interna são fatores importantes ao escolher o porta-ferramenta (COROMANT, 2011).

Dentre os sistemas de fixação de ferramentas para o processo de furação em máquinas CNC destaca-se porta pinça, hidráulico, por contração térmica e híbrido.

2.7.1 Porta Pinça

O mandril com pinça (figura 2.11) é o mais empregado do desbaste ao semi-acabamento, possuindo uma boa transmissão de torque, necessitando de limpeza e troca de pinças. Alcança-se um batimento entre 0,01 a 0,03 mm em um comprimento de até 4 vezes o diâmetro dos gumes (4xd). Apresenta uma baixa repetibilidade por problemas de montagem da ferramenta no suporte. Devido à versatilidade, robustez e baixo custo é largamente utilizado na indústria nacional (CAVALER, 2003).

Uma bucha metálica em torno da haste cilíndrica é apertada mediante uma porca dessa forma, possui grande versatilidade de montagem, pois a simples troca da pinça permite uma vasta gama de diâmetros de ferramentas, contudo a precisão de concentricidade depende de quem a monta, exigindo habilidade do operador na hora da montagem.



Figura 2.11 Sistema de fixação porta pinça (BLANES, 2011)

2.7.2 Hidráulico

O sistema de fixação hidráulico consiste em um porta ferramenta com uma bucha de dilatação cilíndrica deformável que, ao se injetar óleo na interface da bucha com a ferramenta mediante um êmbolo ativado com parafuso, provoca a dilatação da bucha de forma centralizada em direção a haste da ferramenta, representado pela figura 2.12. Esse sistema apresenta como desvantagem erro de concentricidade de fixação da ordem de 5 μ m, queda de pressão da coluna de óleo, haste da ferramenta deve ser cilíndrica e uniforme e

custo elevado para o processo, comparando-se a qualquer outro sistema de fixação (MARTINS, 2008). Uma das vantagens do sistema hidráulico de fixação é a possibilidade de amortecimento de vibrações em função do reservatório do fluido oferecer alguma capacidade de amortecer vibrações (DORMER, 2008).

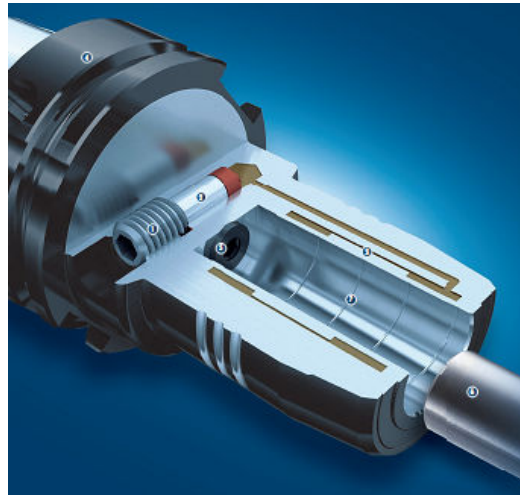


Figura 2.12 Dispositivo de fixação hidráulico (BLANES, 2011)

2.7.3 Contração Térmica

O sistema de fixação por contração térmica baseia-se na expansão proporcional dos materiais sólidos em função da temperatura. O aumento da temperatura do porta-ferramenta tem como consequência o aumento do diâmetro interno do mandril. A haste da ferramenta de corte é colocada dentro do furo do mandril porta-ferramenta, de acordo com a figura 2.13. Com o resfriamento do mandril, é obtida uma alta força de fixação radial. Considerando-se que a expansão é realizada dentro da faixa de elasticidade, especificada pelo material do porta-ferramenta, a operação é reversível e pode ser realizada tantas vezes quanto forem necessárias (CAVALER, 2003).

Apesar de possuir vantagens como: a probabilidade de desbalanceamento ser praticamente nula em razão da não existência de parafusos de fixação, possui excelente concentricidade, rigidez e operadores com pouca habilidade podem utilizar de forma eficiente (DORMER, 2008). Possui a desvantagem de baixa flexibilidade, dificuldade de troca de ferramentas, e investimento inicial alto na aquisição de dispositivos de aquecimento (COROMANT, 2011).

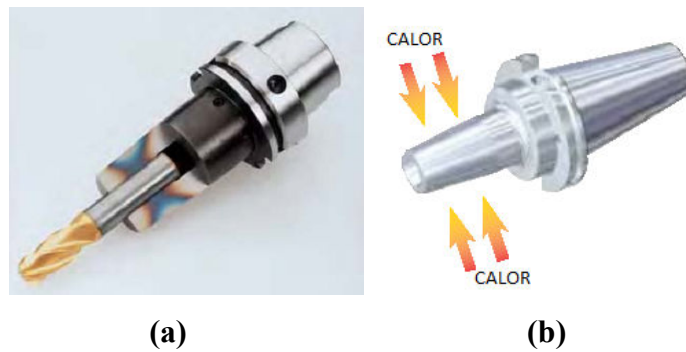


Figura 2.13 Sistema de contração térmica (a) vista em corte, (b) indicação de aquecimento (KENNAMETAL, 2011)

2.7.4 Sistema Híbrido (Sistema Hidro-Mecânico);

O mandril hidro-mecânico é empregado desde o desbaste pesado ao acabamento, possuindo a melhor transmissão de torque dos sistemas atuais de fixação, e não necessita de manutenção. Alcança-se um batimento entre 0,002 a 0,006 mm em até 4xd. Pode ser utilizado em haste cilíndrica ou *Weldon/Wistle-Notch* (com restrições). No desbaste, possui grande vantagem, pois o mecanismo é auto-travante, ou seja, não há pressão hidráulica no mecanismo durante a usinagem. A fixação se baseia no princípio de deslocamento de uma luva cônica no interior de um assento cônico do mandril (figura 2.14). O deslocamento da luva cônica é procedido por um sistema hidráulico externo, com pressão de até 700 bar (COROMANT, 2005).

Através da pressão aplicada no furo inferior, a luva cônica do mandril é deslocada para cima, sobre o assento cônico. Quando a ferramenta é fixada e, quando a pressão é aplicada no furo superior, a luva cônica do mandril é deslocada para baixo, sendo a ferramenta liberada, de acordo com a figura 2.14. Após a ferramenta ser fixada a pressão hidráulica é liberada (CAVALER, 2003).

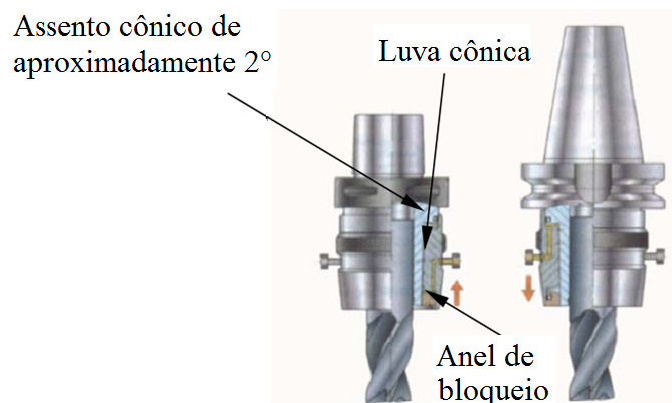


Figura 2.14 Sistema de fixação hidro-mecânico (COROMANT, 2005)

2.8 Desgaste de ferramentas

Uma das causas de paradas indesejadas de máquina na indústria é a troca de ferramenta. Causa esta originada pelo desgaste das ferramentas de corte que poderiam ser minimizadas com alteração de parâmetros de usinagem, reduzindo assim sua ocorrência.

Solicitações mecânicas, térmicas e tribológicas decorrentes dos processos de usinagem levam a desgastes e sobrecargas mecânicas e térmicas dos gumes de ferramentas de corte, que podem resultar em sinais típicos de desgaste como, desgaste de cratera, de flanco, lascamentos de várias dimensões ou deformações plásticas, figura 2.15 (CASTILLO, 2005). Os diversos mecanismos de desgaste agem simultaneamente, de forma que tanto sua causa como seu efeito dificilmente podem ser distinguidos entre si, resultando em uma complexa interação de vários fatores de desgaste (KONIG, et al., 1997).

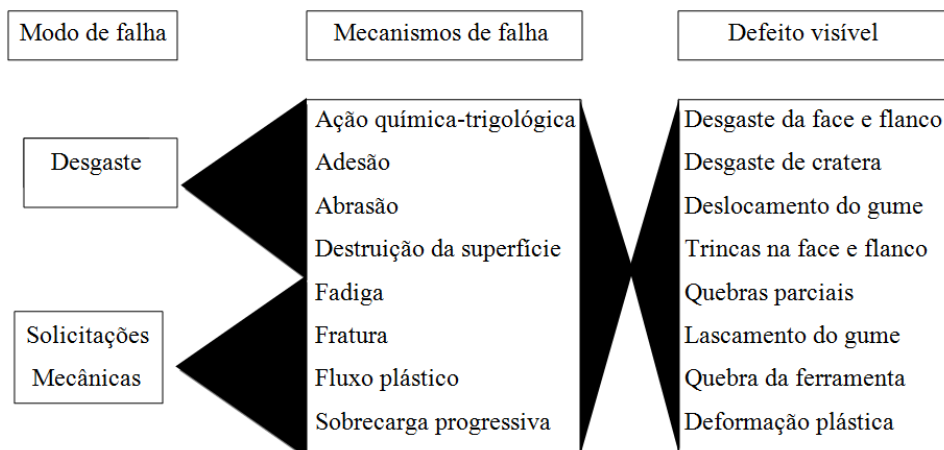


Figura 2.15 Falhas em ferramentas de corte (BUNSHAH, 2001)

A figura 2.16 apresenta um diagrama clássico, onde a importância dos quatro principais mecanismos de desgaste é ilustrada em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas, predomina o mecanismo de adesão, atuando em conjunto com a abrasão. Em temperaturas elevadas, a adesão perde lugar aos mecanismos de difusão e oxidação (KLAUBERG, 2009).

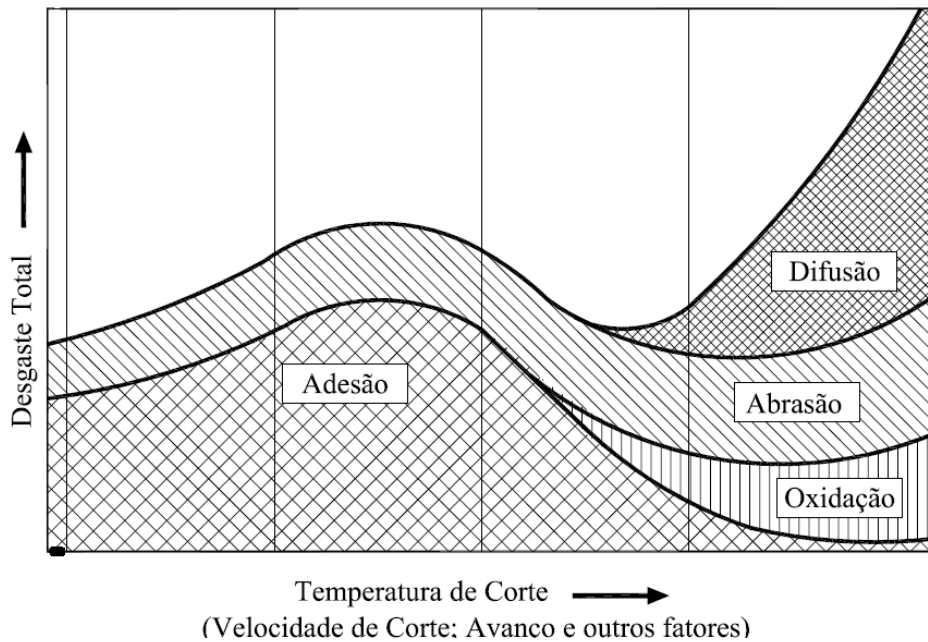


Figura 2.16 Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (KONIG, et al., 1997)

Os mecanismos de desgaste de ferramentas são detalhados da seguinte maneira:

- **Abrasão mecânica:** a abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão. No entanto, cabe destacar que ela se faz mais proeminente no desgaste de flanco, já que a superfície de folga entra em atrito com um elemento rígido (peça), enquanto a face entra em atrito com um elemento flexível (cavaco). O desgaste gerado pela abrasão é intensificado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta. Com isso, partículas da ferramenta são arrancadas à alta pressão e temperatura, em razão do atrito entre ferramenta e peça. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão. Trent relata que o desgaste por abrasão é possível responsável por atrito durante o corte por cisalhamento de material, ocasionando vibração, que posteriormente origina a falha catastrófica de ferramentas.
- **Difusão:** a difusão entre ferramenta e cavaco é um fenômeno microscópico ativado pela temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um metal a outro, dependendo da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). A difusão é responsável, sobretudo pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte.

- **Oxidação:** a exposição a altas temperaturas e a presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) gera oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades de contato cavaco/ferramenta, em virtude do acesso do ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.
- **Aderência:** se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, sob baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície de outro.

O fenômeno da aderência está presente na formação do gume postiço de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação deste. Tal fenômeno também é importante na formação do desgaste de entalhe. Além disso, a utilização adequada do fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante) bem como o revestimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito (como o nitreto de titânio) têm grande influência na diminuição desse tipo de desgaste.

2.9 Parâmetros de usinagem

Os parâmetros de usinagem na furação podem ser administrados e controlados para atender as necessidades de tempo, custo, especificação do produto, equipamento, dentre outros. São determinados dependendo das condições do equipamento, do material a ser usinado e da ferramenta de corte. O adequado controle destes parâmetros fornece uma estimativa da vida da ferramenta tendo influência no acabamento de superfície e dimensional do furo.

Condições de corte severas podem resultar em desgaste prematuro da ferramenta com graves consequências ao processo, assim como condições de corte limitadas podem influenciar na qualidade do furo e no custo de fabricação (CAVALCANTE, 2010).

As melhorias de fabricação envolvem dois aspectos: técnico e econômico. Entre os aspectos técnicos são: a possibilidade de produzir uma peça de acordo com especificações e normas, a facilidade de remoção de material e aumentar o desempenho do mecanismo de formação do cavaco, etc. Os melhoramentos econômicos podem ser associados a: baixo desgaste da ferramenta, pequenas forças de corte e baixo consumo de energia, que

combinados podem levar a menores tempos de usinagem e menor custo por peça (PEREIRA, et al., 2006).

Os parâmetros de corte são responsáveis por determinar o desempenho e a vida da ferramenta, estipulado em muitos testes com brocas, pelo desgaste de flanco VB_{max} indicado na figura 2.17.

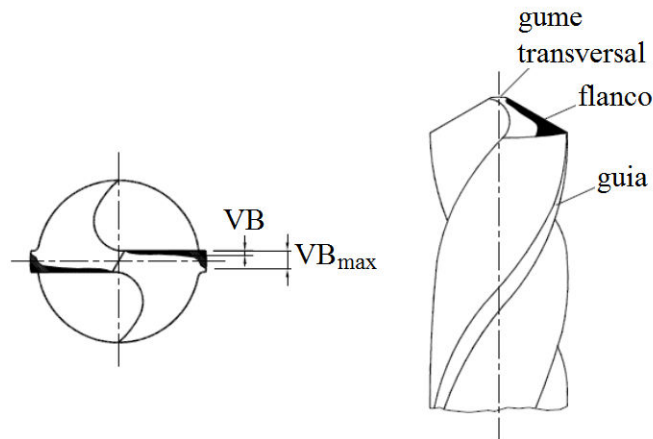


Figura 2.17 Desgaste de flanco de broca helicoidal (SANTOS, 1999)

Dentre os parâmetros de furação considera-se o tipo de material a ser usinado, e o material da ferramenta para poder determinar:

- **Velocidade de corte (v_c):** é determinada em função dos materiais da peça, da broca e em função da produtividade desejada. Considera-se como velocidade de corte nominal aquela que ocorre no diâmetro onde ocorre o processo de corte pela broca (MOCELIN, 2002). É normalmente expresso por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (2.1)$$

d = diâmetro da broca (mm)

n = rotação da broca (min^{-1})

- **Avanço (f):** é a velocidade de translação da broca no sentido axial. O avanço é normalmente expresso em mm/rot ou em mm/min. É limitado pela resistência mecânica da broca, a qual pode flambar.
- **Velocidade de avanço (v_f):** segundo (SANTOS, 2008) a velocidade de avanço é definida como a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido do avanço e é expressa por:

$$v_f = f.n \quad (2.2)$$

f = avanço por volta (mm/rot)

A figura 2.18 mostra as condições e nomenclaturas atuantes em uma broca durante a furação.

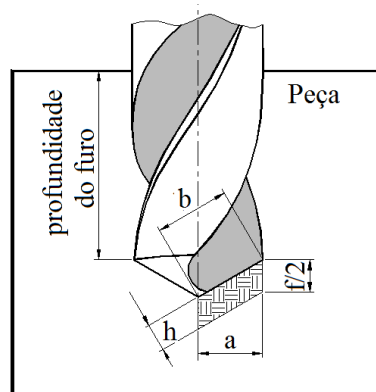


Figura 2.18 Representação de parâmetros de usinagem em brocas helicoidais (MOCELIN, 2002)

- **Espessura de usinagem (h):** é proporcional ao avanço e é medida perpendicularmente ao gume conforme:

$$h = \frac{f}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (2.3)$$

σ = ângulo de ponta da broca ($^{\circ}$)

- **Profundidade de corte (a_p):** equivalente à metade do diâmetro da ferramenta, quando o processo é de furação (STEMMER, 2005).
- **Largura de usinagem (b):** correspondente ao comprimento de cada gume principal para o caso de furação em cheio, sendo expresso por:

$$b = \frac{d}{2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\sigma}{2}\right)} \quad (2.4)$$

d = diâmetro da broca (mm)

- **Profundidade do furo:** Profundidade de penetração da broca, desconsiderando-se a ponta, ou seja, profundidade de penetração das guias, representado na figura 2.18.

2.10 Mecanismo de formação do cavaco

O cavaco corresponde a porção de material removido da peça e sua formação influencia diversos fatores na usinagem como calor gerado durante usinagem, desgaste da ferramenta, esforço de corte entre outros. (TRENT, et al., 2000). A formação do cavaco é muito influenciada pelo movimento do mesmo sobre a superfície de saída da ferramenta. Dependendo das condições de corte, propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, em alguma parte do contato pode ocorrer abrasão (DA SILVA, 1998).

Sobre o processo de formação de cavaco na usinagem de ferro fundido nodular têm-se algumas particularidades, que comparado a usinagem do aço ocorrem menores solicitações mecânicas e, respectivamente, menores solicitações térmicas. Porém, estas solicitações são distribuídas em uma pequena zona que oscila com a frequência da segmentação dos cavacos (KLOCKE, et al., 2006). A busca de soluções para esses problemas requer a compreensão do comportamento de fratura do material quando sujeito a elevada quantidade de deformação plástica, da forma como este volume deformado transforma-se em cavaco e, por sua vez, movimentada sobre a face da ferramenta de corte (TRENT, et al., 2000).

A formação do cavaco é dada em alta velocidade de deformação, seguida de ruptura do material. Na furação, a forma dos cavacos tem grande influência no processo, devido ao espaço reduzido e ao grande volume de material a ser retirado. A forma e o tipo dos cavacos são fatores que mais influenciam a produtividade de uma indústria que envolve processos de usinagem (MACHADO, et al., 2009).

Durante a formação do cavaco é considerada como mecanismo que consiste na movimentação da seção “p q r s” (Figura 2.19) na direção da aresta de corte da ferramenta, resultando num volume recalcado representado por “p’ q’ r’ s’” após o plano de cisalhamento, deformando plasticamente e elasticamente o material. Esse mecanismo é um processo cíclico e dividido em quatro etapas: recalque (deformação elástica), deformação plástica, ruptura e movimento sobre a superfície de saída da ferramenta (CAVALCANTE, 2010).

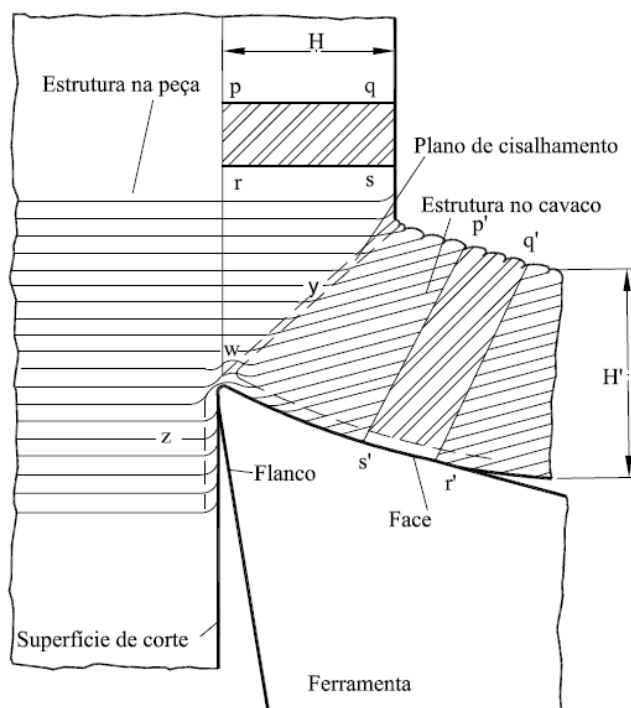


Figura 2.19 Diagrama da aresta de corte com formação de cavaco (MACHADO, et al., 2009)

Para o processo de furação, o fator mais importante que afeta o desempenho da ferramenta de corte e as propriedades mecânicas da peça é a temperatura de corte entre a broca e cavaco. Afetando de forma direta a qualidade do furo, rugosidade, desgaste da ferramenta e limita o aumento na velocidade de corte. As condições térmicas na furação diferem dos outros processos como torneamento. O cavaco é formado no fundo do furo e permanece em contato com a broca em uma longa distância, aumentando a temperatura da ferramenta que continua em constante aumento proporcional a profundidade do furo. Temperaturas crescentes e o acúmulo de cavacos aquecidos no fundo do furo são sérios problemas em furação (COTTERREL, et al., 2002).

No processo de formação de cavaco do ferro fundido nodular as forças de compressão fazem com que os nódulos da matriz se desprendam da mesma. Ocorre também deformação plástica da mesma, entre os nódulos. Esta deformação plástica causa o alongamento dos nódulos na direção do corte, ocasionando fratura dúctil (JUNIOR, 2010).

2.11 Materiais de ferramentas

A seleção de materiais para ferramentas de usinagem para uma determinada aplicação é um fator muito importante para o sucesso da fabricação (STEMMER, 2005)

(SILVA, 2010). Nota-se que a introdução de novos materiais está ganhando força considerável no processo de furação, principalmente devido às modernas máquinas CNC disponíveis hoje no mercado, que garantem potência, rigidez e rotação ao processo de usinagem (DINIZ, et al., 2008). No processo de furação a resistência ao desgaste (dureza a quente) e a tenacidade são as principais características exigidas da ferramenta. Isso se deve ao mecanismo de desgaste predominante (abrasão) e os esforços (compressão, torção e flexão) submetidos à ferramenta durante o corte (KONIG, et al., 1997). As ferramentas durante a usinagem estão sujeitas a: altas temperaturas, altas pressões de contato e atrito com o cavaco e a superfície já usinada da peça. Em função disso a ferramenta deve apresentar as seguintes propriedades:

- **Dureza:** principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho;
- **Tenacidade:** a ferramenta deve resistir a impactos e esforços cíclicos, comuns nas operações de usinagem;
- **Resistência ao desgaste:** para garantir uma durabilidade compatível com o processo;
- **Estabilidade química:** não deve reagir com o material da peça ou contaminá-lo.

2.11.1 Aço Rápido Comum;

O aço rápido é um aço de alta liga de tungstênio (W), molibdênio (Mo), cromo (Cr), vanádio (V), cobalto (Co) e nióbio (Nb). Desenvolvido por F. W. Taylor em 1905 revolucionou a indústria mecânica com aumento significativo de velocidades de corte em relação aos aços ferramenta até então utilizados (SMITH, 2008). O aço rápido possui elevada dureza a quente, tenacidade (em comparação com aços carbono utilizados em ferramentas), podendo chegar a temperaturas de corte da ordem de 600°C (DINIZ, et al., 2008).

Existe no mercado um variado grupo de aços rápidos, classificados segundo a AISI e SAE em dois grupos: os aços rápidos ao tungstênio designados pela letra T, e os ao molibdênio M, porém são subdivididos em subcategorias contendo cobalto, W-Co e Mo-Co respectivamente (SMITH, 2008). A tabela 2.1 mostra a classificação, a composição dos aços rápidos.

Tabela 2.1 Condições e tipos mais comuns de aços rápidos (KHARAGPUR, 2010)

Tipo	C	W	Mo	Cr	V	Co
T1	0,7	18	-	4	1	-
T4	0,75	18	-	4	1	5
T6	0,8	20	-	4	2	12
M2	0,8	6	5	4	2	-
M4	1,3	6	5	4	4	-
M15	1,55	6	3	5	5	5
M42	1,08	1,5	9,5	4	1,1	8

Para aplicação de aço rápido em brocas estes devem possuir tenacidade e resistência à torção, devendo possuir boa resistência à oxidação, uma vez que uma broca em seu estágio final de furação tem muito contato com o cavaco recém arrancado da peça em trabalho. Os materiais recomendados para a fabricação de brocas, que possuem estas propriedades, são encontrados nos aços rápidos das classes, M1, M2, M7, M10 e T1, preferencialmente utilizando brocas de classe M em função da questão econômica do tungstênio T (SILVA, 2010).

Dentre os tipos de aço rápido, o considerado universal é o tipo M2. Um fabricante de aços especiais, mostrou que uma grande parcela do consumo de aços rápidos eram os constituídos pelos elementos de liga tungstênio-molibdênio, representando cerca de 67% do consumo (JESUS, 2004).

A função dos elementos de liga inseridos no aço rápido é de melhorar ou adicionar propriedades, conforme descrição a seguir:

- **Carbono:** seus teores variam de 0,6 a 1,6%, a medida que seu teor aumenta, proporcionalmente aumentam sua dureza e resistência ao desgaste e temperabilidade do material (JESUS, 2004). O aumento no teor de carbono aumenta a formação de carbonetos complexos, conferindo ao aço rápido maior dureza e resistência ao desgaste, já que os aços rápidos são considerados materiais com alto teor de carbono (BARBOSA, 2009).
- **Tungstênio e Molibdênio:** o tungstênio esta sempre presente nos aços rápidos, porém introduziu-se o molibdênio como seu substituto, gerando outra classe de aços rápidos. São responsáveis pela dureza a quente desses aços e resistência ao desgaste elevada (DINIZ, et al., 2008). Em razão do peso atômico do molibdênio ser menor que o tungstênio, enquanto utiliza-se 1% deste para substituir por 1,6% a 2% de tungstênio (CHIAVERINI, 2005).

- **Vanádio e Nióbio:** forma os carbonetos de maior dureza observados nos aços rápidos. Seu efeito é aumentar a dureza a quente, impedir o crescimento de grão durante o tratamento térmico, o que gera aços mais tenazes e aumentar, a resistência ao desgaste. Porém, o aumento na quantidade de vanádio deve ser compensado com o aumento na porcentagem de carbono, pois o vanádio, quando livre, promove a ferritização dos aços, o que diminui consideravelmente a sua dureza. Aços com altos teores de carbono e vanádio são chamados aços super-rápidos, podendo também ser considerados os aços com altos teores de cobalto, devido às suas maiores resistências ao desgaste (AMORIN, 2003). Enquanto o Nióbio, usado como substituto ao vanádio devido ao seu custo mais baixo (no Brasil), também diminui a descarbonetação em aços, problema este, ocasionado durante o tratamento térmico (FERRARESI, 1970).
- **Cromo:** presente nos aços rápidos em teores de 3 a 5%, o cromo aumenta a temperabilidade do aço rápido, reduz a oxidação e a formação de casca de óxido durante o tratamento térmico (AMORIN, 2003).
- **Cobalto:** aumenta consideravelmente a dureza a quente e à temperatura ambiente dos aços rápidos, sendo por isso recomendados para operações mais pesadas de desbaste. Como efeito negativo, o cobalto causa o aumento da tendência a descarbonetação durante o tratamento térmico (AMORIN, 2003).

2.11.2 Aço Rápido Sinterizado:

Popularmente chamadas de ferramentas de aço rápido sinterizado (sinterização é apenas parte de processo de metalurgia do pó), este processo de fabricação apresenta como vantagens a possibilidade do uso de partículas de carbonetos muito menores, com menor dispersão, e um número maior de elementos de liga em comparação com o aço rápido fabricado pelo processo convencional, possui as seguintes vantagens (AMORIN, 2003):

- Partículas de carbonetos mais finas e uniformemente distribuídas;
- Maior resistência a compressão;
- Maior usinabilidade em retífica do que as ferramentas convencionais, devido à sua granulagem mais fina;
- Maior tenacidade do que o aço rápido convencional;
- Tratamento térmico mais simples.

Além destas vantagens, também foram observadas maior vida de ferramenta e menor dispersão dos resultados de vida de ferramenta, o que as torna mais adequadas para a realização de ensaios de usinabilidade, além de uma melhor condição de aderência de revestimentos de TiN (SOUZA, 2011). Em contrapartida, possui custo elevado.

2.11.3 Metal Duro:

Devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste, foi batizado de Widia (*Wie Diamont*, em alemão, como o diamante), uma referência à semelhança entre as propriedades dos dois materiais, o que até certo ponto torna-se exagero (AMORIN, 2003).

O metal duro é um produto obtido por meio da metalurgia do pó, constituído por partículas duras de carbonetos de tungstênio WC e um ligante sinterizado rico em cobalto Co (COROMANT, 2011). O ligante tem como função constituir a ligação dos carbonetos frágeis, obtendo um corpo resistente. Já os carbonetos fornecem a alta dureza a quente, resistência ao desgaste e à compressão (SMITH, 2008).

O corpo do metal duro é formado, através de prensagem do pó ou técnicas de molde por injeção, dentro de um corpo que é então sinterizado até a densidade total (COROMANT, 2011).

A classificação do metal duro convencional é feita pela norma ISO-513-2004, sendo dividido em três grupos convencionais: P, M e K, conforme sua aplicação na usinagem (DINIZ, et al., 2008), e mais recentemente surgiram as classes N, S e H, sendo que a classe K é utilizado normalmente para usinagem de ferros fundidos de modos geral sendo que os tipos cinzento (GG), maleável (MCI) são considerados de fácil usinagem enquanto que o nodular (GGG) e o vermicular (CGI) são mais difíceis (COROMANT, 2011).

2.11.4 Revestimentos

A utilização de revestimentos nas ferramentas é uma alternativa para viabilizar a usinagem sem fluido de corte já que a maioria dos ferros fundidos são abrasivos (DORMER, 2008). Os revestimentos atuam de duas formas importantes: como barreira térmica entre o material cortado (peça) e o material de corte (ferramenta), reduzindo o aporte térmico para o substrato da ferramenta. A outra é como camada lubrificante, reduzindo o coeficiente de atrito entre cavaco-ferramenta-peça e atuando também na redução do processo de adesão (MIRANDA, 2003).

Os principais processos aplicados para revestimento de ferramentas de corte são: *Chemical Vapour Deposition* – CVD (Deposição Química à Vapor) e *Physical Vapour Deposition* - PVD (Deposição Física à Vapor) (SANTOS, 2008).

O avanço nesta área se deu com o desenvolvimento de novos materiais para revestimento, novas estruturas e também novas técnicas de deposição como a deposição física de vapor (PVD – *Physical Vapour Deposition*) que impulsionou a utilização de revestimentos em substratos de aço rápido, pois até então a temperatura de deposição pelo processo CVD, na faixa entre 850-1050 °C, era o fator limitante para a utilização neste tipo de ferramenta, já que a essa temperatura o aço rápido sofre transformações metalúrgicas. Já pelo processo PVD as temperaturas de deposição estão na faixa de 400-600 °C, podendo ser então utilizado no revestimento de substratos de aço-rápido sem maiores problemas (TRENT, et al., 2000).

É imprescindível que um revestimento bem executado possua as seguintes características: uma boa estabilidade química; elevada dureza a quente e uma excelente adesividade do revestimento ao substrato. São desejáveis também que a sua espessura seja otimizada, sem excessos ou falhas; que possua tensões residuais de compressão; baixa condutividade térmica e baixa adesividade com o material da peça (RIBEIRO, 2007).

Dentre os tipos de revestimentos mais utilizados para o processo de usinagem de ferros fundidos pode-se destacar:

- **Carboneto de Titânio (TiC):** a característica mais marcante do TiC em relação ao TiN é a dureza mais elevada, o que lhe confere uma maior resistência à abrasão. Possui um baixo coeficiente de dilatação térmica, característica importante em processos como o fresamento (BALZERS, 2012);
- **Nitreto de Titânio (TiN):** é quimicamente mais estável que o TiC, isto é, possui menos tendência de difusão nos aços. No entanto sofre maior desgaste por abrasão. Sua dureza é de 2300 HV_{0,05}, sendo um dos revestimentos mais utilizados para materiais mais dúcteis, como aços de baixo C e todas classes de Al, sob baixas forças de corte (SILVA, 2010);
- **Carbonitreto de Titânio (TiCN):** é derivado do TiN, onde parte dos átomos de N são substituídos por C durante a deposição. Possui uma elevada dureza (3.000 HV_{0,05}). Aplicável em situações de forças de corte médias a baixas, em materiais como ferros fundidos, aços de médio C, ligas Al-Si (BALZERS, 2012);

- **Nitreto de Titânio-Alumínio monocamada (Ti, Al) N:** é depositado sobre a superfície da ferramenta, figura 2.21 (a), pelo processo PVD, e atua como uma barreira térmica entre a ferramenta e o cavaco (a condutividade térmica é de cerca de 0,05 kW/K.m). Resistência ao desgaste avançada com maior resistência a oxidação deste revestimento, oferece uma vantagem para usinagem a seco de ferro fundido, aço e alumínio de liga com 10% de Si. Por causa da sua baixa condutividade térmica, a maioria do calor é evacuado pelos cavacos (NOUARI, 2003);
- **Nitreto de Titânio-Alumínio multicamadas (TiAlN):** possui uma dureza de 3.000 HV_{0,05}. As camadas são formadas por diferentes proporções alternadas de Ti e Al, conforme figura 2.21 (b). Em ensaios de fresamento de ferros fundidos cinzentos e nodulares, com e sem fluido de corte, foram realizados testes comparativos dos revestimentos TiAlN monocamada e multicamada. O revestimento monocamada mostrou-se mais vantajoso no processo com fluido de corte, enquanto o revestimento multicamada destacou-se nos ensaios realizados a seco. Ambos os revestimentos tiveram uma vida maior na usinagem a seco do que com fluido de corte (JUNIOR, 2010).

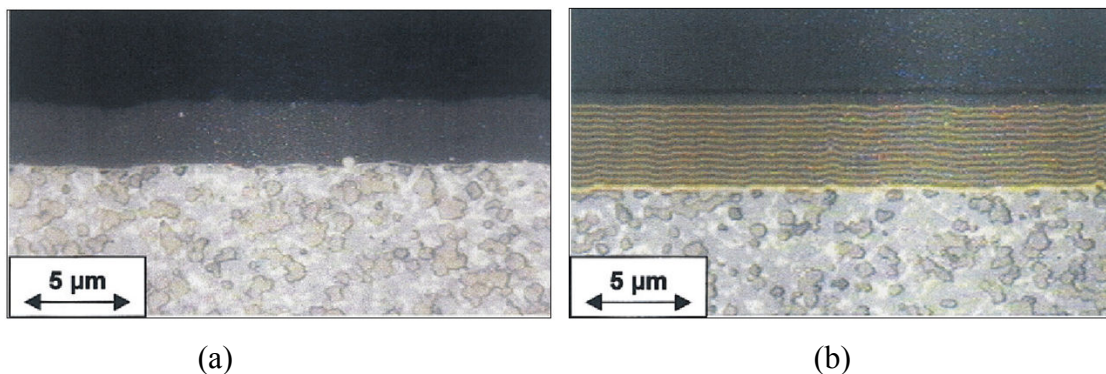


Figura 2.20 Comparativo entre os revestimento TiAlN monocamada (a) e TiAlN multicamada (b) (PRENGEL, et al., 2001)

- **HARDLUBE® ((Ti, Al) N + WC / C):** É um revestimento de múltiplas camadas. A combinação de camadas dura/mole de revestimento melhora o fluxo de cavaco através da redução do coeficiente de atrito e das forças de corte ((Ti, Al) N: camada dura (3300 HV), WC/C: camada de lubrificante, micro-dureza e baixo coeficiente de atrito (1000 HV). Este revestimento é utilizado quando para aços de baixo carbono e ligas de alumínio (BALZERS, 2012).
- **Nitreto de cromo-alumínio (AlCrN):** Por apresentarem excelentes resultados na usinagem em velocidades de corte muito elevadas, avaliadas entre 210 e 410 m/min, este recobrimento permite maior vida de ferramenta mesmo em condições extremamente

severas. Embora apresente ótimos resultados na usinagem a seco apresentados, a aplicação de fluidos de corte aumenta proporcionalmente a vida da ferramenta em função do aumento da velocidade de corte, reduzindo a evolução do desgaste consideravelmente (LIN, et al., 2007). Possui elevada resistência a oxidação e dureza a quente, ou seja, ótima resistência a abrasão e baixo coeficiente de atrito. Possui micro-dureza na faixa de 3200 HV, com temperatura máxima de serviço de 1100°C. Ganhos extraordinários de desempenho têm sido demonstrados em processos de usinagem a secos e refrigerados que envolvem aços e ferros fundidos (BALZERS, 2012).

- **Óxido de Alumínio (Al₂O₃):** também conhecida como alumina é um componente que, quando usado nos revestimentos, confere aos mesmos resistência ao desgaste, alta dureza a quente e inércia química, mesmo em altas temperaturas. Ao agir como uma barreira térmica para a superfície da ferramenta faz com que o calor gerado seja conduzido mais para o cavaco e menos para o conjunto ferramenta/dispositivos de fixação. Tem ótima resistência contra a craterização. Possui também elevada dureza à quente, estabilidade química e boas propriedades refratárias. É muito frágil e de aderência limitada, sendo normalmente aplicado sobre uma camada de TiC (DORMER, 2008).

Um resumo de algumas propriedades importantes ao emprego dos revestimentos citados anteriormente são descritos na tabela 2.2

Tabela 2.2 Propriedades físicas de revestimentos de ferramentas (RIBEIRO, 2007)

Revestimento	Dureza a temperatura ambiente (HB)		Resistência a oxidação (°C)		Coeficiente de atrito contra o aço a seco	
	a	b	a	b	a	b
TiN	1930 - 2200	2300	600	-	0,4 - 0,5	0,4
TiCN	2700 - 3000	3000	400	-	0,3	0,4
TiAlN	3000 - 3500	3300	800	-	0,7	0,25 - 0,4
TiAlCrN	2700	-	950	-	0,8	-
TiN/AlN	4000	-	950	-	-	-
AlTiN	2700	3000	840	-	0,42	0,4
AlCr	-	3000 - 3200	-	-	-	0,25 - 0,35
AlCrN	-	3200	-	-	-	0,35

Fonte: (a) Ribeiro, 2007 (b) Balzers, 2007

2.12 Ferros fundidos

Os ferros fundidos são ligas ferro-carbono com teor de carbono entre 1,8 e 4,5% e que possuem ponto de fusão relativamente baixo (aproximadamente 1200°C, dependendo do teor de C), requerendo assim, menos energia para a fusão e possibilitando fácil

moldagem, uma vez que o metal fundido preencherá os vazios dos moldes com facilidade. Além disso, apresentam menor custo e permitem que posterior operação de usinagem seja a mínima possível, quando comparado aos aços (ALMEIDA, 2008).

Além destes, outros elementos como silício, manganês, fósforo, cobre, níquel, molibdênio e o cromo podem ser acrescentados para mudar suas propriedades. Conforme a tabela 2.3, a composição química é um dos principais fatores responsáveis para determinar a estrutura do ferro fundido e através dela a classificação em diferentes tipos de ferro fundido: branco, maleável, cinzento, nodular e vermicular. O carbono no ferro fundido pode se apresentar na forma livre como grafita ou carboneto de ferro (Fe_3C) (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 2.3 Faixa de composição de ferros fundidos típicos comuns (CHIAVERINI, 2005)

Tipo	Composição química, %				
	C	Si	Mn	S	P
Cinzento	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,02/0,25	0,02/1,00
Branco	1,8/3,6	0,5/1,9	0,25/0,80	0,06/0,20	0,06/0,20
Vermicular	2,5/4,0	1,0/3,0	0,20/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10
Maleável	2,2/2,9	0,9/1,9	0,15/1,20	0,02/0,20	0,02/0,20
Nodular	3,0/4,00	1,8/2,8	0,10/1,00	0,01/0,03	0,01/0,10

2.12.1 Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é uma liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0%. A sua composição química varia de 93 a 93,8% de ferro, 2,5 a 4% de carbono e 1 a 3% de silício.

O carbono e o silício promovem a formação de grafita que aumenta conforme o aumento da percentagem desses elementos. O carbono no ferro fundido cinzento pode existir na forma de grafita ou como carboneto de ferro. Se a grafitização é completa, o ferro fundido cinzento terá lamelas de grafita com uma matriz ferrítica. As lamelas de grafita concentram esforços, causando baixa resistência e ductibilidade. No entanto, o ferro fundido cinzento possui várias propriedades positivas: resistência à compressão, resistência ao desgaste por atrito e à fadiga térmica, boa condutividade térmica e amortecimento de vibrações.

Na classificação adotada pela ABNT, o ferro fundido cinzento é representado pelas iniciais FC, seguido por dois algarismos que representam o limite mínimo de resistência à

tração, conforme tabela 2.4, enquanto a norma DIN representa o ferro fundido cinzento com as letras CG (CASTILLO, 2005).

Tabela 2.4 Propriedades mecânicas dos ferros cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT (CHIAVERINI, 2005)

Classe	Diâmetro da barra de ensaio	Limite de resistência a tração (min.)		Dureza Brinell (valores máximos) (HB)	Resistência a flexão estática (valores médios)	
	(mm)	(kgf/mm ²)	(MPa)		(kgf/mm ²)	(MPa)
FC10	20	10	100	201	-	-
FC15	8	23	230	241	34	330
	12,5	18	180	223	32	310
	20	15	150	212	30	290
	32	11	110	201	27	260
FC20	8	28	270	255	41	400
	12,5	23	230	235	39	380
	20	20	200	223	36	350
	32	16	160	217	33	320
FC25	8	33	320	269	-	-
	12,5	28	270	248	46	450
	20	25	250	241	42	410
	32	21	210	229	39	380
FC30	12,5	33	320	269	-	-
	20	30	290	262	48	470
	32	26	260	248	45	440
FC40	20	40	390	-	60	590
	32	36	350	-	57	560

2.12.2 Ferro fundido branco

Apresenta fratura com coloração clara, com a maior parte do carbono combinado na forma de Fe₃C, devido às condições de fabricação e o menor teor de silício (ALMEIDA, 2008).

São ligas do sistema Fe-C-Si, contendo baixos teores de Si e que apresentam o carbono quase que inteiramente na forma de Fe₃C, formando um constituinte com a austenita, denominado ledeburita. Apresenta elevada dureza acima de 500 HB, ductibilidade nula (COROMANT, 2011). Composição química típica: 1,80 a 3,60% C, 0,50 a 1,90% Si, 0,25 a 0,80% Mn (elemento estabilizador da cementita), 0,06 a 0,20% S e 0,06 a 0,20% P, além de Ni (endurecimento por solução sólida deslocando a curva TTT para direita), Cr, Mo (formadores de carbonetos que aumentam a resistência ao desgaste (OBERG, et al., 2000). Possui propriedades como elevada dureza, baixa tenacidade, elevada resistência ao desgaste propriedade esta melhorada com adição de Cr, e baixa usinabilidade. Dentre os fatores que influenciam na obtenção de ferros fundidos brancos

pode-se destacar o teor de Si sendo mantido em baixos teores, para evitar a formação da grafita (DETTOGNI, 2010).

2.12.3 Ferro fundido vermicular

Também conhecido como *Compacted Graphite Iron* (CGI). Este material apresenta boas características de resistência mecânica, amortecimento, tenacidade, resistência a choques térmicos, condutividade térmica, e ductilidade. A junção de características tão importantes, tanto do ferro fundido cinzento quanto do ferro fundido nodular, atribui ao ferro fundido vermicular uma grande importância para aplicação industrial (MOCELIN, 2002). A composição do ferro fundido vermicular é muito similar à do cinzento. A grande diferença está na presença de magnésio. No tradicional, o cinzento, não há magnésio, ou há quantidade muito pequena. No vermicular, o elemento químico tem de ser mantido em uma faixa bastante estreita, entre 0,010% e 0,012%. Se houver mais do que isso, o ferro deixa de ser vermicular e perde suas características. A presença de magnésio na quantidade exata faz com que se formem, no ferro fundido, estrias grossas de grafita o que inspirou o nome vermicular (FRANCKLIN, 2009).

2.12.4 Ferro fundido maleável

Ferro fundido maleável é obtido a partir de um tratamento do ferro fundido branco. A ductilidade do ferro fundido maleável é em torno de 10% superior ao ferro fundido cinzento. Este tipo de ferro fundido, apresenta valores entre os de ferro fundido cinzento e os do aço (SILVA, 2010).

Ferro fundido maleável tem como vantagem a facilidade de usinagem e a boa resistência ao choque. Contudo, este tipo de ferro fundido exige cuidados na fundição para evitar falha, por apresentar certa contração na solidificação.

A composição química do ferro fundido maleável pode ser visualizada na tabela 2.5.

Tabela 2.5 Composição química do ferro fundido maleável (MSPC, 2009)

C %	Si %	Mn (% máx.)	S (% máx.)	P (% máx.)
2,0 – 2,8;	0,9 – 1,6	0,5	0,1	0,2

Ferro fundido maleável pode ser aplicado para tubulações, sapatas de freios, caixas de engrenagens, cubos de rodas, bielas, entre outros (MSPC, 2009).

2.12.5 Ferro fundido nodular

Ferros dúcteis, conhecido como o ferro fundido nodular ou esferoidal ferro grafite, têm sido cada vez mais utilizados pela indústria transformadora desde o seu primeiro empreendimento no final de 1940.

A presença da grafita nos ferros fundidos nodulares, sob a forma de nódulos esferoidais, é resultado da adição de magnésio ou magnésio mais cério, obtendo-se um considerável aumento da resistência mecânica do material em relação ao ferro fundido cinzento (ISRAEL, 2005). Eles oferecem uma gama de propriedades, não visto em outros tipos de ferros fundidos: resistência ao desgaste, resistência à fadiga, tenacidade e ductilidade. Lamelas de grafite em ferros fundidos cinzentos atuam como concentradores de tensão, resultando em baixas resistências mecânicas. Nódulos de grafite em ferro fundido nodular, por outro lado, agem como pára fenda, resultando em resistência e ductilidade superior. As propriedades versáteis do ferro fundido nodular os tornam adequados para aplicações tais como virabrequins, pistões, engrenagens, tubos, volantes, cavidades, recipientes para o armazenamento e transporte de resíduos nucleares, carcaças de bombas, válvulas e articulações de direção, cardans, etc (BARBOSA, 2009).

A usinabilidade de ferros fundidos nodular é relatada como sendo inferior ao do ferro fundido cinzento. Lamelas de grafite em ferros fundidos cinzentos atuam como concentradores de tensão no plano de cisalhamento e, portanto, facilitam o corte. No ferro fundido nodular, por outro lado, as esferas de grafite são menos eficazes do que a grafite lamelar no enfraquecimento do material no plano de cisalhamento, e a zona de fluxo de material pode, por vezes ser extremamente dúctil.

Constituintes da microestrutura, como perlita, ferrita, austenita, martensita e grafite afetam a usinabilidade do ferro fundido nodular. Elementos de liga em ferro fundido também têm uma importante influência na usinabilidade. Tem sido relatado que o ferro fundido nodular com liga Ni e Cu melhora a usinabilidade, reduzindo as forças de corte e rugosidade da superfície das peças usinadas (YIGIT, et al., 2008). Segundo a norma DIN-1693, a forma de especificação dos ferros nodulares é precedida do prefixo GGG, seguindo o limite de resistência a tração em kgf/mm², conforme tabela 2.6 (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 2.6 Classificação dos ferros fundidos nodulares, segundo a DIN (CHIAVERINI 2005)

Classe	Limite de resist. tração (kgf/mm ²) (MPa)	Limite de Esc. (kgf/mm ²) (MPa)	Along (%)	Dureza (HB)	Módulo de elastic. (Kgf/mm ²)	Resist. ao choque (kgf/mm ²)	Resist. à flexão (kgf/mm ²) (MPa)	
GGG-45	45 (440)	35 (340)	5	160/240	17.000 ↑ 16.500 a 18.500	2	80/95	(780/930)
GGG-38	38 (370)	25 (250)	17	140/180		10	75/90	(740/880)
GGG-42	42 (410)	28 (270)	12	150/200		8	80/90	(780/880)
GGG-50	50 (490)	35 (340)	7	170/240		6	85/100	(830/980)
GGG-60	60 (590)	42 (410)	2	210/300		4	90/110	(880/1080)
GGG-70	70 (690)	50 (490)	2	230/320		2	99/120	(1080/1180)

2.13 Teste de indentação

Este método avalia a qualidade da adesão, sendo fácil de executar e muito útil para fazer o controlo da qualidade (Andrade, 2008).

O teste de indentação Rockwell C, ou também chamado de *Daimler-Benz*, é um método desenvolvido pela *Union of German Engineers (Verein Deutscher Ingenieure, VDI)* para a avaliação de revestimentos finos, segundo a diretriz 3198 (1991). O teste consiste em usar um durômetro para efetuar uma indentação com cargas pré-definidas. A indentação gerada provoca falhas na camada adjacente à impressão, que vão ser analisadas ao microscópio óptico com uma ampliação de 100:1 e comparadas com impressões padrão de qualidade de adesão pré-definidos. A qualidade da adesão é estruturada da forma que se pode observar na figura 2.22.

As impressões HF1 a HF4 são considerados padrões de adesão satisfatórios, porque existe um bordo perfeito da indentação no filme. As impressões HF5 e HF6 representam uma adesão insuficiente do filme e, conseqüentemente, verifica-se o destacamento da camada depositada. HF é uma expressão alemã para abreviar resistência à adesão.

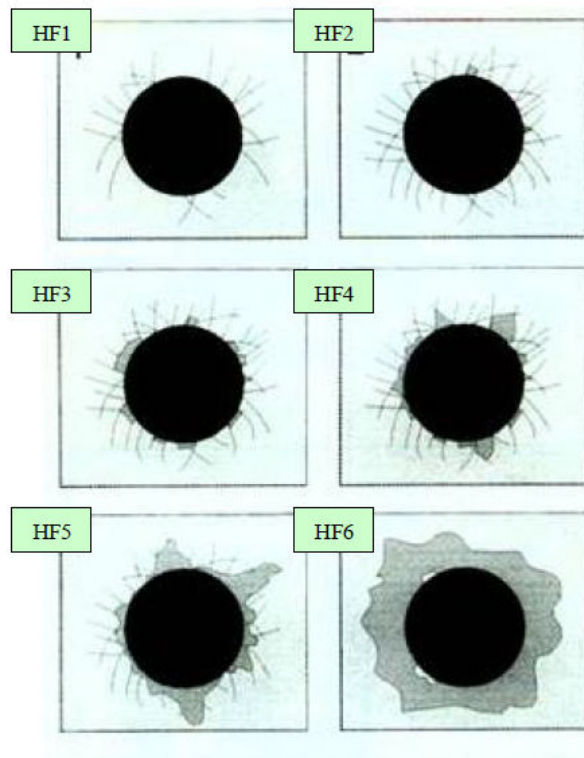


Figura 2.21 Classes de qualidade da adesão de revestimentos em PVD de acordo com a norma VDI 3198: 1991 (VDI, 1992)

2.14 Qualidade da superfície

A qualidade da superfície usinada apresenta-se em função de quatro parâmetros: rugosidade, ondulação, falhas e marcas de avanço. No entanto, normalmente os processos de usinagem são classificados apenas em termos do parâmetro de rugosidade que pode ser definido como um conjunto de irregularidades da superfície real, em relação a uma superfície de referência (SANTOS, 2008).

Para a medição da rugosidade, normalmente utiliza-se um rugosímetro, podendo ser realizada com ou sem contato entre o apalpador e a superfície usinada. O método de medição mais utilizado na indústria automotiva é o de contato, justificado pelo baixo custo e simplicidade de uso. Neste método alguns detalhes do equipamento acabam influenciando a medição tais como: o raio da ponta do apalpador e seu desgaste. Para minimizar tal influência, geralmente são utilizados filtros no rugosímetro para medição.

Devido à importância relatada sobre a rugosidade, para seu controle é necessário estabelecer critérios de avaliação. Esta avaliação da qualidade da superfície dos processos de usinagem é classificada em termos de parâmetros de rugosidade. Alguns dos parâmetros medem a variação vertical, horizontal ou uma combinação destes. No caso da avaliação de

processos produtivos, os parâmetros de controle do processo mais utilizados são: R_a , R_y , R_t e R_z , os mais utilizados (CAVALCANTE, 2010).

Para a furação, a faixa de rugosidade média (R_a) pode ser compreendida entre 6,3 a 12,5 μm , no entanto é difícil estipular um valor para os furos (BARBOSA, 2009). A norma DIN 4766 abrange o valor de R_a na faixa compreendida entre 1,6 à 25 μm para o processo de furação, também considerado como padrão IT 9 (*ISO Tolerance*), conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7 Valores de R_a para processos de fabricação (CAVALCANTE, 2010)

Método de manufatura	Valores atingíveis médios de R_a (mm)													
	0,006	0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50
Furação									■	■	■	■	■	
Alargamento						■	■	■	■	■	■	■	■	
Mandrilamento			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Torn. Longitudinal						■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Valores possíveis ■ Valores comuns

A seguir são apresentados, os principais parâmetros de rugosidade utilizados como controle do processo e de maior interesse na indústria. A Figura 2.23 ilustra os parâmetros de rugosidade referenciando-os num perfil de base.

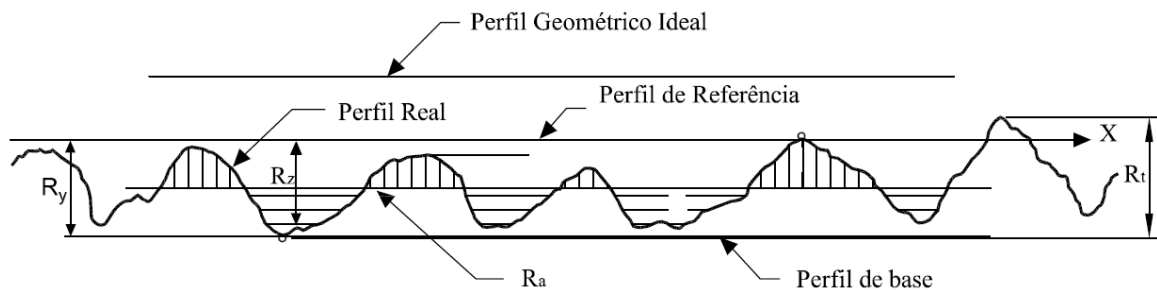


Figura 2.22 Avaliação de superfície (CASTILLO, 2005)

- Parâmetro R_a : é denominado de desvio médio aritmético (R_a), sendo a média dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média, num comprimento de amostragem. O parâmetro R_a fornece informações do perfil de uma forma geral, não refletindo um valor isolado, e é aplicado quando o controle da rugosidade é contínuo nas linhas de produção quando a superfície apresenta sulcos bem orientados e para fins estéticos.

- Parâmetro R_y ou R_{max} : é o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição de um dado comprimento pré-definido, máxima altura entre pico e vale. É empregado para superfícies de vedação, superfícies dinamicamente carregadas e superfícies de deslizamento.
- Parâmetro R_t : é a soma da altura do pico mais alto com referência a linha média e da profundidade do vale mais profundo a partir da linha média. Aplicado em superfícies de vedação, superfícies dinamicamente carregadas e superfícies de deslizamento onde o perfil efetivo é periódico.
- Parâmetro R_z : é obtido com o total das duas médias entre: os cinco picos mais altos e a profundidade média dos cinco vales mais profundos, ambos referenciados pela linha média. Deve ser usado em casos onde pontos isolados não tenham influência na função da peça a ser controlada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentando os materiais e equipamentos utilizados no trabalho, bem como os processos de obtenção de resultados.

3.1 Corpos de prova

Para realização dos ensaios de furação foram fabricadas 10 placas de ferro fundido nodular GGG50 com valores médios de dureza de 180 HB. Para a medição de dureza Brinell, utilizou-se um durômetro de bancada modelo TH 600, marca COSA, com penetrador de esfera de aço com diâmetro de 5 mm e carga de 750 kgf.

As placas foram fundidas e vazadas na mesma fornada, em condições iguais de temperatura, umidade do ar, incidência de fluxo de ar pela linha de vazamento, além de serem resfriadas no molde, retardando assim a velocidade de resfriamento. O objetivo deste procedimento foi reduzir qualquer variável que viesse a interferir nos valores de composição química e microestrutura das placas.

Durante o processo de fusão do ferro fundido foi retirada a amostra coquilhada para análise química pelo espectrômetro de refração marca GNR, modelo METAL LAB 75.80 J, constatando assim a composição química dentro da classe dos ferros fundidos nodulares GGG50, a tabela 3.1 mostra o resultado da composição química de uma das placas.

Tabela 3.1 Composição química das placas

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Al%	Mg%	Cu%
3,649	2,641	0,329	0,038	0,003	0,032	0,013	0,016	0,038	0,019

Foi realizada análise micrográfica com amostras de cada placa sem e com ataque de nital 2% utilizando um Microscópio Óptico OLYMPUS BX51M, conforme figuras 3.1 e 3.2, respectivamente.

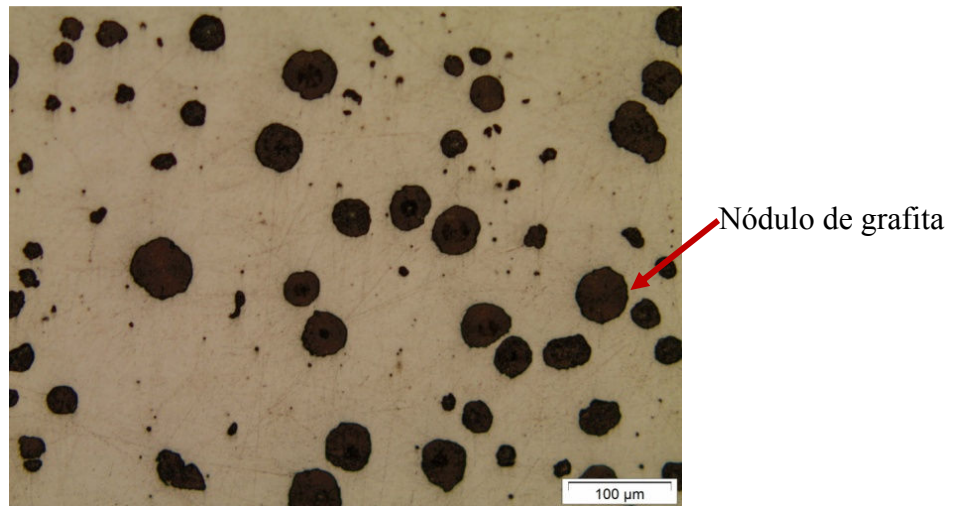


Figura 3.1 Amostra de ferro fundido, sem ataque, ampliação de 200X

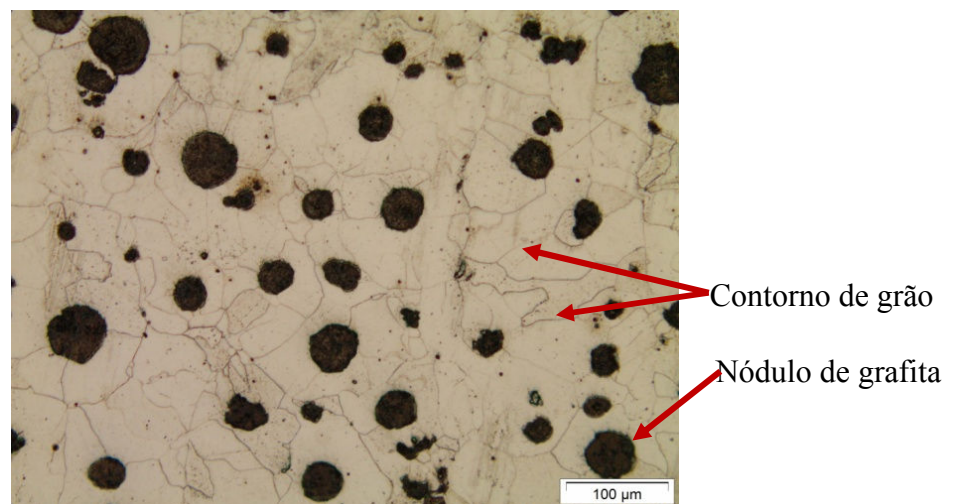


Figura 3.2 Amostra de ferro fundido com ataque de nital 2%, ampliação de 200X

O resultado da análise metalográfica de uma das placas fundidas para o ensaio esta representado na tabela 3.2.

Para cada placa foi realizada análise metalográfica para constatação da microestrutura das placas, haja visto que poderia ocorrer variação do centro para extremidades das placas de sua microestrutura, conforme tabela 3.2.

A possibilidade de ocorrência de coalescimento da estrutura metalográfica da mesma placa no centro em relação ao extremo não foi descartada, ocorrência esta ocasionada por possível demora no tempo de solidificação, logo, a necessidade de verificação através de microscópio, já que a estrutura metalográfica influencia de forma direta na usinabilidade dos ferros fundidos, mais até que a composição química dos ferros fundidos.

Tabela 3.2 Resultado da análise do ferro fundido nodular

Região de Análise	Grau de nodularização Mínimo: 85%	Nº. de nódulos por mm ² (informativo)	Forma e tamanho da grafita
Seção da peça	90%	71 Nód./mm ²	Forma: VI (V) Tamanho: 6(7) Matriz: Ferrítica-Perlítica
Nota: A contagem das grafitas é realizada de acordo com a Norma ABNT MB1512 e a caracterização das mesmas segundo a norma NBR 6593.			

Após o processo de fundição das placas, foi realizada usinagem das faces e laterais da placa, com redução de dimensões de 10,0 mm em relação ao material fundido, com objetivo de retirada de possíveis impurezas na superfície, e garantir a usinagem em material com menor quantidade de impurezas oriundas do processo de fundição.

A razão da usinagem foi para diminuir uma possível variação de dureza da placa em toda sua seção, já que a superfície poderia apresentar dureza, na região removida, superior comparado a todo resto da placa, em virtude da velocidade de resfriamento.

As placas, após todo processo de preparação, ficaram com dimensões de 500 x 400 x 48 mm, conforme figura 3.3 (b), com variação de medidas conforme a DIN 7168. A distância entre furos e distância da margem das placas descritas conforme figura 3.3 (a). O objetivo da usinagem das placas, também, foi de facilitar o processo de referência da ferramenta em suas faces para um maior aproveitamento. A figura 3.4 mostra a placa após os ensaios de furação.

O procedimento adotado de ensaio, possibilita um maior aproveitamento das placas adquiridas, além de melhor controle de rebarbas nos furos.

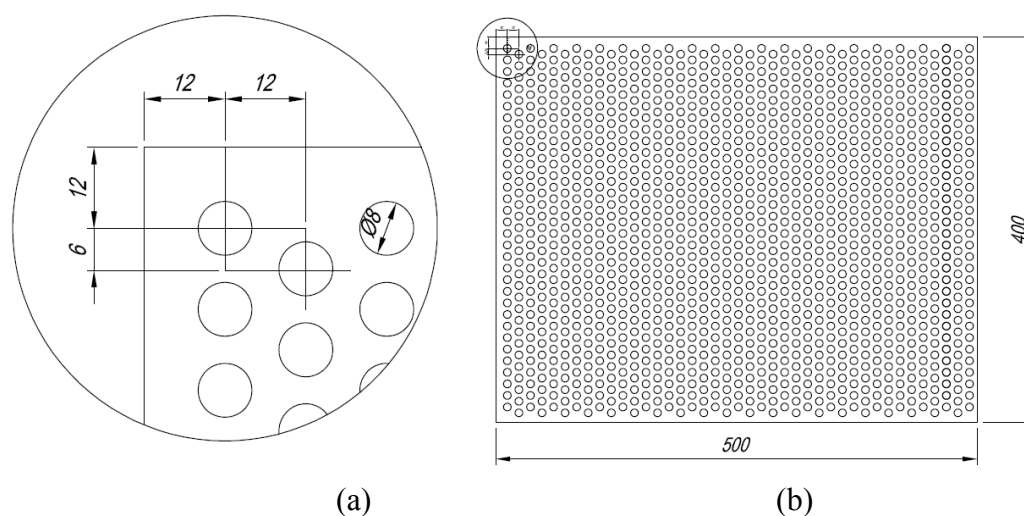


Figura 3.3 Desenho das placas após furação (a) dimensões das margens e (b) dimensão das placas

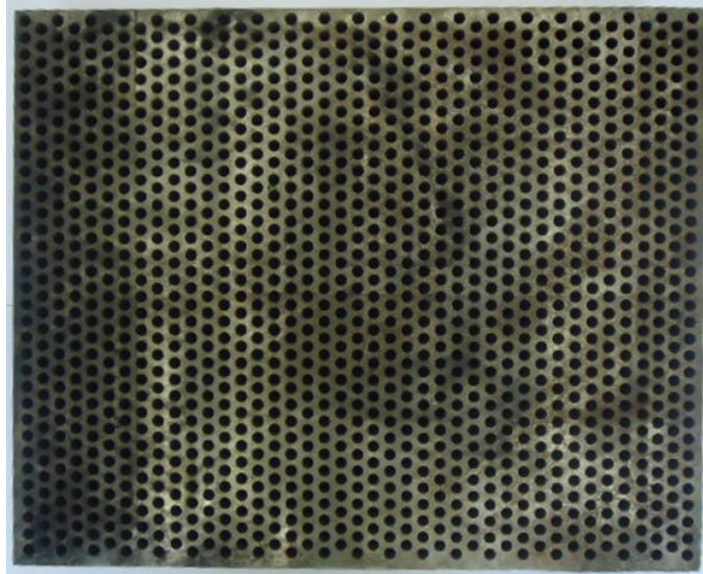


Figura 3.4 Placas de ferro fundido nodular após os ensaios de furação

3.2 Fixação das ferramentas:

A fixação da ferramenta na máquina foi através de um cone porta pinça tipo BT40, utilizando uma pinça modelo ER, com capacidade de 7 a 8 mm de haste conforme mostra a figura 3.5. Para a broca procurou-se manter o batimento, concentricidade com eixo máquina, na ferramenta em uso dentro de padrões estabelecidos pela ABNT NBR 6176, mantendo o conjunto broca, cone porta pinça e eixo árvore da máquina com no máximo 0,03 mm de batimento. Os valores do batimento foram verificados com a utilização de um relógio comparador da marca Mitutoyo modelo 2046S com exatidão de 0,013 mm e graduação de 0,01 mm, utilizado junto à base magnética.

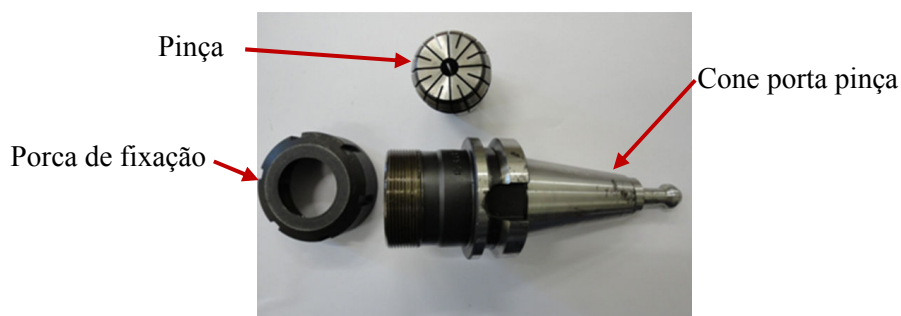


Figura 3.5 Sistema de fixação da ferramenta na máquina

3.3 Máquina para realização de testes:

O equipamento utilizado para realização dos testes foi um centro de usinagem vertical modelo Discovery 4022 marca Romi com comando numérico computadorizado

modelo Mach 9, faixa de rotação entre 10 e 6000 rpm, com potência de motor principal (eixo árvore) de 7,5 cv. O processo de batimento da broca foi realizado na própria máquina com auxílio de relógio comparador, para verificação de valores de concentricidade da ferramenta em relação ao eixo árvore, indicado na figura 3.6.

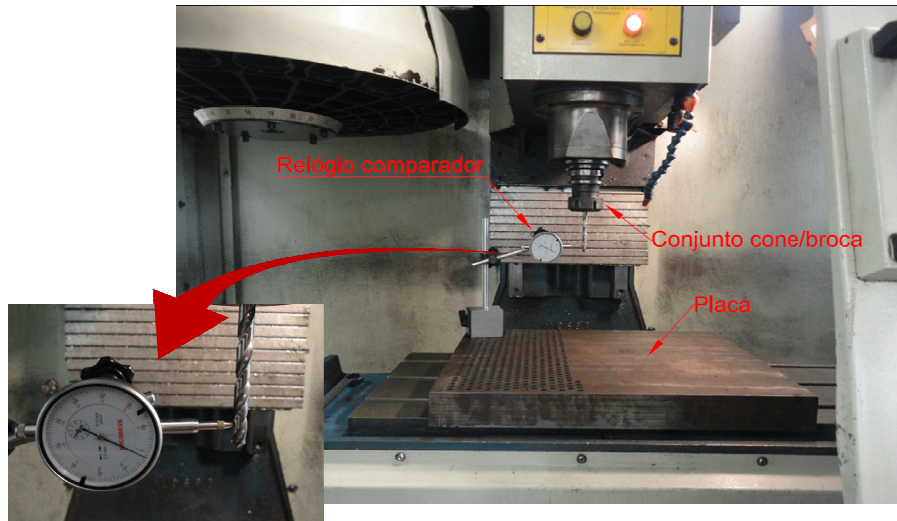


Figura 3.6 Broca em processo de batimento para realização de testes de usinagem

A programação foi desenvolvida utilizando ciclos fixos de furação e repetição de blocos, G83 e G25 respectivamente, com objetivo de realizar a quantidade pré-estabelecida de 30 furos e parada para medição de desgaste das brocas, como mostra a tabela 3.3.

Tabela 3.3 Programa utilizado para ensaios de furação

Função	Significado
G99	Início de programa
G90	Coordenadas absolutas
G71	Valores em milímetro
G17	Plano XY
T01 M06	Número da ferramenta
O01 S1400 M3	Corretor, rotação e sentido de giro
G0 Z100.	Aproximação da broca
X0. Z0.	Zero peça
X8. Y-8. Z10.	Coordenada do 1º furo
G83 Z-55. I28. R3. F210	Ciclo de furação
G25 X-24. Y-12. J32. I4.	Número de repetições do bloco
G80	Cancela ciclo de furação
G Z100.	Afastamento
M30	Fim de programa

3.4 Brocas utilizadas

Foram utilizadas para os ensaios de furação brocas de aço rápido classe M2, conforme a DIN 338, com dimensões de comprimento total de 117 mm, comprimento de hélice de 75 mm, figura 3.7 (a) e diâmetro de 8 mm com tolerância dimensional h8 e ângulo de ponta 118° , conforme mostrado na figura 3.7 (b).



Figura 3.7 Broca helicoidal conforme DIN 338 (a) comprimento total e (b) detalhe do ângulo de ponta

Para aplicação dos revestimentos pelo processo PVD, foi encaminhado a empresa OERLIKON BALZERS, no qual foi aplicado os revestimentos em 15 brocas com o revestimento BALINIT® ALCRONA de AlCrN (Nitreto de Alumínio Cromo) e em mais 15 brocas o revestimento BALINIT® FUTURA de TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio). As brocas após retorno do processo de tratamento superficial pelo processo PVD foram numeradas e armazenadas em recipiente com sílica para evitar possível oxidação.

Com todas as ferramentas em mãos foi realizado as primeiras imagens dos flancos da ferramentas, como forma de verificação de possível ocorrência de marcas nas regiões de corte das brocas, ou qualquer outra irregularidade que viesse a ser detectada. A figura 3.8 mostra uma broca por cada tipo de condição superficial.



Figura 3.8 Brocas para início dos testes de usinagem, (a) sem revestimento, (b) com revestimento do composto TiAlN e (c) com revestimento do composto AlCrN

As brocas foram fixadas com relação de comprimento total/diâmetro (l/d) de 10, ou seja, o comprimento da broca para fora do sistema de fixação por pinça foi de 80 mm, além da relação de profundidade dos furos de 6 vezes o diâmetro da broca (48 mm), caracterizando o processo como furação profunda.

A avaliação do ensaio foi através do desgaste gerado na ferramenta após realização de um pré-determinado número de furos, igual a 128. Durante os ensaios foram determinadas quatro paradas para aquisição de imagens das ferramentas, com intuito de verificar a progressão do desgaste da ferramenta. A tabela 3.4 mostra a equivalência entre o número de furos e o comprimento usinado em cada parada.

Tabela 3.4 Equivalência entre número de furos e comprimento usinado

Parada número	Número de furos	Comprimento usinado (mm)
1	32	1536
2	64	3072
3	96	4608
4	128	6144

3.5 Medição dos furos:

Para medição dos furos foi utilizado o micrômetro interno, marca Vonder, com faixa de medição de 6 a 8 mm, três pontas de contato e precisão de 0,001 mm, conforme a figura 3.9.



Figura 3.9 Micrômetro interno utilizado para realização de medições dos furos

Foi realizada medições cada 30 furos, de uma série de 120 furos previstos para cada broca, iniciando pelo furo de número 30, 60, 90, 120 respectivamente. Cada furo foi medido em seu início, meio e fim do comprimento, para leitura de possível variação dimensional. Cada ponto de medição (início, meio e fim), foi feita a medição duas vezes no mesmo ponto, com diferença de 90° em relação a anterior, para possível leitura de ovalização do furo, que ocorresse durante a furação.

3.6 Características do estereoscópio:

Para análise de desgastes das brocas revestidas, não revestidas e tratadas foi utilizado um estereoscópio óptico modelo BW1008-500X, com conexão USB e *software* para medição das imagens adquiridas, medição esta realizada através da conversão de pixel para milímetros, definindo assim o desgaste de flanco das brocas.

A figura 3.10 representa o sistema composto por estereoscópio acoplado na base e conectado ao computador realizando aquisição de imagens de um conjunto broca/cone de fixação na máquina. Procurou ser mantida a inclinação do aparelho em 31°, conforme figura 3.11, para que ficasse paralela ao gume principal da broca evitando assim o erro por distorção na aquisição de imagens.

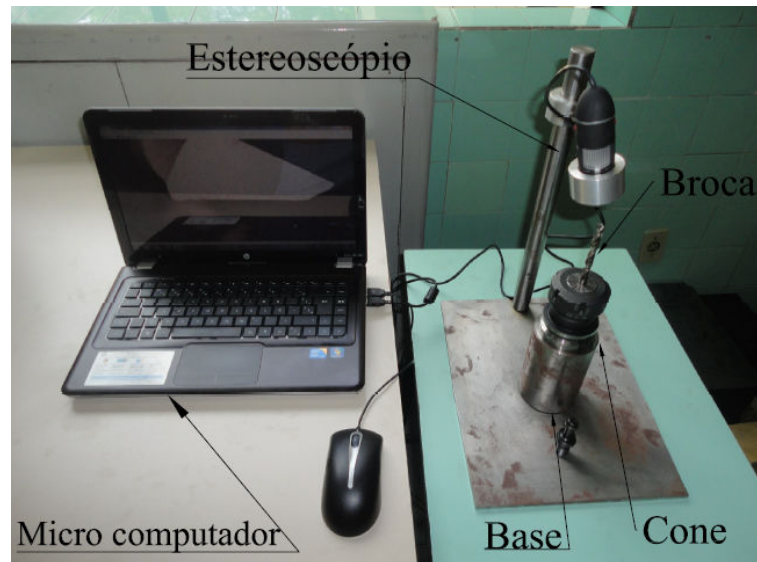


Figura 3.10 Sistema de aquisição de imagens

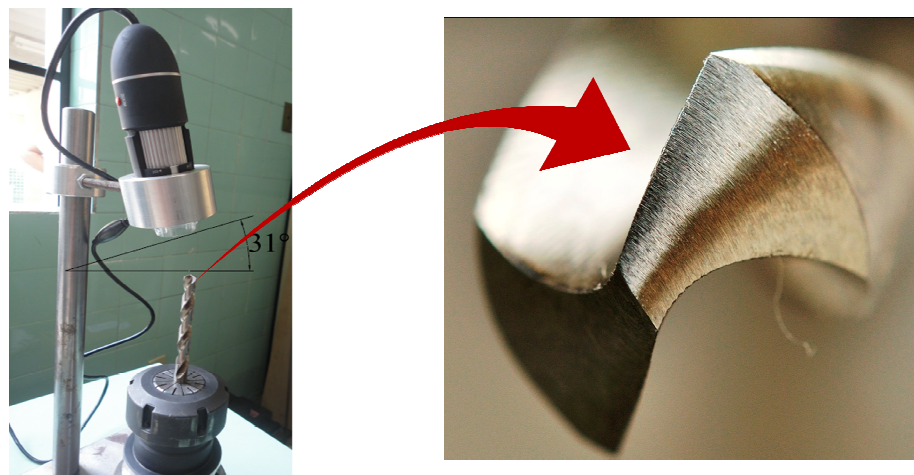


Figura 3.11 Estereoscópio realizando aquisição de imagens

Para todas as brocas foi realizada a aquisição de imagens antes do início dos testes de furação, e após a realização do número de furos: 32, 64, 96 e 128, respectivamente. As imagens dos gumes de cada broca foram realizadas com a montagem do conjunto broca e cone, na base do estereoscópico.

3.7 Ensaio de adesão do revestimento

Para realização do ensaio de adesão dos revestimentos, conforme a norma VDI 3198. foram retirados corpos de prova, das brocas na parte da haste (próximos ao início do canal da broca). Os corpos de prova foram usinados e retificados para posterior polimento das faces conforme figura 3.12, encaminhados a empresa OERLIKON BALZERS para aplicação dos mesmos revestimentos das brocas. Após aplicação de revestimentos foi

realizado o ensaio por Indentação Rockwell, com carga de 150 kgf. Após realização da Indentação Rockwell foi levado as amostras ao microscópio eletrônico marca OLIMPUS, modelo BX51M, para análise por comparação das marcas formadas ao redor da indentação.



Figura 3.12 Corpos de prova para ensaio de indentação

3.8 Parâmetros utilizados

Para o registro da aquisição de dados de desgaste das brocas, foram determinadas duas velocidades de corte e duas variações de avanço da broca conforme a tabela 3.5.

O intuito da variação destes parâmetros, foi justamente identificar a melhor condição para cada tipo de revestimento das brocas, comparando entre eles e com a condição da broca sem revestimento. Lembrando que todas as condições de corte foram realizadas a seco (sem lubrificação e refrigeração). O objetivo da condição de usinagem a seco foi de acelerar o processo de desgaste das ferramentas e viabilizar, através de dados concretos, o não emprego de fluidos lubri-refrigerantes.

Os parâmetros utilizados foram obtidos junto a consulta de fabricantes de brocas e o uso em indústrias metalúrgicas, que trabalham com furação utilizando brocas de aço rápido sem revestimento.

Tabela 3.5 Parâmetros utilizados para os testes de usinagem

Ensaio	v_c=(m/min)	f_n=(mm/rot)	Retração (mm)	Revest.
1	25	0,15	24	Não rev.
2	35	0,15	18	Não rev.
3	25	0,25	24	Não rev.
4	35	0,25	18	Não rev.
5	25	0,15	24	AlCrN
6	35	0,15	18	AlCrN
7	25	0,25	24	AlCrN
8	35	0,25	18	AlCrN
9	25	0,15	24	TiAlN
10	35	0,15	18	TiAlN
11	25	0,25	24	TiAlN
12	35	0,25	18	TiAlN

Para cada tipo de superfície da broca, realizou-se três ensaios para cada condição, totalizando o emprego estimado de 48 brocas, sem considerar possível reposição de nenhuma das brocas durante o ensaio.

Com objetivo de eliminar rebarbas do gume das brocas, originadas no processo de afiação dos gumes, foram realizados 8 furações com 10 mm de profundidade, na própria placa de ferro fundido utilizada no ensaio. Posteriormente foi enviado as brocas para aplicação dos revestimentos de TiAlN e AlCrN, na empresa OERLIKON BALZERS.

A pré-usinagem foi para eliminar arestas indesejáveis ou fragilizadas durante o processo de afiação das ferramentas. Estas arestas seriam possivelmente removidas durante os ensaios iniciais das ferramentas, eliminando o revestimento aplicado a ferramenta em questão, deixando exposto o substrato e mascarando assim o ensaio.

A opção pela remoção de rebarbas em pré-usinagem do próprio ferro fundido nodular, surgiu após pesquisa sobre formação de gume postiço, fenômeno este dificilmente encontrado em ferros fundidos, justamente pela sua característica de rompimento dos cavacos (cisalhamento). Porém a formação de desgaste por abrasão mostra-se mais frequente, muito similar ao processo de micro-jateamento, realizados para retirada de rebarbas em ferramentas de usinagem (Rocha, 2000).

Os parâmetros utilizados para retiradas de rebarbas foram os mais baixos, com intuito de evitar desgastes desnecessários a ferramenta, ou esforços que possivelmente viriam a danificar a superfície da broca, impossibilitando a aplicação dos revestimentos. Os parâmetros de corte escolhidos estão na tabela 3.6.

Tabela 3.6 Parâmetros para remoção de rebarbas das brocas

v_c (m/min)	f_n (mm/rot)
20	0,1

3.9 Medição de rugosidade dos furos:

Para medição de rugosidades dos furos foi utilizado um rugosímetro marca COSA (modelo SM RT 10). Foi determinado que os mesmos furos que foram realizados as medições de diâmetro, seriam realizadas as medições de rugosidades. As medições foram realizadas com três repetições no mesmo ponto, além de medir com defasagem de 120° para cada medição de rugosidade, figura 3.13. Foram realizadas medições no início do furo e no final, totalizando 18 medições por furo. O critério de medição adotado foi o R_a e adotado um *cut-off* igual a 0,8 mm, Parâmetros estes indicados para medição de rugosidade em furação por brocas.



Figura 3.13 Rugosímetro realizando medição em furo de uma das placas de ferro fundido nodular

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de indentação para atestar a qualidade do revestimento aplicado nas brocas, seguido dos ensaios de furação realizados nas placas de ferro fundido nodular GGG50, onde foi realizado as medições de desgaste de flanco das brocas de aço rápido revestidas e sem revestimento, após realização dos ensaios de furação foi realizado as medições de rugosidade, pelo parâmetro R_a onde foi expresso em μm .

Em paralelo as medições de rugosidade foram realizadas as medições dos diâmetros dos furos realizados, com objetivo de correlacionar rugosidade com variações de diâmetro. Com intuito de atestar o revestimento que obtivesse melhor resultado, foi realizado o ensaio de fim de vida das ferramentas, para analisar a viabilidade da aplicação dos revestimentos em relação ao comprimento usinado total. Por fim fazer a análise do mecanismo de desgaste que prevaleceu para contribuir com o desgaste das ferramentas através de MEV e EDS.

4.1 Ensaio de adesão VDI

Para a confirmação da realização de forma satisfatória do revestimento pelo processo PVD foi realizado o ensaio de adesão do revestimento no substrato através da indentação Rockwell C.

A figura 4.1 mostra o resultado do ensaio de adesão pelo método Rockwell, com aplicação de carga de 150 kgf na superfície do substrato de M2 revestido com TiAlN.

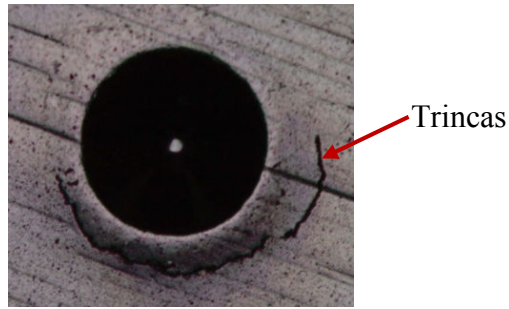


Figura 4.1 Ensaio de adesão do revestimento TiAlN com aumento de 100X

A indentação revela que ocorreu uma boa adesão do revestimento no substrato, atestando a qualidade do processo de PVD, assegurando assim um rendimento satisfatório da ferramenta durante o processo de usinagem a seco do ferro fundido nodular.

O padrão utilizado para atestar a qualidade da adesão do revestimento indica que esta dentro de padrões HF3 e HF4, satisfazendo a condição desejada.

O revestimento composto por AlCrN indicado na figura 4.2, revelou uma condição satisfatória durante a realização do ensaio de adesão estando dentro do padrão HF4. Neste ensaio visualizado com aumento de 100X, o composto apresentou maiores trincas que o revestimento TiAlN devido ao elemento Cr em sua composição, aumentando assim sua dureza, fragilizando a camada revestida. Pode-se avaliar que a diferença de resultados de adesão dos revestimentos não é causada pelo substrato, pois os corpos de prova foram retirados de brocas de mesmo lote de produção, com isto mesmas condições de substratos para os dois revestimentos.

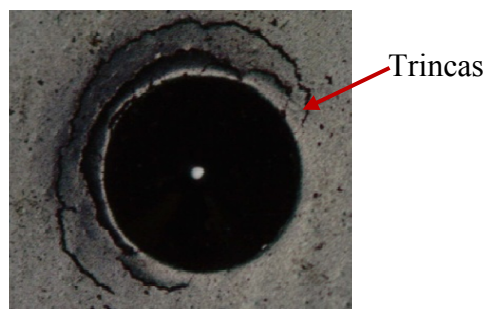


Figura 4.2 Ensaio de adesão do revestimento AlCrN com aumento de 100X

4.2 Ensaio de furação

Após a realização de todos os testes com brocas revestidas e não revestidas em sua superfície, e com a aquisição de imagens durante o processo de furação para todos os

parâmetros determinados anteriormente (tabela 3.5), foram montados gráficos referentes ao desgaste de flanco VB_{max} versus Comprimento usinado.

A figura 4.3 mostra os resultados do ensaio de furação para a condição de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot, para todos os tipos de brocas com ou sem revestimento.

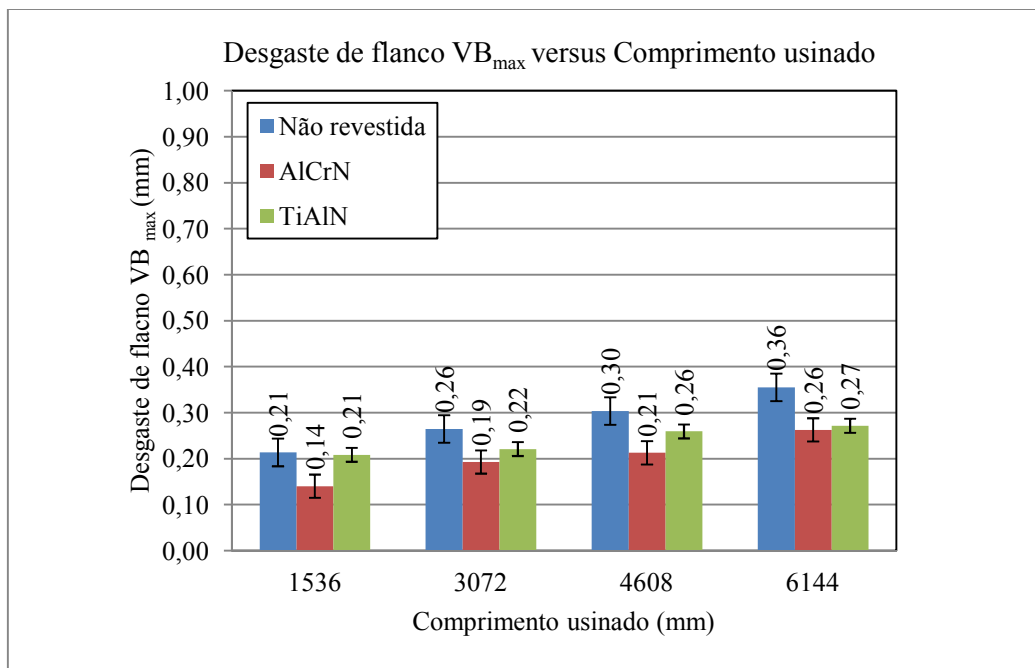


Figura 4.3 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot

Percebe-se que o maior desgaste de flanco ocorreu na broca não revestida, para todas as paradas de medição de desgaste, que é razoável pois assim justifica a aplicação de revestimentos em brocas.

Para as brocas revestidas, os resultados foram os melhores de modo geral, para estes parâmetros escolhidos. Dentre o tipo de revestimento que melhor resultado apresentou foi o AlCrN com menores resultados de desgaste de flanco em todos nas paradas de medição durante o processo de usinagem.

O revestimento TiAlN apresentou desgaste de flanco muito próximo dos valores da condição não revestida nas primeiras medições, porém manteve seu nível de desgaste em menores proporções que as condições não revestida, chegando a valores muito próximos das brocas com AlCrN.

As figuras 4.4 (a) e (b) mostram os flancos das brocas não revestidas com comprimento usinado de 3072 mm e 4608 mm, respectivamente.

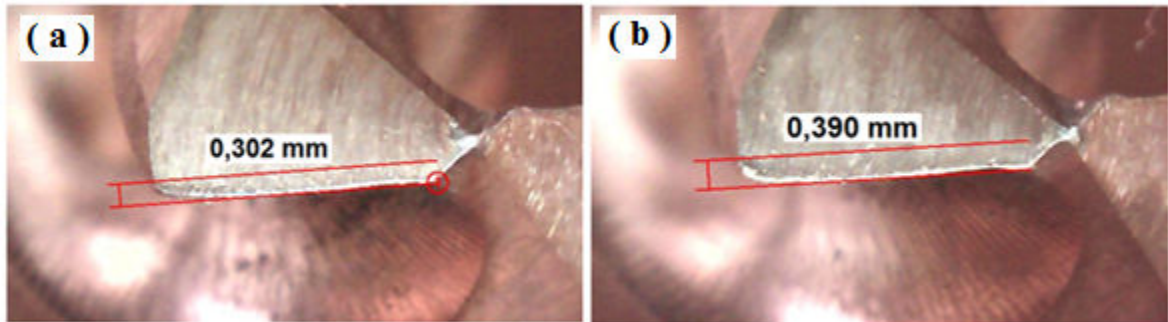


Figura 4.4 Desgaste de flanco das brocas não revestidas desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm

As figuras 4.5 (a) e (b) mostram os flancos das brocas desgastadas, revestidas com AlCrN no comprimento usinado de 3072 mm e 4608 mm, respectivamente.

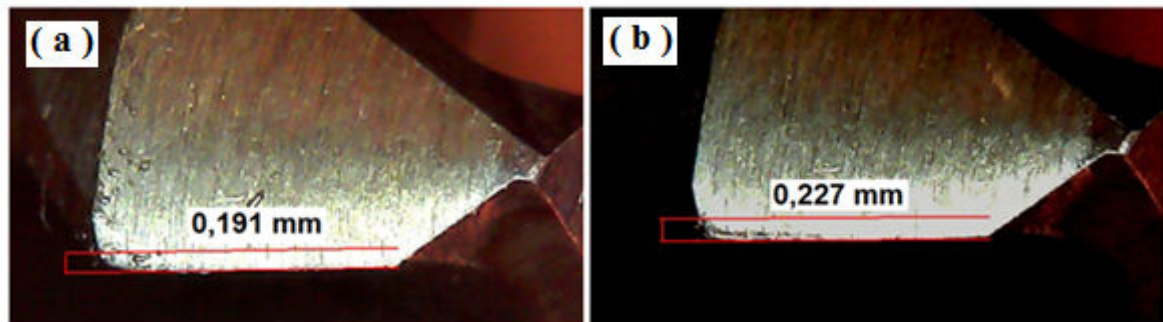


Figura 4.5 Desgaste de flanco das brocas com AlCrN desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm

As figuras 4.6 (a) e (b) mostram os flancos das brocas revestidas com TiAlN com comprimento usinado de 3072 mm (a) e 4608 mm (b), respectivamente.

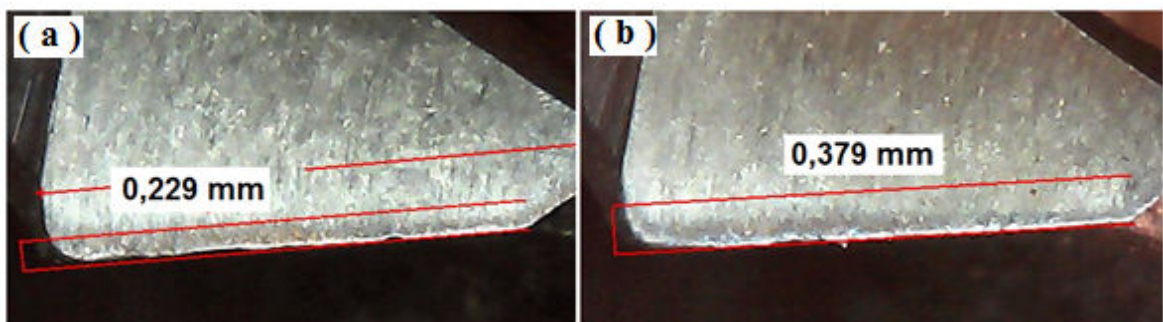


Figura 4.6 Desgaste de flanco das brocas com TiAlN desgastadas: (a) comprimento usinado de 3072 mm, (b) comprimento usinado de 4608 mm

Como pode ser percebido nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6, não ocorre a formação de APC (aresta postiça de corte), fato que é muito característico dos processos de usinagem de ferros fundidos, porém o desgaste abrasivo é fator determinante no desgaste das ferramentas neste tipo de material.

O desgaste abrasivo pode ser justificado pela presença de grafita livre, em forma de nódulos, agindo como elemento responsável pelo desgaste das ferramentas, porém facilitador da quebra dos cavacos gerados durante o processo.

Quando alterado o valor de v_c de 25 para 35 m/min e mantido o valor de $f_n = 0,15$ mm/rot, tem-se a figura 4.7, obtiveram-se valores de desgaste de flanco para as brocas não revestidas muito superiores as revestidas por PVD. O aumento da velocidade de corte proporcionou um aumento de temperatura da região de contato entre a broca e o ferro fundido, que conforme literatura obteve-se uma camada de óxido de alumínio, com características de isolamento térmico na região de corte da ferramenta, reduzindo assim o desgaste do revestimento das brocas.

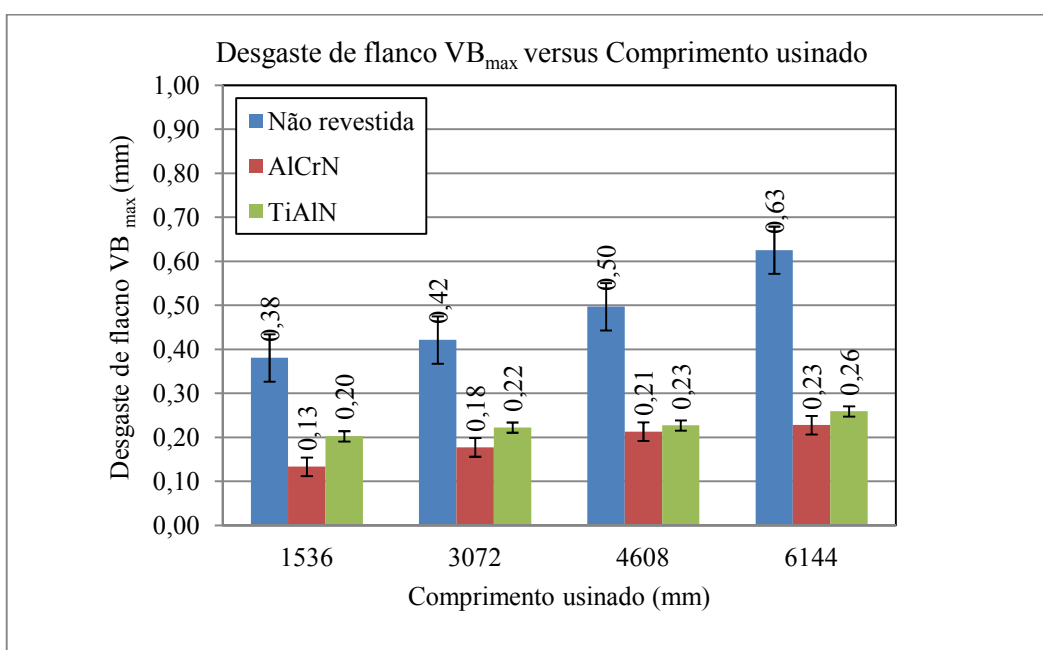


Figura 4.7 Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot

A aplicação dos revestimentos reduziu o VB_{Max} em todas as paradas de medição no transcorrer do ensaio. O revestimento AlCrN manteve seu desgaste entre os níveis mais baixos dentre os ensaios, na condição de corte determinada.

As brocas não revestidas foram as que alcançaram níveis maiores de desgaste no resultado final do ensaio, fato este justificado pela falha catastrófica de duas das três

repetições programadas, resultado de possíveis inclusões ou regiões com características diferentes de dureza ou microestrutura, do encontrado na placa de teste. Quando ocorresse a falha catastrófica foi adotado valor igual a 1,0 na planilha para geração de gráficos, indicando assim um acentuado desgaste de flanco, já que os valores de gráfico são as médias de três repetições.

Os dados apresentados na figura 4.8 mostram o ensaio de furação com a mudança da velocidade de corte para 25 m/min e o avanço da ferramenta em 0,25 mm/rot.

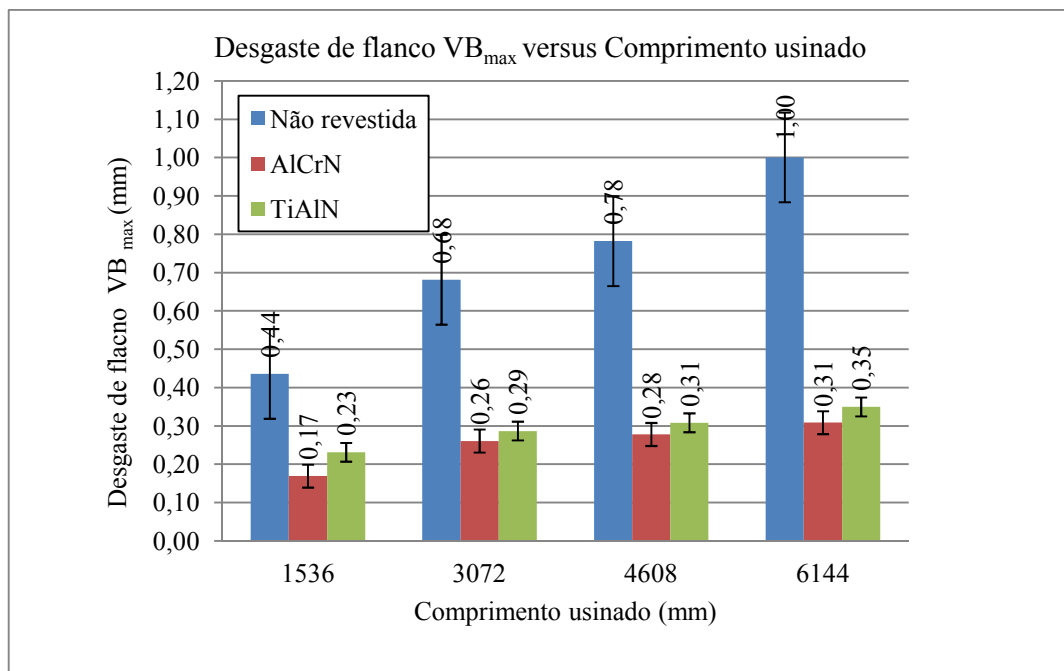


Figura 4.8 Desgaste de flanco de brocas com $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot

O gráfico indica que dentre as revestidas e não revestidas, a não revestida obteve um maior desgaste de flanco conforme indicado na figura 4.8. A justificativa para um desgaste de flanco VB_{Max} foi o aumento do esforço de corte da broca perpendicular ao ferro fundido, ocasionado pelo aumento do avanço de corte de 0,15 para 0,25 mm/rot, ocasionando possível escorregamento da broca em relação ao centro de giro, durante o ensaio. Novamente a condição que obteve um menor desgaste de flanco foi a broca com o revestimento AlCrN seguido da cobertura TiAlN.

Os valores apresentados na figura 4.9 mostram a mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço de 25 mm/rot durante o ensaio de furação.

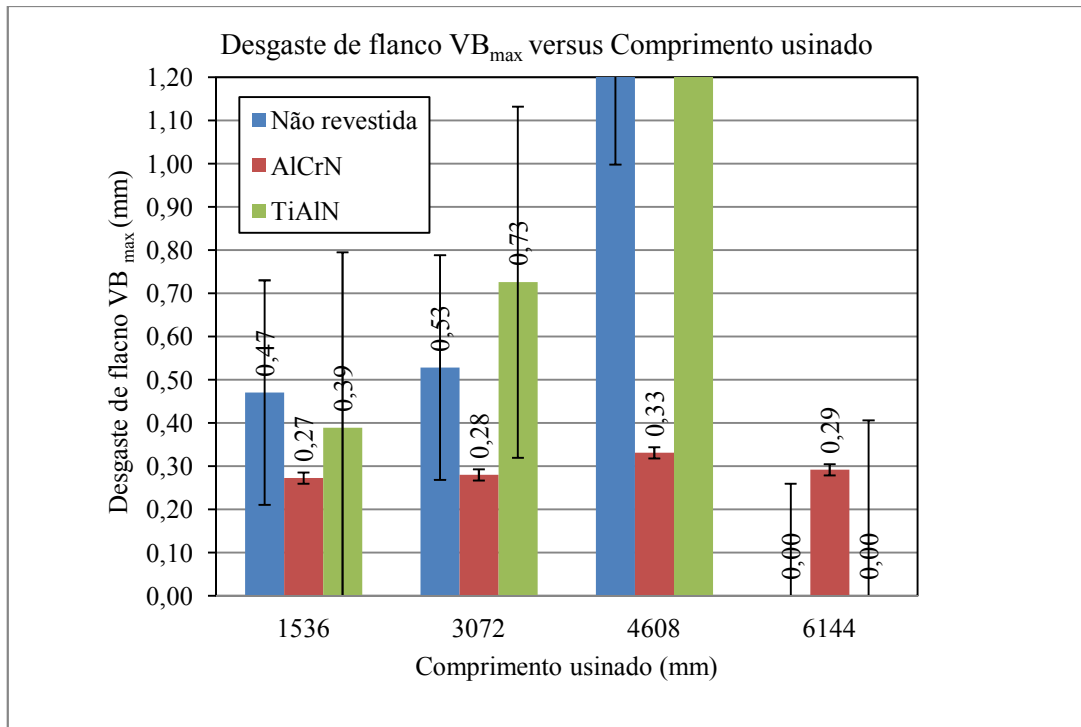


Figura 4.9 Desgaste de flanco de brocas com $v_c=35$ m/min e $f_n=0,25$ mm/rot

A figura 4.9 indica a condição de brocas com revestimento de TiAlN e não revestida com valores até o comprimento de 3072 mm, ocorrendo falha catastrófica a partir deste valor impossibilitando a aquisição de dados.

As brocas não revestidas obtiveram resultados melhores que a condição do revestimento TiAlN, porém chegando até o comprimento usinado de 4608 mm. A condição que melhor suportou aos esforços ocasionados pelas condições de corte foi com o revestimento AlCrN, que suportou até o fim dos testes em duas das três repetições e com baixo desgaste de flanco VB_{max} . Estima-se que a possível causa do desgaste de flanco acentuado com o revestimento PVD do composto TiAlN, deve-se a um esforço perpendicular da broca sobre o ferro fundido nodular, ocasionando falha da broca. Este esforço ou falha catastrófica por excesso de carga sobre o gume da ferramenta ocorrendo um acentuado desgaste.

4.3 Medição de rugosidade

A medição de rugosidade se fez necessária para atestar que o processo de furação estivesse dentro dos padrões IT9 referentes ao grau de acabamento da superfície usinada pelo processo de furação com brocas.

A figura 4.10 mostra os valores de rugosidade média R_a nos furos realizados com parâmetros de usinagem de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot.

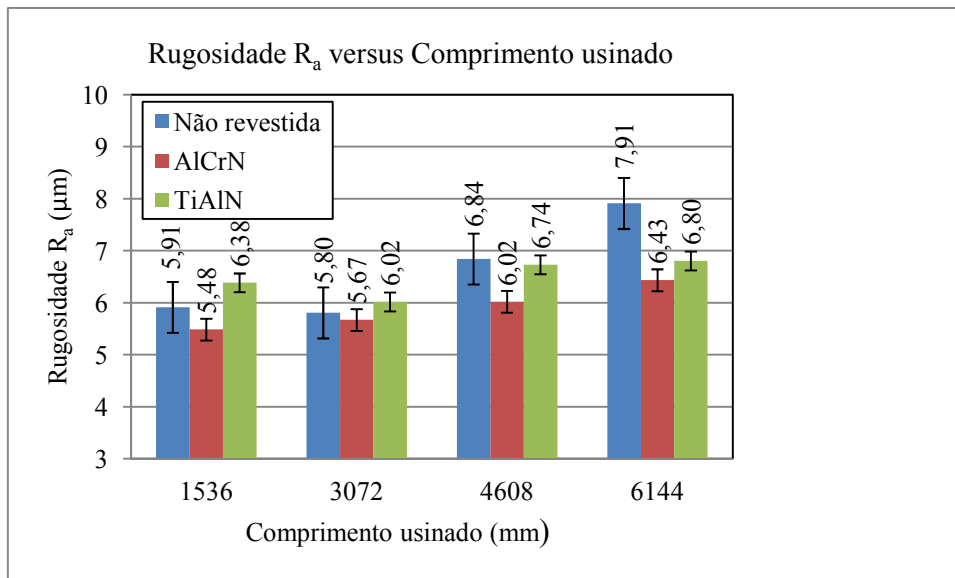


Figura 4.10 Rugosidade com parâmetros de $v_c=25$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot

A figura 4.10 mostra que a condição de broca que melhor satisfaz o valor de rugosidade mais baixo foi a com o revestimento de AlCrN em que obteve menores resultados de rugosidade média R_a .

Até a medição que corresponde a 3072 mm de comprimento usinado dos furos, as brocas com revestimento de TiAlN não mostraram resultado satisfatório, haja visto que a broca sem revestimento obteve resultados de rugosidade inferiores.

A partir do comprimento usinado de 4608 mm, que corresponde a 96 furos ocorreu um aumento na rugosidade dos furos realizados pelas brocas não revestidas, podendo ser comprovados na ultima medição (6144 mm).

A figura 4.11 mostra os valores de R_a para mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço $f_n=0,15$ mm/rot

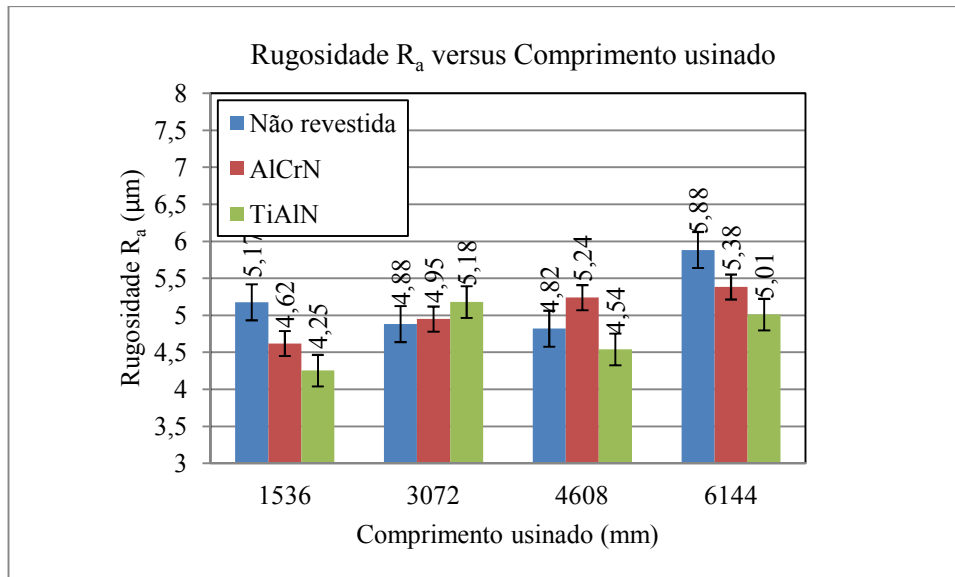


Figura 4.11 Rugosidade com parâmetros de $v_c=35$ m/min e $f_n=0,15$ mm/rot

Quando ocorreu a mudança de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, com avanço de $f_n=0,15$ mm/rot, figura 4.11, os valores de rugosidade tomam valores diferentes, porém ainda as brocas sem revestimento continuam com valores maiores de rugosidade para a primeira medição (1536 mm) e a última medição (6144 mm). As brocas revestidas com TiAlN apresentam valores de rugosidades menores que os outros tipos nos comprimentos usinados de 1536, 4608 e 6144 mm.

Os compostos AlCrN e TiAlN permitiram furações com grau de rugosidade IT7, satisfatório tratando-se de furação profunda e sem a existência de pré furo.

A redução da rugosidade quando ocorre a mudança da velocidade de corte de 25 para 35 m/min, pode ser explicada pelo maior número de vezes em que as guias da ferramenta passam pelo mesmo ponto do corpo de prova ocorrendo uma remoção mais efetiva de material das paredes dos furos.

A figura 4.12 mostra os resultados do ensaio de furação com a mudança dos parâmetros de v_c de 35 para 25 m/min e o aumento de f_n para 0,25 mm/rot.

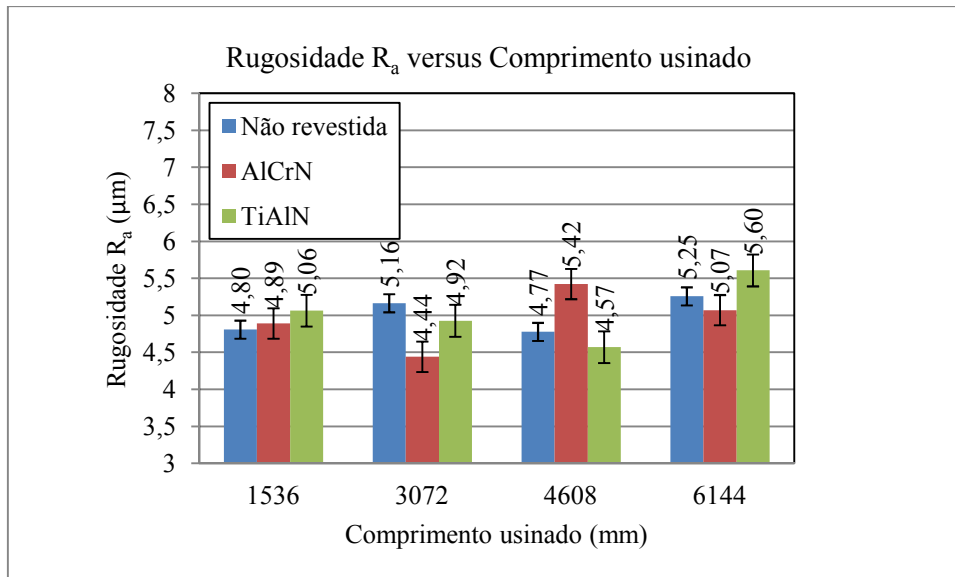


Figura 4.12 Rugosidade com parâmetros de $v_c=25$ m/min. e $f_n=0,25$ mm/rot

Na medição realizada em 1536 mm de comprimento usinado, a rugosidade média R_a que menor ocorreu foi para a broca não revestida, seguida do revestimento AlCrN e TiAlN, respectivamente.

Devido ao aumento de f_n , as medições de rugosidade média tiveram variações acima das condições anteriores, porém ainda indicando baixo valor de rugosidade caracterizado pelo padrão IT9.

A figura 4.13 mostra os valores de rugosidade média R_a dos furos, para as condições de $v_c=35$ m/min e $f_n=0,25$ mm/rot

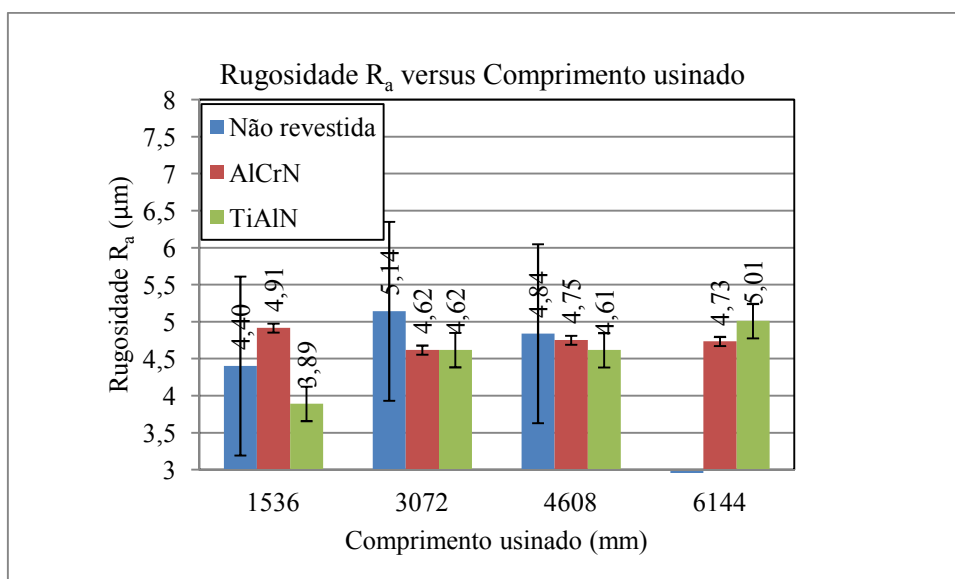


Figura 4.13 Rugosidade com parâmetros de $v_c=35$ m/min. e $f_n=0,25$ mm/rot

Quando ocorre a mudança de v_c para 35 m/min e f_n para 0,25 mm/rot, indicada na figura 4.13, considerada a condição mais severa dos ensaios, com maior esforço de corte e velocidade de corte, os revestimentos mostram-se mais efetivos quanto a valores de rugosidade média dos furos. Este fato pode ser explicado pela presença do composto Al que atua como lubrificante no estado sólido, servindo como interface cavaco/ ferramenta facilitando o escoamento do cavaco e limpando a superfície interna do furo.

A condição não revestida obteve resultados inferiores porque não possuem nenhum elemento facilitador que atue como lubrificante ou no escoamento de cavacos, constatou-se não ser possível a realização das medições no comprimento 6144 mm devido a falha catastrófica das ferramentas não revestidas. As brocas com o composto TiAlN também não possibilitaram a medição na mesma distância de comprimento usinado que a com AlCrN.

4.4 Medição dos furos

Nas medições dos furos, resultados diferentes foram encontrados com a variação de parâmetros de corte e aplicação de revestimentos. Nas ferramentas os resultados obtidos estão detalhados através de gráficos onde a variação do diâmetro dos furos está relacionada com o comprimento usinado.

A figura 4.14 mostra os valores de diâmetro obtido com $v_c= 25$ m/min e $f_n= 0,15$ mm/rot.

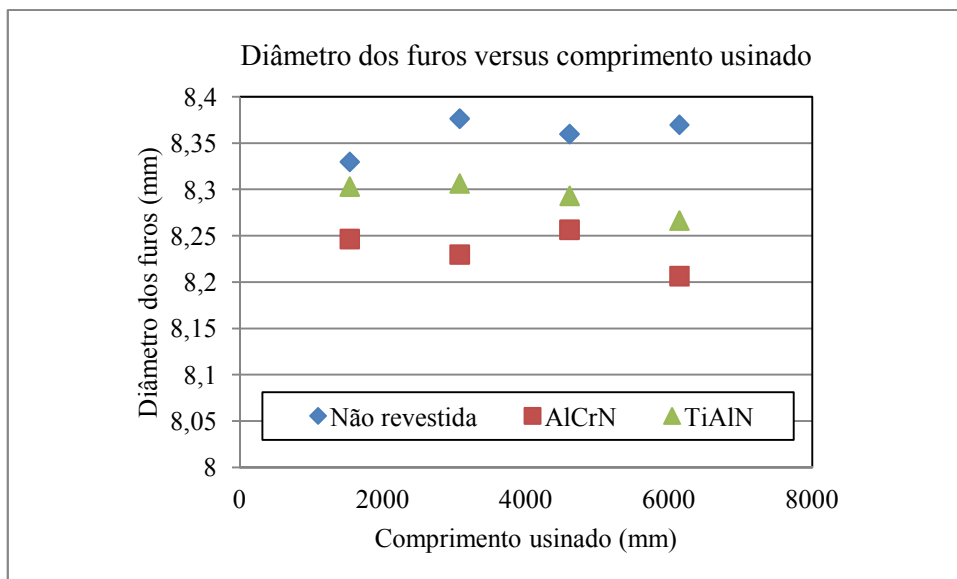


Figura 4.14 Valor de diâmetro com valores de $v_c= 25$ m/min e $f_n= 0,15$ mm/rot

De acordo com a figura 4.14, as ferramentas não revestidas obtiveram valores maiores do diâmetro dos furos, considerando que a broca possui um diâmetro de 8,0 mm com tolerância h8. O revestimento TiAlN foi o que obteve uma variação menor em todo comprimento usinado, caracterizando valores bem similares, enquanto o AlCrN obteve menores valores de diâmetro, sendo considerado o melhor resultado para os parâmetros utilizados.

A figura 4.15 mostra valores de diâmetro com parâmetros de corte de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

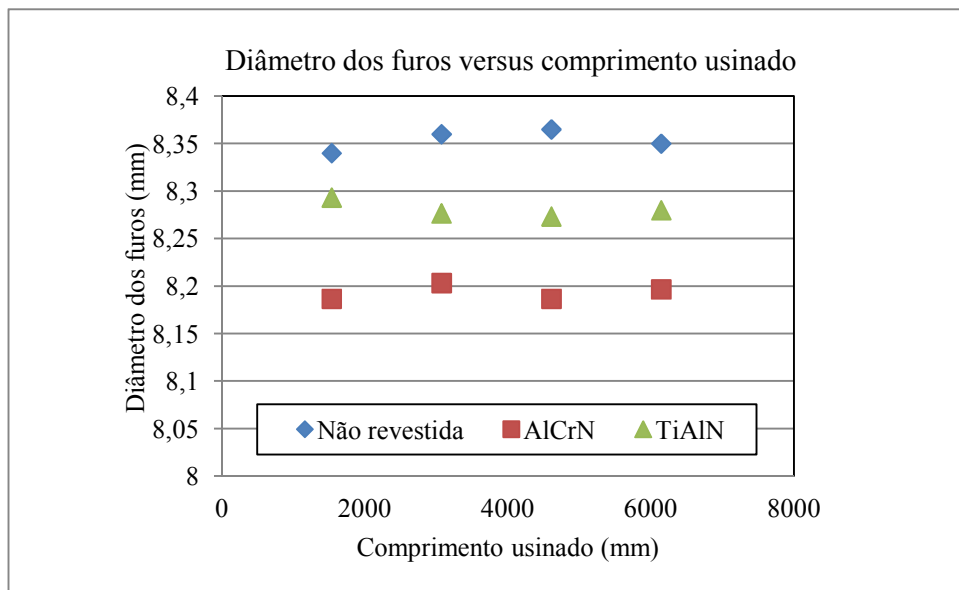


Figura 4.15 Valor de diâmetro com valores de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot

Com a mudança de parâmetros de velocidade de corte de 25 para 35 m/min, indicado na figura 4.15, a sequência de resultados obtidos nos furos realizados praticamente se manteve, o melhor resultado foi obtido no AlCrN ocorrendo valores menos dispersos e próximos ao diâmetro dos gumes da broca.

A figura 4.16 mostra valores de diâmetro dos furos realizados com $v_c = 25$ m/min e avanço $f_n = 0,25$ mm/rot.

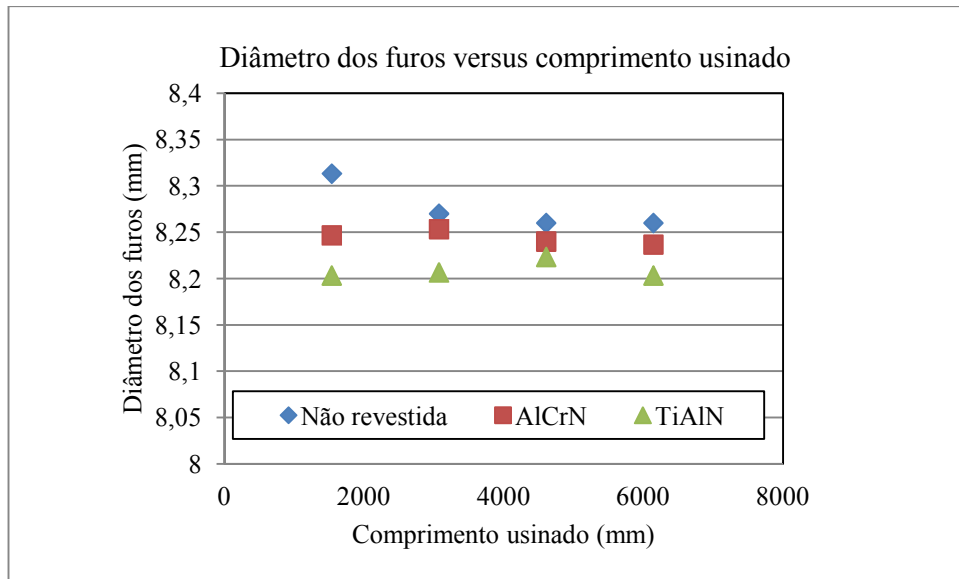


Figura 4.16 Valor de diâmetro com valores de $v_c = 25$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot

Quando ocorre a diminuição de v_c para 25 m/min e o aumento de f_n para 0,25 mm/rot, a figura 4.16 mostra uma condição diferente das obtidas nos valores anteriores. A ferramenta não revestida ainda prevalece com valores de diâmetro maiores, porém a broca com AlCrN apresentou seus valores de diâmetros de furos maiores que as brocas revestidas com TiAlN.

No comprimento usinado de 1536 mm mostra de forma bem clara a situação relatada anteriormente, já a partir do comprimento usinado de 3072 mm, os valores de diâmetro de furo realizado se aproxima e mantém seus valores próximos até o comprimento usinado de 6144 mm para todos os tipos de revestimentos e não revestidas.

Com os parâmetros utilizados para aquisição de dados do gráfico da figura 4.16, o revestimento TiAlN é o que mostra os melhores valores de diâmetro de furos realizados.

A figura 4.17 mostra os valores de diâmetro versus comprimento usinado com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot.

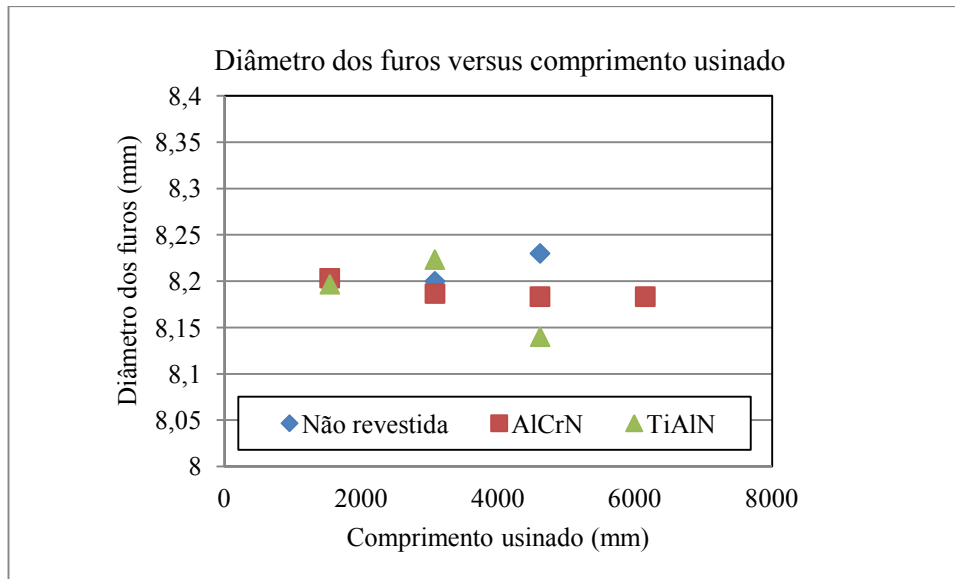


Figura 4.17 Valor de diâmetro com valores de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,25$ mm/rot

A figura 4.17 mostra variações de diâmetro no comprimento usinado de 1536 mm, muito semelhantes para todas as brocas ensaiadas, a partir do comprimento usinado de 3072 mm os furos realizados com brocas revestidas tiveram seus valores de diâmetro inferiores as brocas não revestidas. As brocas com AlCrN mantiveram seus valores de diâmetro similares em todo comprimento usinado enquanto as brocas revestidas com TiAlN tiveram menores valores de diâmetro.

A possível justificativa para os valores de diâmetro das brocas revestidas serem menores é a facilidade de escoamento do cavaco pela interface cavaco/ferramenta, além do menor desgaste das ferramentas, que pode ser diferente entre gumes da mesma broca, devido a possíveis inclusões e variações de estrutura metalográfica da placa onde foi realizado o ensaio. O desgaste desigual dos gumes pode ocasionar esforços desiguais da ferramenta durante o corte aumentando assim o diâmetro do furo.

4.5 Análise do desgaste e considerações finais

Após análise de todos os resultados obtidos em função dos desgastes de flanco e número de furos, foi realizado um último ensaio de usinagem em que comparou-se a melhor condição de usinagem, a condição de corte considerada satisfatória para o ensaio de fim de vida das brocas foi de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot, escolha em virtude dos valores obtidos nos outros gráficos, dentro de valores mínimos de diâmetro e desgaste de flanco.

A figura 4.18 mostra os resultados obtidos para os ensaios de fim de vida para a condição escolhida.

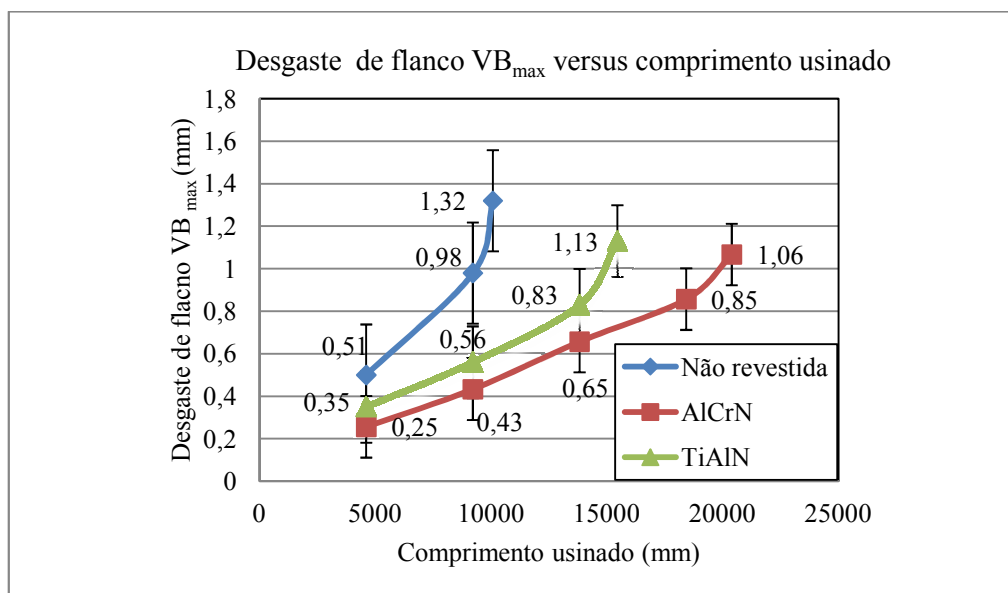


Figura 4.18 Teste de fim de vida das ferramentas

A figura 4.18 mostra que entre os dois revestimentos, AlCrN e o TiAlN, e as brocas não revestidas, o revestimento que apresentou menor desgaste de flanco VB_{max} foi o com AlCrN, para a condição de $v_c= 35$ m/min e $f_n= 0,15$ mm/rot.

As brocas revestidas com AlCrN usinaram uma média de 105% mais que as não revestidas, valor este determinado em aproximadamente 20400 mm, onde foi realizado a ultima medição de desgaste de flanco das brocas com AlCrN enquanto as brocas não revestidas chegaram a 10080 mm de comprimento usinado.

Comparando-se com as brocas não revestidas, o rendimento das brocas revestidas com TiAlN obtiveram resultados da ordem de 53% superior, chegando a um valor de comprimento usinado médio de 15456 mm.

4.6 Análise da superfície das ferramentas com revestimento AlCrN

Após os ensaios de fim de vida das brocas revestidas com AlCrN foi realizado análises por MEV, para caracterização do desgaste predominante nas brocas. A figura 4.19 mostra o flanco de uma broca revestida com AlCrN após teste de usinagem.

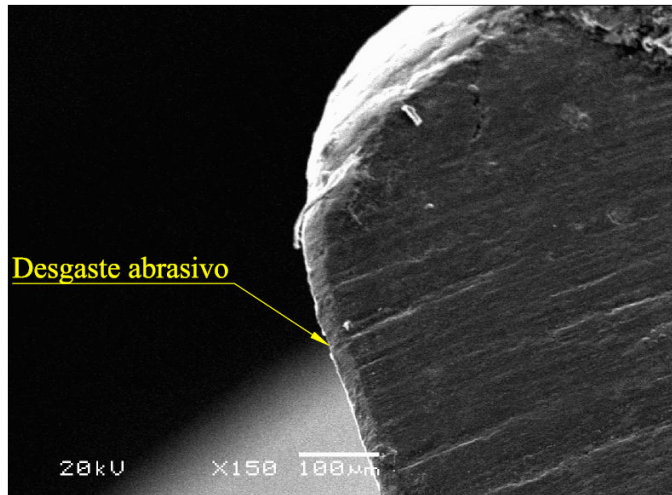


Figura 4.19 Flanco de uma das brocas com AlCrN, após teste de usinagem

A figura 4.19 mostra o flanco de uma broca revestida com AlCrN, após realizar teste de usinagem com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot. O desgaste abrasivo mostrou-se evidente no gume da ferramenta, através de riscos causados pelo fluxo de material abrasivo no revestimento da broca.

Para melhor caracterização do desgaste predominante nas brocas, a figura 2.20 mostra o desgaste do gume principal de uma das ferramentas utilizadas com $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot.

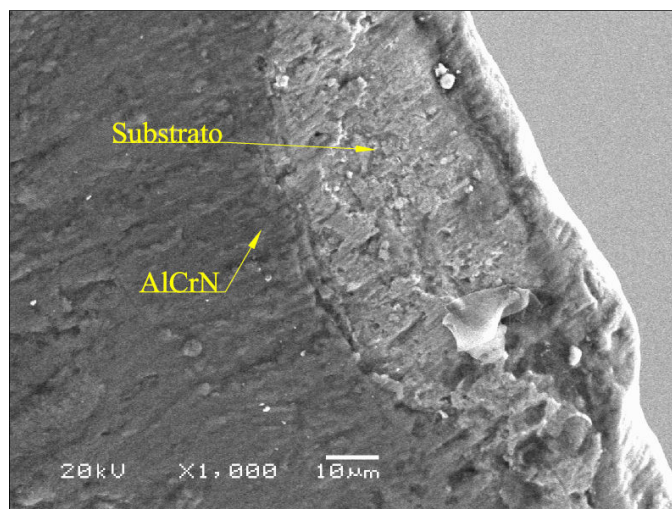


Figura 4.20 Desgaste do gume principal da ferramenta revestida com AlCrN

A figura 4.20 mostra o desgaste por abrasão no gume principal da ferramenta após realização dos testes de usinagem, com a remoção de revestimento e exposição do substrato da ferramenta.

Outro tipo de desgaste foi identificado no flanco da ferramenta como o desgaste por adesão, não sendo considerado como desgaste característico na usinagem de ferros fundidos.

A presença do desgaste adesivo na ferramenta justifica-se pela matriz do ferro fundido nodular ferrítica, onde a presença de ferro livre, em maior quantidade mostrou-se evidente, até mesmo durante os testes de usinagem com a formação de cavacos contínuos, observados durante os testes, em que as brocas iniciavam os furos.

A figura 4.21 mostra o gume transversal da broca com AlCrN, imagem obtida através de MEV.

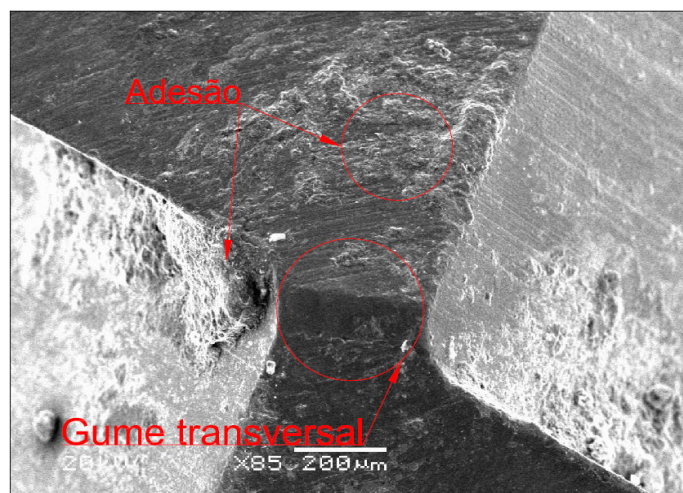


Figura 4.21 Gume transversal de uma broca com AlCrN

A presença de material aderido no gume transversal da ferramenta mostrou-se evidente, figura 4.21, podendo ser caracterizado pelo encruamento do cavaco durante a usinagem. Encruamento provocado em virtude de não existir pré-furo no ensaio de furação, dificultando a saída de cavacos durante a usinagem. Outro fator a ser considerado é a baixa velocidade de corte no centro do gume transversal e a não existência de ângulo de saída de cavacos. A deformação plástica do gume por esmagamento também é justificada pela não existência de corte de material pela ferramenta durante o ensaio, já que a broca não possui área cortante no gume transversal.

Para comprovar que o material aderido na ferramenta era ferro fundido nodular e também atestar que composição química do revestimento foi realizado uma análise por espectrometria EDS, figura 4.22, que determinou os elementos presentes nos pontos 1 e 2.

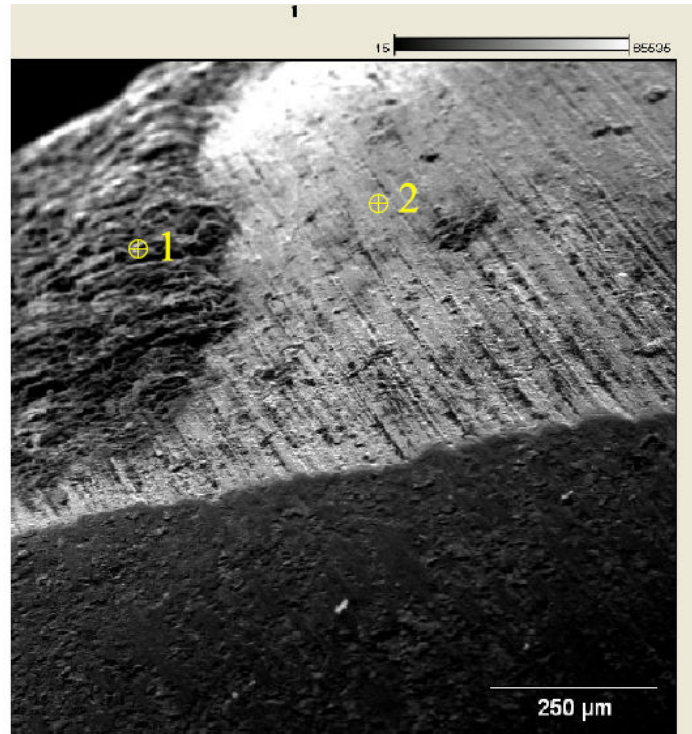


Figura 4.22 Superfície da broca com material aderido

A figura 4.22 mostra que ocorreu desgaste abrasivo na superfície da ferramenta, e revela material aderido na sua superfície, indicando a presença dos dois tipos de desgaste durante a usinagem do ferro fundido nodular.

Para comprovação que o material aderido na broca fosse realmente ferro fundido, foi realizado espectros dos pontos 1 e 2, figura 4.23 e 24, respectivamente.

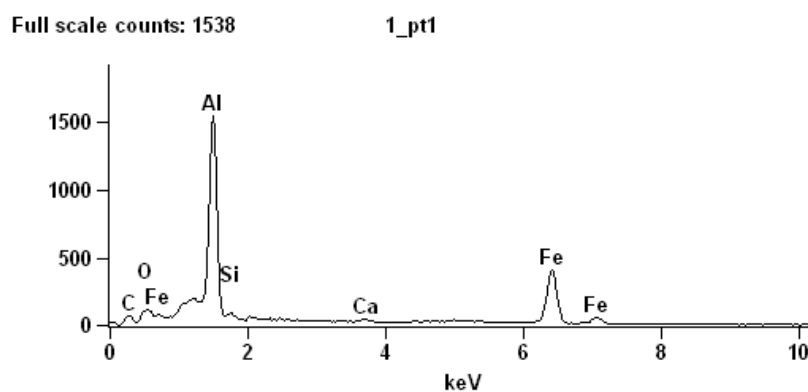


Figura 4.23 Espectro do material aderido

O espectro do ponto 1, revelou que o material aderido é ferro fundido, indicado pelo ponto onde mostra a presença de ferro (Fe) na composição química do material aderido na broca. O alto índice de alumínio (Al) estima-se sendo os apoios da placa para os

testes de usinagem eram de calços de alumínio, e como as brocas realizavam furos passantes, acabaram por aderir alumínio na superfície.

O espectro do revestimento AlCrN na ferramenta está comprovado no ponto 2, figura 4.24.

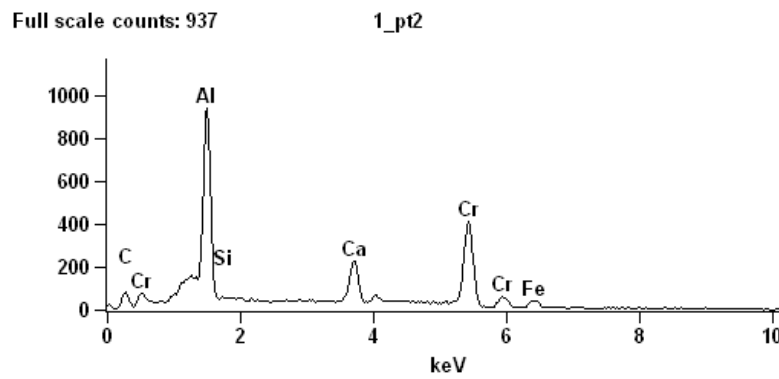


Figura 4.24 Espectro da superfície desgastada

O espectro do ponto 2, figura 4.24, indica desgaste do revestimento, pela presença dos elementos Cr e Fe na figura, característicos do aço rápido M2.

5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram a evidência clara da influência da velocidade de corte durante o processo de furação com brocas revestidas no desgaste de flanco. Por exemplo, a condição de $v_c = 35$ m/min e $f_n = 0,15$ mm/rot, comparando-se brocas com e sem revestimento, verificou-se que o aumento da velocidade de corte, melhorou o desempenho, possivelmente pela formação de óxidos de alumínio que, auxiliaram na redução do processo de desgaste por abrasão do material a ser usinado na superfície da broca.

O processo de desgaste por abrasão foi bem caracterizado nos gumes principais com uma participação grande da adesão, devido as características dúcteis da matriz ferrítica do ferro fundido nodular usinado. No gume transversal das brocas não foi caracterizado desgaste abrasivo, em virtude de não ocorrer corte de material, mas sim encruamento pela baixa velocidade de corte, em relação ao gume principal.

As brocas revestidas com AlCrN foram as que alcançaram maiores comprimentos usinados, com menores desgastes de flanco em testes com comprimento usinado já pré-estabelecidos. Comparando-se com as brocas sem revestimento obtiveram um rendimento de 100%, enquanto que as brocas revestidas com TiAlN renderam 53%, em comparação as mesmas brocas não revestidas. O revestimento TiAlN teve rendimento inferior ao AlCrN, porém torna-se uma solução bem eficaz na usinagem de ferro fundido nodular, quando comparado com ferramentas não revestidas.

Este estudo contribuiu para se conhecer melhor a influência da aplicação de revestimentos em brocas no processo de furação confirmando os resultados encontrados por outros pesquisadores e ampliando a pesquisa sobre este material.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a aplicação de novos revestimentos de ferramentas pelo processo PVD na usinagem de ferro fundido nodular com matriz ferrítica.

Analisar a influência do desgaste de flanco nos erros de circularidade durante a furação com brocas de aço rápido revestidas com PVD.

Incluir novos métodos de revestimento de ferramentas como revestimentos duplex em ferramentas para usinar ferros fundidos de modo geral.

Analisar a emissão acústica e análise de vibrações das ferramentas durante o processo de usinagem de furos, e sua relação com o desgaste de flanco.

Estudar formas de aplicação e fluidos de corte em furação profunda para facilitar ao escoamento de cavacos de ferros fundidos.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, Déborah. **Investigação de Desvios Geométricos no Alargamento de Ferro Fundido com Ferramentas Revestidas**. Dissertação: Universidade de Uberlândia, 2008.

AMORIM, Heraldo. **Processos de Fabricação por Usinagem**. Porto Alegre: DEMEC/UFRGS, 2003. Apostila.

ANDRADE, Maria de Fátima. **Análise da Morfologia e da Resistência ao Desgaste de Revestimentos TiAlSiN Efectuados por PVD**: Dissertação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

ARMY, Headquarters Department of the. **Fundamentals Machine Tools**. Washington : HQ Tradoc, 1996.

BAGETTI, João Henrique. **Análise da Usinabilidade, Deformação e Temperatura no Fresamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento**. Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

BALZERS, Oerlikon. **Coating Guide**. www.oerlikon.com/ecomaXL/index. Acesso em 15 de maio de 2012.

BARBOSA, Patricia Alves. **Furação de Ferros Fundidos Austemperados e Nodular Perlítico**. Dissertação. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

BLANES, Sanches. **Sistema de fixação hidráulica**. www.sanchesblanes.com.br. Acesso em 20 de 08 de 2011.

BUNSHAH, R. F. **Handbook of Hard Coatings: Depositions Technologies**,. New Jersey: Noyes Publications, 2001.

KLOCKE, F. e Klöpffer, C. **Característica da Usinagem do Ferro Fundido Nodular**. Máquinas e Metais. 2006.

CASTILLO, Willian Jefferson González. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

CAVALCANTE, Fabrício José Nóbrega. **Análise de Utilização de Broca Escalonada de Canal Reto no Processo de Furação em uma Liga de Alumínio Utilizada na Indústria Automotiva**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.

- CAVALER, Luiz Carlos de Cesaro. **Fresamento Periférico do Aço Aisi-Sae D6 Temperado e Revenido Utilizando Fresas de Metal-Duro.** Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- CHIAVERINI, Vicente. **AÇOS E FERROS FUNDIDOS.** 7°. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- COROMANT, Sandvik. 2011. **Manual Técnico.** São Paulo : Elanders, 2011.
- COTTERREL, M. G e Kelly, J F. **Minimal Lubrication Machining of Aluminium Alloys.** Journal of Materials Processing Technology. 2002.
- DASILVA, M B . **Lubrication in Metal Cutting Under Built-up Edge Conditions.** Tese University of Warwick. 1998.
- DETTOGNI, Marcio Abbade. **Principais Mecanismos de Desgaste e Avaliação de Diferentes Ligas para Corpos Moedores.** Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.
- DINIZ, Anselmo Eduardo, Marcondes, Francisco Carlos e Coppini, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber, 2008.
- DORMER. 2008. **Manual Técnico.** São Paulo, 2008.
- EVANS, Tony. **Usinagem de Furos Profundos.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.
- FEDEVJCYK. J. V., Paulo. A. C. Beltrão, Mozart. M. Marmentini. **Estudo da Furação do Ferro Fundido Nodular com Brocas Helicoidais de M2 Nitretadas.** XIV SICITE - UTFPR. 2010.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo. Edgard Blucher, 1970.
- FRANCKLIN, Alexandre Reis. **Um Breve Estudo Sobre Ferro Fundido Nodular.**Dissertação. UEZO, 2009.
- ISCAR. 2012. **Ferramentas de Corte.** CD Room Material Didatico. 2012.
- ISRAEL, Charles Leonardo. **Estudo Comparativo da Resistencia ao Desgaste e ao Impacto de Ferros Fundidos de Alto Desempenho.** Dissertação. UFRGS. 2005.
- CORONADO, J., et al. **Mechanical Properties Of Cementite In Mottled Cast Iron.** Proceedings of ABRASION. 2008.
- JESUS, Edilson Rosa Barbosa. **Ferramentas de Usinagem em Aço Rapido AISI M2 Obtido por Conformação por "Spray".** Dissertação. Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, 2004.

JÚNIOR, Antônio Maria De Souza. **Estudo da Utilização de PCBN e Cerâmica Mista no Fresamento de Blocos Motores de Ferro Fundido Cinzento**. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2001.

JUNIOR, Ercio. Massier. **Usinabilidade de Ligas de Ferro Fundido para Aplicação em Cabeçotes de Motor Através de Ensaios de Furação**. Dissertação. UDESC, 2010.

JUNIOR, José Mario. **Análise do Processo de Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN+TiAlN, AlCrN e AlCr-Based**. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2007.

KENNAMETAL. 2011. **kennametal** www.kennametal.com/images/repositories. Acesso em 20 de 08 de 2011.

KHARAGPUR, IIT. **Manufacturing Processes handbook: Module 3- Lesson 15: Cutting Tool Materials of Common Use**. 2010.

KLAUBERG, André Luiz. **Aplicação de Mínimas Quantidades de Fluido de Corte nos Processos de Furação e Rosqueamento Interno de Eixos para Motores Elétricos**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

KÖNIG, Wilfried e Klocke, Fritz. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren**. 5. Berlin: Springer, 1997.

LIN, Y-J., Agrawal, A. e Fang, Y. **Wear Progressions and Tool Life Enhancement With AlCrN Coated Inserts in High-Speed Dry and Wet Steel Lathing**. Wear. 2007.

MACHADO, Álisson Rocha, et al. **Teoria da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MARMENTINI, Mozart Marcos, et al. **Como os Parâmetros Influenciam a Geometria e o Acabamento Superficial do Furo Usando Brocas de Aço Rápido**. Revista Maquinas e Metais. 2011.

MARTINS, Paulo Sergio. **Avaliação dos Sistemas de Fixação Hidráulico e Térmico de Broca de Metal Duro em Furação do Cabeçote do Motor Fire**. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2008.

MIRANDA, Gilberto Walter Arenas. **Uma Contribuição ao Processo de Furação Sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN**. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, 2003.

MOCELIN, Fabiano. **Avaliação Da Usinabilidade Do Ferro Fundido Vermicular Em Ensaios De Furação**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

MSPC. **Informações Técnicas. Ferros E Aços Ii-40: Ferros Fundidos**. www.Mspc.Eng.Br/Ciemat/Aco240.Shtml#Ff_Maleav. Acesso em 25 de Junho de 2011.

NATALE, Vera Lucia. **Usinagem Sem Refrigeração**. Artigo produzido pela equipe técnica da AB Sandvik (Suécia). 2011.

- NICKEL, J., et al. **Evaluation Of The Wear Of Plasma-Nitrided And Tin-Coated Hss Drills Using Conventional And Micro-Pixe Techniques.** Wear. 2000.
- NOUARI, M, G. **Experimental Analysis and Optimisation of Tool Wear in Dry Machining of Aluminium Alloys.** Wear. 2003.
- OBBERG, Erik, et al. **Machinery's Handbook.** New York: Industrial Press Inc., 2000.
- OLIVEIRA, Valter Vander. **Influência da Geometria de Brocas na Furação do Ferro Fundido Vermicular.** Dissertação. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. 2008.
- PANGRÁCIO, Mauro Luiz. **Análise da Qualidade de Furos Realizados por Fresamento Helicoidal Interpolado.** Dissertação. Universidade Federal do Paraná. 2003.
- PEREIRA, Adriana Ana, et al. **The Influence of Sulfur on the Machinability of Gray Cast Iron FC25.** Journal of Materials Processing Technology. 2006.
- PEREIRA, Allan Coutinho. **Análise de Capabilidade para Avaliar a Influência da Geometria de Brocas Helicoidais em Furação Profunda de Uma Liga de Alumínio – Um Estudo de Caso.** Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.
- POZZI, Ricardo José. **Estudo Comparativo De Dois Inoculantes Em Ferro Nodular Ferrítico.** Dissertação. Instituto Superior TUPY, 2009.
- PRENGEL, H.G., et al. **A New Class Of High Performance PVD Coatings For Carbide Cutting Tools.** Surface And Coatings Technology. 2001.
- RIBEIRO, José Luiz Silva. **Fresamento do Aço Vhsuper nos Estados Recozido e Temperado com Metal Duro e Cermet.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- ROCHA, Alexandre da Silva. **Influência do Estado Superficial Prévio na Nitretação a Plasma do Aço AISI M2.** Tese. UFRGS, 2000.
- ROCHA, Cláudio Araújo, et al. **Efeito dos Parâmetros de Corte na Usinagem das Sedes de Válvulas de Motores de Combustão Interna Utilizando Ferramentas de CBN.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2001.
- SANDVIK. 2005. **Fabricação de moldes e matrizes.** Guia de aplicação. 2005.
- SANTOS, José Augusto Zermiani Dos. **Verificação da Sensibilidade dos Sinais de Vibração, Emissão Acústica e Corrente no Acompanhamento da Evolução do Desgaste de Brocas.** Dissertação. Instituto Superior Tupy.2008.
- SANTOS, Sandro Cardoso. **Furação de Ferro Fundido Cinzento com Brocas de Metal Duro Integral.** Dissertação. Universidade Federal De Uberlândia, 1999.
- SCHROEDER, P.T. **Widening Interest In Twist Drill.** Modernmach, Shop71. 1998.
- SCHRÖETER, R. e WEINGERTNER, W. L. **Processos de Usinagem e Ferramentas de Corte – Nível 1.** Vol II. UFSC, 2001.

- SECO, Tools. **Novidades Seco E Opiniões Ao Redor Do Mundo**. The New Edge. 2002.
- SILVA, Helio Antonio. **Influência do Ciclo de Furação na Usinabilidade do Ferro Fundido Cinzento GH 190**. Dissertação. Universidade Federal de Uberlandia, 2010.
- SILVA, João Apolinario. **Avaliação da Concentração de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos e de Elementos Traços em Uma Indústria de Fundição de Metais Ferrosos**. Dissertação. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2010.
- SMITH, Graham T. **Cutting Tool Technology: Industrial Handbook**. Girona : Springer, 2008.
- SOUZA, André João. **Processos de Dabrição por Usinagem Parte 1**. Apostila. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.
- STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas De Corte I**. Editora da UFSC, 2005.
- STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II**. Editora da UFSC, 2007.
- STOETERAU, Rodrigo Lima. **Processos De Usinagem**. Apresentação de Aula 9. 2007.
- TASSI, Reginaldo. **Revestimentos Superficiais Via Papvd e Avaliação do Desempenho de Bicos Pulverizadores de Suspensões Cerâmicas**. Dissertação. UFRGS, 2010.
- TRENT, E. M. e Wright, P. K. **“Metal Cutting”**. 4th: Butterworth Heinemann, 2000.
- VDI, Vdi Guideline 3198. **Handbuch Für Betriebstechnik. Verein Deutscher Ingenieure**. Düsseldorf. 1992.
- XAVIER, Fábio Antônio. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN**. Dissertação. Universidade Federal De Santa Catarina. 2003.
- YIGIT, Recep, et al. **Effect Of Cutting Speed On The Performance Of Coated And Uncoated Cutting Tools In Turning Nodular Cast Iron**. Journal Of Materials Processing Technology. 2008.
- YOUSSEF, Helmi A. E El-Hofy, Hassan. **Machining Technology : Machine Tools And Operations**. Boca Raton: CRC Press, 2008.