

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

JOSÉ MARIO FERNANDES DE PAIVA JUNIOR

**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**

CURITIBA

DEZEMBRO, 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

JOSÉ MARIO FERNANDES DE PAIVA JUNIOR

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO DO FERRO FUNDIDO VERMICULAR
COM BROCAS DE METAL-DURO COM CANAIS RETOS REVESTIDAS COM
TIN+TiAIN, AlCrN e AlCr-Based**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

**Orientador: Prof. Dr. Eng. Fred Lacerda Amorim
Co-Orientador: Prof. Ricardo Diego Torres, Ph. D**

CURITIBA

DEZEMBRO, 2007

Dedico este trabalho à minha esposa e aos meus pais, que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial para concluir mais esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, que me iluminou e me deu vida para aqui, finalizar mais uma etapa.

Ao meu professor orientador Prof Dr. Fred Lacerda Amorim, por toda atenção, orientação e acima de tudo pela amizade, ajuda, apoio, simplicidade, incentivo e colaboração recebida ao longo da realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ricardo Diego Torres, pela colaboração e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Dalberto Dias da Costa, pela observação e atenção dispensada para a realização dos ensaios.

Ao Pablo Pius e Wagner Mesquita pelo apoio para a realização dos ensaios.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Agradeço a empresa Oerlinkon Balzers Brasil Ltda, pelo trabalho de deposição dos filmes sobre as brocas.

Agradeço a Tupy Fundições Ltda por ter produzido os corpos de prova.

Ao **SENAI Joinville**, em especial a Sra. **Hildegarde Schulupp**, pela amizade, compreensão e apoio no decorrer deste projeto.

Agradeço a minha família, vocês foram mais importantes que possam imaginar. Em especial, agradeço o carinho da minha esposa Alessandra, sempre ao meu lado apoiando e incentivando em todas as jornadas, esta conquista é fruto seu também.

Por fim, a todos, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIMBOLOS	11
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	17
3.1. Ferro Fundido Vermicular	17
3.2 Processo de furação	19
3.2.1 Características	19
3.2.2 Características geométricas das Brocas Helicoidais e Canais Retos	21
3.2.2.1 Brocas de Canais Retos	23
3.2.3 Revestimentos de brocas com Canais Retos	24
3.2.4 Parâmetros de corte no processo de furação	30
3.2.5 Forças no processo de furação	30
3.3 Desgaste de Ferramentas	32
3.3.1 Mecanismos de Desgaste	32
3.3.2 Formas de desgaste em Brocas	34
3.4 Usinabilidade	36
3.4.1 Mecanismos de Formação de Cavacos	37
3.4.2 Tipos e Formas de Cavacos	38
3.4.3 Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular	40
4. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
4.1 Esquema Experimental	52
4.2 Procedimento Experimental	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1 Brocas de Metal Duro	66
5.2 Ensaios preliminares	67
5.3 Ensaios de vida	69
5.4 Força de Avanço e Momento Torçor	72

5.5 Rugosidade superficial (Ra)	75
5.6 Características Geométricas	77
5.6.1 Erro de circularidade	77
5.6.2 Diâmetro Médio.....	78
5.6.3 Retilidade.....	80
5.7 Formação de rebarbas.....	80
5.8 Análise do Cavaco.....	82
5.9 Análise dos revestimentos	83
6. CONCLUSÕES	86
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
8. BIBLIOGRAFIA	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos: (a) Ferro fundido cinzento, (b) Ferro fundido vermicular, (c) Ferro fundido nodular (Andrade, 2005).	17
Figura 3.2: Variáveis do processo de furação com ferramentas de corte definidas. (Konig, 1997). ...	20
Figura 3.3: Broca helicoidal e Canal Reto (Dini, 2003).	21
Figura 3.4: Caracterização entre uma broca helicoidal e uma ferramenta de Tornear (Stemmer, 2001).	21
Figura 3.5: Gumes de uma broca helicoidal (Stemmer, 2001).	22
Figura 3.6: Geometria com os ângulos de uma broca com canais retos (Stemmer, 2001).	23
Figura 3.7: Microestrutura do revestimento TiN + TiAlN Multicamadas (Guhring, 2007).	26
Figura 3.8: Resultados de ensaios de furação (Guhring, 2007).	26
Figura 3.9: Microestrutura do revestimento AlCrN (Balzers, 2007).	27
Figura 3.10: Microestrutura do revestimento Base AlCr (Balzers, 2007).	28
Figura 3.11: Propagação de trincas em filmes: (a) Multicamadas e (b) Monocamadas (Balzers, 2007).	299
Figura 3.12: Ensaios de Furação com brocas revestidas com TiAlN e AlCr-Based (Balzers, 2007).	30
Figura 3.13: Forças atuantes no processo de Furação (Konig, 1997).	31
Figura 3.14: Mecanismos de desgaste causados em virtude da velocidade de Corte e avanço (Konig, 1997).	34
Figura 3.15: Representação da medição do desgaste de flanco de uma broca (Bork, 1995).	35
Figura 3.16: Representação do desgaste de uma broca (Novaski, 1996).	36
Figura 3.17: Formação de Cavacos em Ferros Fundidos (Cohem, 2000).	40
Figura 3.18: Influência da forma da grafita na vida da ferramenta no torneamento com ferramenta de PCBN (VC= 800m/min.) (Dawson, et al 2001).	42
Figura 3.19: Redução da vida da ferramenta com aumento de quantidade de cementita (Fe ₃ C) na fase de perlita Bates (1996)	44
Figura 3.20: Usinabilidade variando os tempos de desmoldagem (Mocellin, 2002).	456

Figura 3.21: Vida da ferramenta em função do teor de perlita/ferrita na usinagem do Vermicular: (a) Metal duro, (b) CBN (Dawson et al, 1999).....	46
Figura 3.22: Efeito do teor de silício do vermicular na vida da ferramenta de torneamento (Dawson et al., 1999).....	50
Figura 3.23: Inclusões de carbonitreto de titânio onde possuem dureza maior do que o carboneto de tungstênio, aumentando consideravelmente o desgaste por abrasão (Dawson et al., 1999).....	50
Figura 3.24: Vida da ferramenta de torneamento em função do teor de titânio no CGI (Dawson et al, 1999).....	51
Figura 4.1: Centro de Usinagem e Sistema de Fixação da ferramenta e dos corpos de prova para ensaios de vida e Força.....	55
Figura 4.2: Modelo esquemático para desenvolvimento experimental.....	56
Figura 4.3: Geometria dos corpos de Prova; a) – Ensaios de Força; b) – Ensaios de Vida.....	56
Figura 4.4 – Micrografia do ferro fundido Vermicular CGI450. (a) Ampliação 10x, (b) ampliação 500x.....	57
Figura 4.5 – Brocas utilizadas para a realização dos ensaios.....	58
Figura 4.6: Sistema de aquisição de dados.....	61
Figura 4.7: Sistema de Medição do desgaste de Flanco.....	64
Figura 5.1: Força de Avanço e momento Torçor nas condições de vida da ferramenta.	68
Figura 5.2: Desgaste de Flanco ao longo do Comprimento Usinado em ensaios preliminares com ferramenta revestida TIN+TIAlN.	69
Figura 5.3: Desgaste de Flanco ao longo do Comprimento Usinado.	708
Figura 5.4: Quantidade de furos produzidos pelas brocas ensaiadas, ao desgaste de Flanco de 0,2mm.....	69
Figura 5.5: Forças de avanço medida nas condições de início meio e fim de vida das ferramentas sob velocidades de Corte de 80 e 150m/min, com Avanço de 0,1mm.....	70
Figura 5.6: Momento torçor nas condições de início meio e fim de vida das ferramentas sob velocidades de Corte de 80 e 150m/min, com Avanço de 0,1mm.....	72
Figura 5.7: Rugosidade dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.	76
Figura 5.8: Circularidade dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.	78
Figura 5.9: Diâmetro médio dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.....	79

Figura 5.10: Diâmetro médio dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.....	80
Figura 5.11: Formação de rebarbas na entrada dos furos nas condições de início e fim para o revestimento AlCr-based.....	81
Figura 5.12: Análise da formação dos cavacos nas condições de início e fim para os revestimentos ensaiados.	82
Figura 5.13: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com TiN+TiAlN: a) Ensaios realizados com V_c de 80m/min, b) Ensaios realizados sobre V_c de 150m/min.....	81
Figura 5.14: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com AlCrN: a) Ensaios realizados com V_c de 80m/min, b) Ensaios realizados sobre V_c de 150m/min.....	82
Figura 5.15: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com AlCr-based: a) Ensaios realizados com V_c de 80m/min, b) Ensaios realizados sobre V_c de 150m/min.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular comparado com o cinzento o nodular (Guesser, 1997).....	19
Tabela 3.2: Intervalos típicos de composição química para nodularidade de 0 a 20% (SinterCast, 2001).....	20
Tabela 3.3: Propriedades físicas e mecânicas do Vermicular com nodularidade de 10% sob temperatura de 25°C (Guesser, Schorede e Dawson, 2001).....	48
Tabela 4.1: Composição química do ferro fundido vermicular CGI450 (Fundição Tupy, 2007).....	57
Tabela 4.2: Dureza Brinell do Corpo de Prova.....	58
Tabela 4.3: Composição química do metal duro classe K10 (Guhring, 2007).....	59
Tabela 5.1: Medições da geometria das brocas.....	64
Tabela 5.2: Valores de Rugosidade Ra dos revestimentos (μmm).....	65

LISTA DE SIMBOLOS

AlSi		Alumínio-Silício
AlCr-based		Base de Cromo Alumínio
AlO₃		Óxido de Alumínio
ap	(mm)	Profundidade de Corte
CBN		Nitreto de Boro Cúbico
CGI		<i>Compacted Graphite Iron</i>
Cr		Cromo
CVD		<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DIN		<i>Deutsche Institut Fur Normung</i>
F	(mm)	Avanço
F_c	(N)	Força de Corte
Fe₃C		Cementita
F_f	(N)	Força de Avanço
F_p	(N)	Força Passiva
HV		<i>Hardness Vickers</i>
Kgf		Kilo grama Força
MEV		Microscópio Eletrônico de Varredura
Mn		Manganês
MnS		Sulfeto de Manganês
NBR		Norma Brasileira
PCBN		Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
PVD		<i>Physical Vapor Deposition</i>
S		Enxofre
Si		Silício
TiC		Carboneto de Titânio
Ti		Titânio
VB	(mm)	Desgaste de Flanco
VB_{max}	(mm)	Desgaste de flanco máximo
VB_{med}	(mm)	Desgaste de flanco médio
V_c	(m/min)	Velocidade de Corte

RESUMO

A utilização do ferro fundido vermicular, também conhecido como Compacted Graphite Iron (CGI), vem se destacando na indústria automobilística mundial principalmente na fabricação de blocos e cabeçotes de motores a diesel para veículos leves. Isto se deve ao fato de sua aplicação promover um aumento da eficiência energética dos motores e de reduzir os níveis de emissão de poluentes. Assim, o ferro fundido vermicular aparece como um bom substituto do ferro fundido cinzento, pois além de possuir propriedades de condutividade térmica e de amortecimento semelhantes ao cinzento, tem maior resistência mecânica, além de maior dureza. Porém, o CGI apresenta maior dificuldade de usinagem quando comparado ao ferro fundido cinzento. Atualmente, no processo de usinagem de um bloco e cabeçote de motor, a furação é uma das operações com maior tempo efetivo de corte, influenciando diretamente sobre os custos globais do processo. Analisando a importância desta operação, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de três diferentes tipos de revestimentos (TiN+TiAlN, AlCrN e AlCr-Based) aplicados sobre brocas de metal duro com canais retos no processo de furação do CGI 450. Como variáveis de entrada do processo foram utilizadas duas velocidades de corte para um avanço constante, com aplicação de fluido de corte externo. As variáveis de rendimento do processo analisadas foram o desgaste de flanco máximo, força de avanço e momento torçor. Além disso, foram analisados aspectos de integridade dos furos em relação à circularidade, retilineidade e rugosidade. Analisando todos os aspectos estudados neste trabalho, observou-se que ferramentas com revestimento a base de Cromo-Alumínio e sob parâmetro de usinagem com velocidade de corte de 80m/min apresentaram um melhor desempenho em termos de desgaste de ferramenta e acabamento das superfícies, resultando no maior tempo de vida útil do ferramental e melhor rugosidade superficial, circularidade e retilineidade do produto usinado.

Palavras-chave: ferro fundido vermicular, usinagem, ferramentas de corte.

ABSTRACT

The using of the Compacted Graphite Iron (CGI) is increasing in the worldwide automobile industry mainly in diesel blocks and head mechanism of motors in light vehicles. That happens because of its application in promoting a huge energetic efficiency in motor and in reducing the levels of pollutants. So, the Compacted Graphite Iron (CGI) appears as a good substitute to the iron gray, because of its properties in thermal conducting and diminishing like the gray one with higher mechanical resistance and also with higher hardness. But the CGI shows wider difficulty in machining when it is compared with the iron gray. Nowadays, in the iron gray process of a block and head mechanism of a motor, the holding is one of the biggest operations of cutting, with direct influences in kinds of revestiments, like (TiN+TiAlN, AlCrN and AlCr-Based) applied in hard metal drills with straight canals in the process of drilling of the CGI450. As changeable entrances in the process there is used two cutting speeds to a constant advance with the application of external cutting fluid. The rentable changing analysed in the process were the wear of the flank maximum, advance force and torque moment. Otherwise, there were being analysed the integrity of the holes in relation to surrounding, straightness and wrinkable. Analysing all the topics studied in this work, we could observe that tools covered with "chromo-aluminium and with an average machining in cutting of 80m/min had better development in tool stress and finishing resulting in a higher useful life and better superficial wrinkable, surrounding and straightness in a machining product.

Key words: Compacted Graphite Iron / Machining / Cutting tools

1. INTRODUÇÃO

A crescente busca das organizações pelo avanço tecnológico resulta diretamente no desenvolvimento de novas tecnologias, melhorando assim o processo e seus produtos. Neste contexto, a indústria automobilística e seus fornecedores vêm buscando cada vez mais melhorar seus processos e produtos, bem como desenvolver novos materiais que permitam alcançar a solução de compromisso entre lucro e baixo impacto ambiental. (Guessser, Guedes, 1997)

Diante deste pensamento, o vermicular passou a ganhar espaço na indústria automobilística, permitindo sua utilização em diversas peças, que atualmente são fabricadas em ferro fundido cinzento, tais como discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes e, principalmente, blocos de motores a diesel. Estes motores que trabalham com elevadas taxas de compressão, necessitam de uma estrutura rígida para suportar os esforços.

No entanto, seu rendimento e emissão de poluentes poderiam ser melhorados se picos de pressão de explosão ainda maiores pudessem ser utilizados. Por outro lado, tão desejável quanto melhorar o rendimento do motor é a redução de seu peso que influencia diretamente no consumo de combustível do veículo. O aumento do rendimento poderia ser alcançado com alterações de projeto ou com a utilização de materiais mais resistentes. Como as alterações de projeto possuem a limitação do peso e do espaço físico, a alteração de material consiste em uma boa solução (Mocellin, 2002).

A utilização do ferro fundido vermicular ou CGI (Compacted Graphite Iron) vem se tornando uma nova solução na produção de motores a diesel, por apresentar características de leveza, compacto com elevada resistência mecânica e de excelente condutividade térmica (Guessser, Guedes, 1997).

Em contrapartida, o ferro fundido vermicular apresenta grandes dificuldades de processamento durante usinagem devido sua elevada resistência mecânica quando comparado com o ferro fundido cinzento. Isto leva a força de corte maiores, reduzindo consideravelmente o tempo de vida do ferramental de corte, principalmente em processos de usinagem contínua como no torneamento e na furação, aumentando os custos de fabricação. Estes problemas fizeram com que

várias pesquisas fossem desenvolvidas com a intenção de tornar viável e competitiva a usinagem do vermicular, envolvendo universidades, empresas automobilísticas, indústrias fabricantes de ferramentas, fundições e empresas de usinagem de blocos de motores (Reuter et al., 2000).

O presente trabalho estuda o processo de furação do ferro fundido vermicular, utilizando-se de brocas de canal reto em metal-duro revestidas com TiN+ TiAlN multicamadas, AlCrN e AlCr-Based. Busca-se pesquisar todo o processo de furação com refrigeração externa, comparando o rendimento das ferramentas utilizadas no processo de furação, através dos diferentes parâmetros de corte e analisando a rugosidade superficial do furo e vida da ferramenta.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo estudar o processo de usinagem de furação do ferro fundido vermicular, apresentando um comparativo de rendimento entre as brocas inteiriças de metal duro revestidas com TiN+TiAlN multicamadas, AlCrN e AlCr-Based visando identificar a ferramenta que forneça o maior tempo de vida e o melhor acabamento superficial, observando-se a relação das grandezas de corte utilizadas durante o ensaio.

O trabalho também justifica a necessidade de melhoria contínua do processo de furação no processo produtivo, tornando-se um diferencial para a competitividade de mercado.

Durante os ensaios foram observados os tipos de avarias e desgastes das ferramentas, o tipo de cavaco formado, as forças de avanço, a variação dimensional e a rugosidade dos furos produzidos nos corpos de prova. Sendo utilizado duas velocidades de corte, explorando assim os limites do processo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análise do comportamento das brocas revestidas em relação ao seu desgaste, erros de forma dos furos obtidos, rugosidades e forças resultantes do corte (força de avanço e momento torçor);

- Análise do comportamento dos revestimentos empregados nas brocas utilizadas na usinagem de materiais abrasivos, utilizando-se inicialmente dos parâmetros de corte utilizados na empresa;

- Estudar o comportamento dos revestimentos, submetendo-os a parâmetros de corte mais elevados visando um acréscimo da produtividade;

- Observar o desgaste das ferramentas, avaliando a influência dos parâmetros de corte sobre o seu tempo de vida, monitorando o desgaste de flanco com relação ao comprimento usinado e forças atuantes.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1. Ferro Fundido Vermicular

Atualmente, o ferro fundido vermicular aparece como um excelente material para fabricação de peças como bloco de motores a diesel, coletores de escapamento e outras. Para tais aplicações, é recomendado que o material empregado possua características, como elevada resistência mecânica, boa condutividade térmica, tenacidade, ductilidade e capacidade de amortecimento de vibrações.

Os ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular são diferenciados principalmente pela forma da grafita. No ferro fundido cinzento, as grafitas apresentam-se em forma lamelar, já no nodular, as grafitas estão distribuídas aleatoriamente na forma de esferas e no vermicular, em formas alongadas com extremidades arredondadas, conforme apresenta a figura 3.1. (Dawson, 2002).

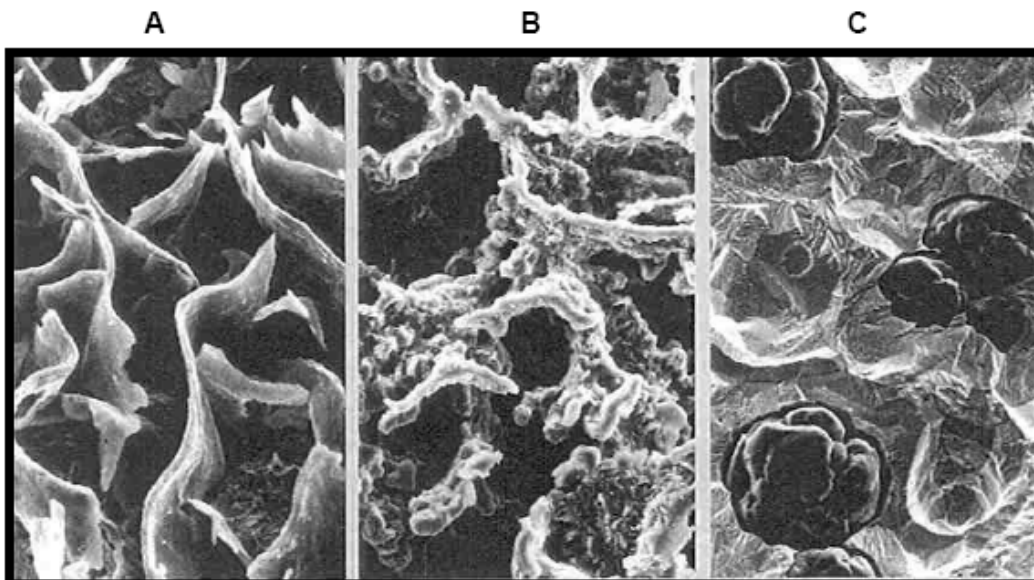


Figura 3.1: Forma espacial dos tipos de grafitas dos ferros fundidos. (a) Ferro fundido cinzento. (b) Ferro fundido vermicular. (c) Ferro fundido nodular (Dawson, 2002).

A ampla aplicação do ferro fundido cinzento na fabricação de blocos de motor está fundamentalmente ligada à sua excelente usinabilidade e à sua boa condutividade térmica. A eficiência do material em trocas térmicas deve-se ao fato da grafita estar espacialmente interconectada na matriz e possuir maior condutividade térmica que a do ferro. (Guesser, 2001).

No entanto, a grafita lamelar e interconectada provoca uma redução de resistência mecânica, ductilidade e tenacidade do material, pois gera descontinuidades na matriz. A forma e a disposição da grafita, que são as diferenças fundamentais do ferro fundido vermicular em relação ao cinzento e o nodular, conferem ao vermicular um ganho substancial de propriedades mecânicas, destacando-se a resistência à fadiga com perda pouco significativa de condutividade térmica (Dawson, 1993).

No vermicular, os cantos arredondados da grafite na matriz não agem mais como pontos de concentração de tensões e a grafita interconectada propicia uma maior taxa de transferência de calor e dissipação de vibrações que o nodular. Portanto, esta forma de grafita é responsável pela liga possuir boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga térmica, amortecimento e condutividade térmica intermediária aos ferros cinzentos e nodulares (Guesser, Guedes, 1997). Algumas de suas propriedades são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido vermicular comparado com o cinzento o nodular (Guesser, Guedes, 1997).

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à tração [MPa]	235	500	650
Módulo de elasticidade [GPa]	110	140	165
Resistência à fadiga [MPa]	100	205	265
Condutividade térmica [W/(mK)]	48	35	28
Dureza [HB]	200	225	270
Limite de escoamento 0,2%	160	380	425

Conforme a tabela 3.1, a resistência à tração aliada à forma da grafita demonstra de forma parcial a característica do CGI de apresentar baixa usinabilidade, porém suas propriedades são intermediárias quando comparado com o ferro fundido nodular e cinzento (Guesser et al, 1997).

Elementos de liga podem ser adicionados com o objetivo de obter melhores propriedades de resistência mecânica ao desgaste. De acordo com a empresa SinterCast, a microestrutura deve incluir uma quantidade de nódulos que varia entre 0 a 20%. Para uma microestrutura perlítica deve-se considerar a aplicação do material para que se possa determinar a porcentagem necessária de grafite.

A Tabela 3.2 representa a composição química típica para uma nodularidade de 0 a 20%, porém a empresa SinterCast ressalta que esta especificação está relacionado às propriedades desejadas do material e sua aplicação.

Tabela 3.2: intervalos típicos de composição química para nodularidade de 0 a 20% (SinterCast, 2001).

Estrutura da Matriz	Análise Química (%)							
	C	Si	Ce	Mn	S	Mg	Cu	Sn
70% de Perlita	3,6-3,8	2,1-2,5	4,4-4,7	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,3-0,6	0,03-0,05
100% de Perlita	3,6-3,8	2,1-2,5	4,4-4,7	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,6-0,9	0,08-0,10

3.2 Processo de furação

3.2.1 Características

Atualmente, a furação é um processo de usinagem que utiliza ferramentas com geometria definida sendo utilizado na produção industrial. O processo de furação é definido como um processo com um movimento rotativo principal, ou seja, um processo de usinagem que apresenta movimento de corte circular (Diniz, 2003).

O processo de furação faz parte do grupo de processos de fabricação por usinagem com gumes de geometria definida, sendo um dos processos mais

utilizados. O processo de furação, é responsável por 75% do volume de material removido na usinagem.

O processo de furação possui algumas peculiaridades, tais como (Mocellin, 2002):

- I. A velocidade de corte varia de um máximo na periferia até zero no centro da ferramenta, variando esforços e mecanismos de formação do cavaco ao longo dos gumes;
- II. Tem como característica dificultar o transporte de cavacos;
- III. As quinas da broca estão sujeitas ao desgaste;
- IV. Durante o processo de usinagem, ocorre o atrito acentuado entre as guias da broca e a parede do furo;
- V. Dificuldade em dissipar o calor, principalmente na região onde ocorre o corte;
- VI. O fluido de corte que deve atuar como refrigerante, lubrificante e meio de transporte de cavacos, chega com dificuldade ao gume da ferramenta, local onde ele é mais necessário.

A Figura 3.2 apresenta, as formas mais usuais do processo de furação e suas direções de corte.

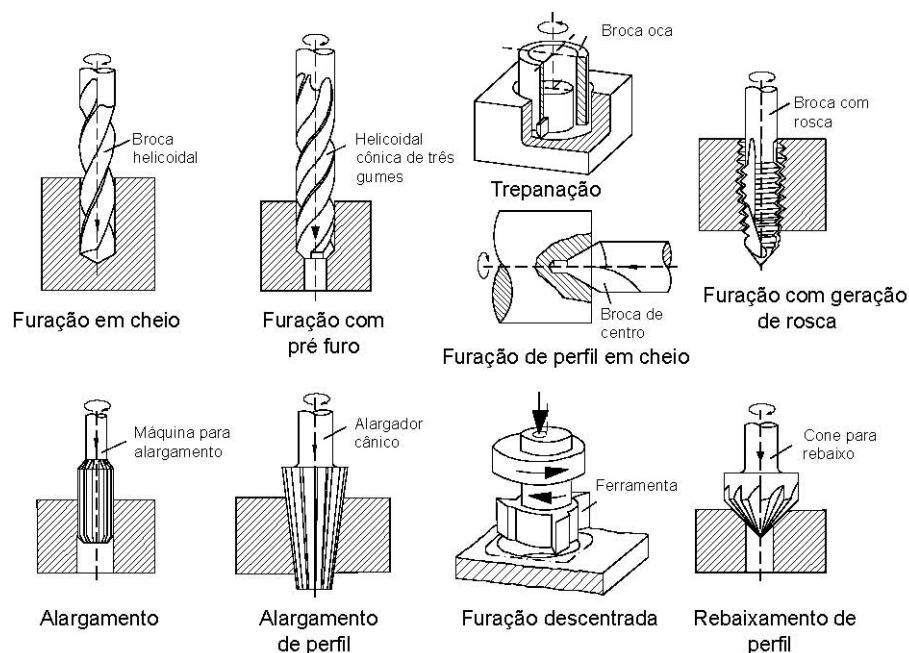


Figura 3.2: Variáveis do processo de furação com ferramentas de corte definidas (Konig, 1997).

3.2.2 Características geométricas das Brocas Helicoidais e Canais Retos

De acordo com as características da furação (diâmetro do furo, profundidade, tolerâncias de forma, medidas e volume de produção, etc.), podem ser empregados diferentes tipos de brocas. A figura 3.3 apresenta a nomenclatura utilizada para a broca e suas partes. A figura 3.4 apresenta uma comparação de uma broca com uma ferramenta de torneiar, onde se verifica os flancos, faces e gumes principais.

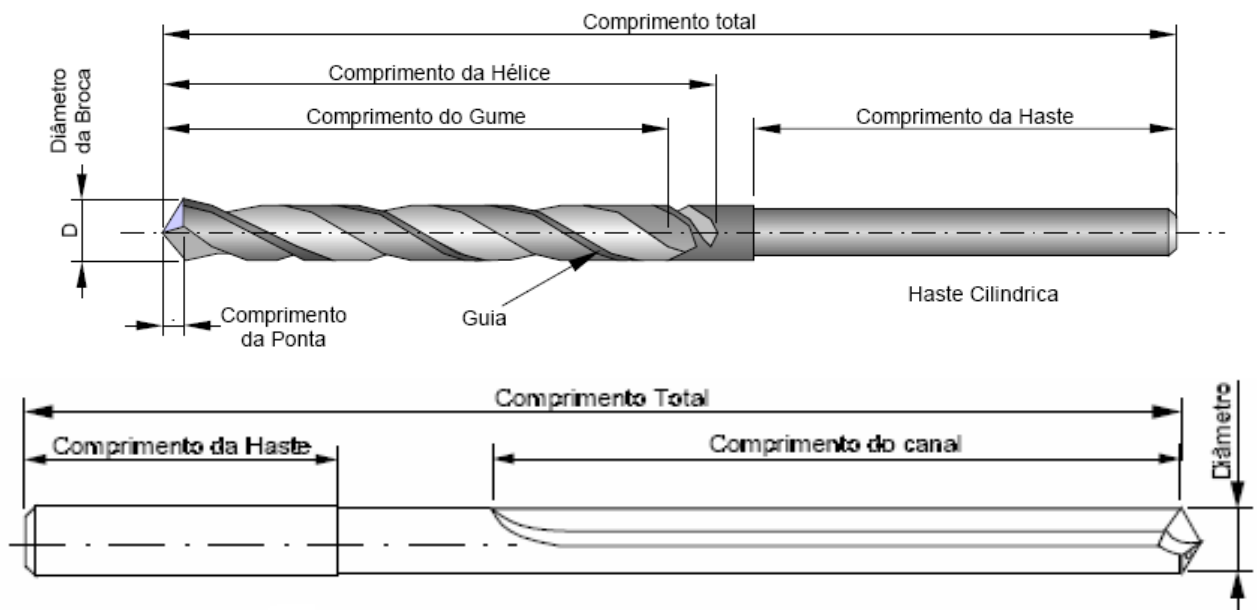


Figura 3.3: Broca helicoidal e Canal Reto (Diniz, 2003).



Figura 3.4: Caracterização entre uma broca helicoidal e uma ferramenta de Torneiar (Stemmer, 2001).

As brocas, assim como qualquer ferramenta de usinagem, têm seu desempenho fortemente afetado por sua geometria. A seguir é apresentado as principais partes que compõem a geometria de brocas.

a) Canais

Têm como função de facilitar a remoção do cavaco. Os canais facilitam também a entrada do fluido de corte, isto quando a ferramenta não possuir canais para refrigeração interna (Stemmer, 2001).

b) Gumes principais

Os gumes principais visualizando de frente são paralelos entre si, unindo-se os canais da broca com a superfície lateral de incidência (Stemmer, 2001).

c) Gume transversal

Localizado na ponta da broca, aliança entre os dois gumes principais (Stemmer, 2001). Sua ação de corte não é muito eficiente, caracteriza-se por dificultar o processo de corte, pois além da velocidade muito baixa, possui um ângulo de saída negativo. Participa em cerca de aproximadamente 30 a 65% da força de avanço (Reuter, 2000).

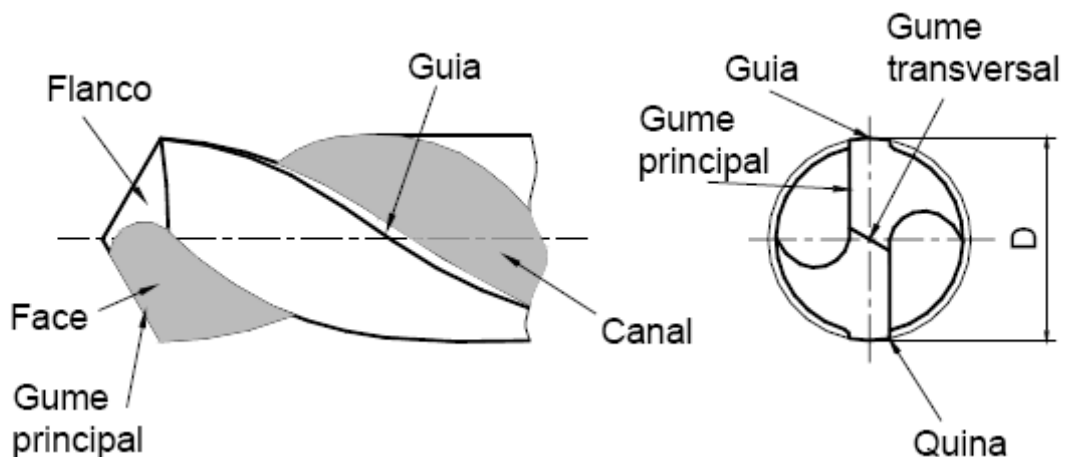


Figura 3.5: Gumes de uma broca helicoidal (Stemmer, 2001).

d) Guias

Constituem a parte sólida da broca. Sua função é de reduzir o atrito da broca nas paredes do furo e manter a direção do furo, assim consequentemente, reduz-se os esforços durante a furação (Stemmer, 2001).

3.2.2.1 Brocas de Canais Retos

Atualmente são as ferramentas mais utilizadas na execução de furos. Possuem geralmente dois gumes principais que podem ser analisados de forma análoga a uma ferramenta simples de torneamento. Os dois gumes principais são ligados pelo gume transversal (Konig, 1997). Possuem canais para refrigeração interna e podem ser utilizadas em maiores profundidades.

Estas brocas possuem características para a furação em cheio, ou seja, sem a necessidade de um furo guia ou um pré-furo, apresentando uma excelente estabilidade durante o processo de furação e uma boa resistência à torção. Essas brocas são empregadas principalmente para furação profunda de ferros fundidos do tipo ??? e ligas de alumínio Al-Si (Stemmer, 2001).

a) Principais Ângulos das Brocas de Canais Retos

As brocas de canais retos apresentam uma geometria, com algumas alterações quando relacionadas com as brocas helicoidais. A geometria de uma broca de canal reto com os principais ângulos pode ser vista na figura 3.6.

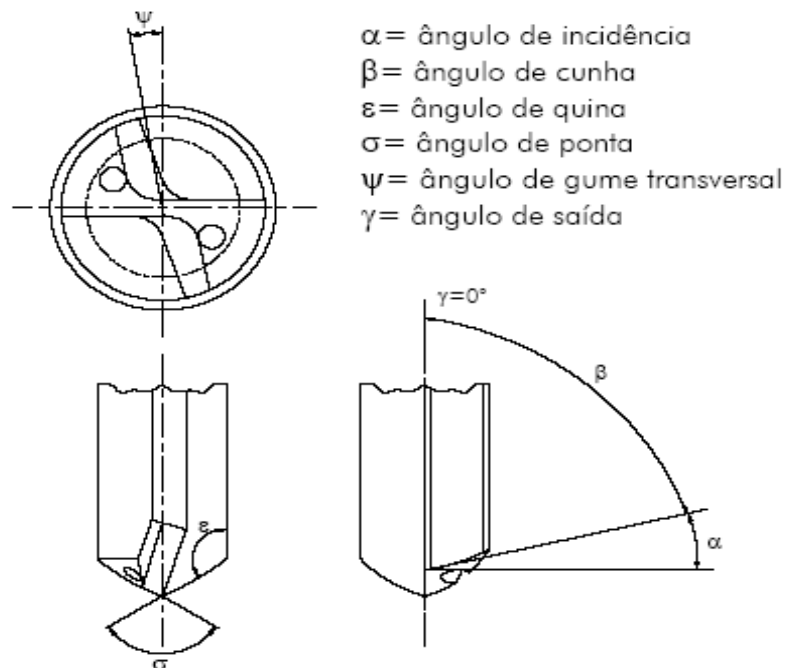


Figura 3.6: Geometria com os ângulos de uma broca com canais retos (Stemmer, 2001).

Ângulo de ponta (σ) – é o ângulo entre as arestas principais de corte, ou seja, formado pelos dois gumes principais. Geralmente esta inclinação é igual a 118° ou 140° para materiais moles. Quando o ângulo for maior que 118° , as arestas principais de corte tendem a ficar côncavas, tendendo a quebra da broca. Quando menor que 118° , ficam convexos resultando em vibrações durante a usinagem (Reuter, 2000).

Ângulo de incidência (α) – é gerado pelo rebaixamento do flanco principal. Usualmente encontra-se entre 12 e 15 graus. O aumento do ângulo de incidência evita o esmagamento de material pelo flanco da broca, reduzindo a força de avanço. Por outro lado, reduz a resistência do gume (Teixeira, 1995).

Ângulo do gume transversal (ψ) – este ângulo é localizado entre a aresta principal de corte e a aresta transversal. Este ângulo é gerado pelo ângulo de incidência (Reuter, 2001).

3.2.3 Revestimentos de brocas com Canais Retos

As primeiras ferramentas de corte revestidas para usinagem surgiram na década de 1960 associando propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade, grandezas que na maioria dos casos são incompatíveis em se tratando de um mesmo material. A comercialização destas ferramentas iniciou-se em 1969 com o desenvolvimento de ferramentas de torneamento revestidas de TiC pela Sandvik (Coromant, 2000). Tais ferramentas apresentaram alta resistência ao desgastes abrasivo e adesivo, a oxidação e à deformação plástica (Coromant, 2000).

Os revestimentos destacam-se por modificar as propriedades óticas, magnéticas, eletrônicas, químicas, aumentar a resistência mecânica e principalmente a resistência ao desgaste da superfície revestida. A utilização de revestimentos apresenta resultados expressivos, quando relacionamos redução de desgaste e aumento de produtividade das ferramentas de usinagem. Os revestimentos, de elevada dureza, tendem a diminuir o desgaste abrasivo (Bork, 1995).

Quando o revestimento contribui para a redução do coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta revestida, este tende a diminuir o calor gerado no flanco e na face da ferramenta. Tal fato aliado à baixa condutividade térmica do revestimento, diminui então, a solitação térmica da ferramenta, aumentando seu rendimento e produtividade (Bork, 1995).

a) Processos de Revestimentos

Atualmente, o processo de revestimento dominante é o Processo Químico de Deposição, conhecido tecnicamente e comercialmente como processo CVD (Chemical Vapour Deposition ou Deposição Química a Vapor). Outro processo de deposição, conhecido como, deposição física de vapor (PVD – Physical Vapour Deposition) impulsionou a utilização de revestimentos em substratos de aço-rápido, pois até então, a temperatura de deposição pelo processo CVD (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 (Coromant, 2000).

Este processo é indicado para aplicação em ferramentas de metal-duro, pois permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato (Bork, 1995). O processo PVD, por sua vez, surge como uma nova tecnologia, que opera com temperaturas de deposição na faixa de 400-600°C, podendo ser utilizado na aplicação do revestimento em substratos de aço-rápido sem maiores problemas (Coromant, 2000).

b) Tipos de Revestimentos

Existem diversos tipos de revestimentos, adequados para inúmeras aplicações de usinagem, porém, será detalhado apenas os revestimento TiN+TiAlN multicamadas, AlCrN e AlCrN-Based.

- Nitreto de Titânio e Titânio Alumínio multicamadas (TiN+TiAlN) – Este revestimento possui uma estrutura multicamada TiAlN + TiN e é aplicada em substrato de metal duro e aço rápido. Oferece excelente resistência ao desgaste a

altas temperaturas em furação. Tem excelentes resultados na usinagem a seco e com mínima quantidade de refrigeração. Possui uma dureza de 3.300HV 0,05 (Catalogo Guhring tools, 2007). A figura 3.7 mostra como se apresenta estas camadas no substrato.

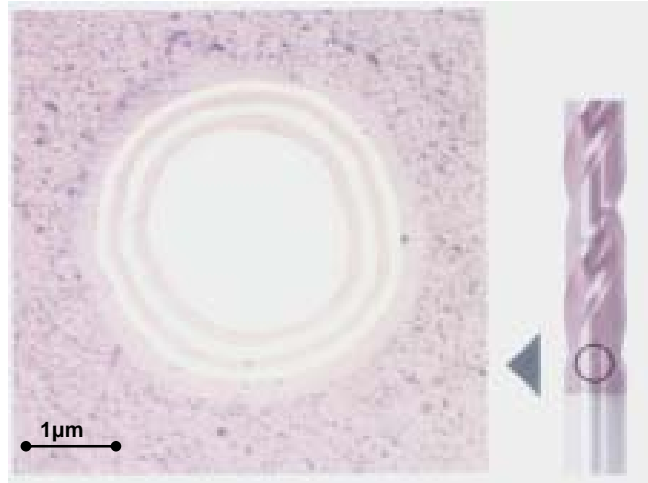


Figura 3.7: Microestrutura do revestimento TiN + TiAlN multicamadas (Guhring, 2007).

Ensaio foram realizados pela empresa Guhring, com o objetivo de identificar o desempenho deste revestimento no processo de usinagem em ferros fundidos. Para a execução dos ensaios utilizaram-se corpos de prova de ferro fundido cinzento com referência GG25, brocas de metal duro com canais helicoidais com diâmetro de 11,8mm e sem refrigeração. A figura 3.8 apresenta o comparativo do revestimento com outros revestimentos desenvolvidos também pela empresa, assim como os parâmetros utilizados para realização dos testes. Os resultados do tempo de vida da ferramenta estão expressos em comprimento usinado (m).

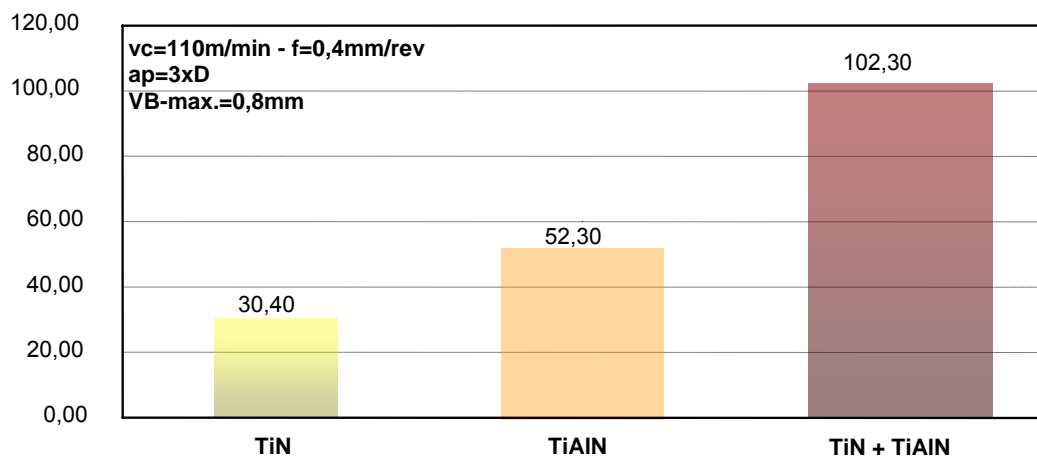


Figura 3.8: Resultados de ensaios de furação (Guhring, 2007).

Observa-se que o revestimento multicamadas TiN+TiAlN, apresentou um rendimento com relação ao tempo de vida maior, comparado com os outros revestimentos utilizados nos ensaios de furação realizado pela empresa Guhring. Este rendimento gerou boas expectativas para a realização dos ensaios de usinagem, no ferro fundido vermicular.

- Nitreto de Cromo-Alumínio (AlCrN) – faz parte da nova geração de revestimentos baseada em Nitreto de Cromo-Alumínio, sendo caracterizado substancialmente pelo aumento na resistência ao desgaste abrasivo. Em algumas séries de testes em operações de fresamento, aumento surpreendente do tempo de vida foram obtidos em comparação aos revestimentos já existentes. Os revestimentos a base de AlCrN são mais resistentes à oxidação e tem maior dureza do que os revestimentos existentes até então. São estáveis sobre condições superiores de temperatura, tendo em geral um desempenho melhor. Estes revestimentos são aplicáveis em ferramentas de metal duro e aço rápido. Possui dureza de 3.200 HV 0,05 (Balzers, 2007).

O nitreto de Cromo-Alumínio é um revestimento monocamada de alto rendimento isenta de titânio. É recomendado para operações onde exige alta resistência à oxidação e dureza, sendo resistente a elevadas temperaturas de trabalho, atingido a níveis de 1.200 °C. Estas propriedades conferem a este produto uma incomparável resistência ao desgaste, tanto em condições normais como sob esforços mecânicos elevados (Balzers, 2007).

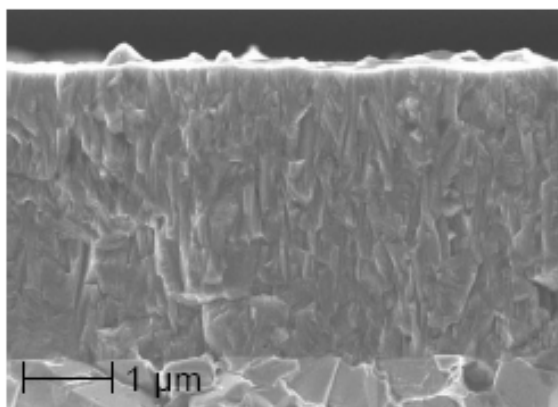


Figura 3.9: Microestrutura do revestimento AlCrN (Balzers, 2007).

- Revestimento a Base de Cromo-Alumínio – Conhecido comercialmente como Hélica, é o revestimento multicamadas que surgiu como uma alternativa para as operações de furação. Possui uma elevada resistência à abrasão e uma menor tendência à adesão. É indicado para execução de furos profundos, para operações de usinagem com ferro fundido, podendo ser aplicado em substratos de aço rápido e também metal-duro. A dureza deste revestimento é de 3.000 HV 0,05. Em função de seu baixo coeficiente de atrito, em ensaios de furação apresentou excelentes resultados sem a utilização de fluido de corte.

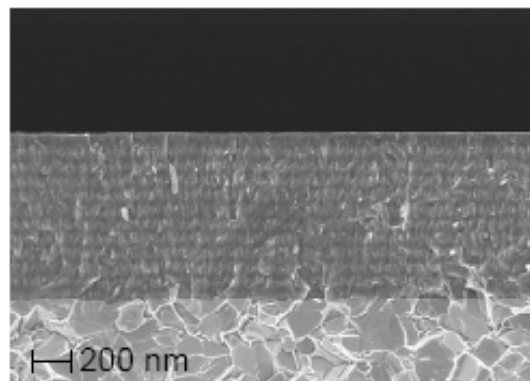


Figura 3.10: Microestrutura do revestimento Base AlCr (Balzers, 2007).

Este revestimento proporciona à ferramenta uma elevada resistência à abrasão, baixa tendência à adesão, facilidade na retirada do cavaco em função do baixo coeficiente de atrito do revestimento. O revestimento a base de Cromo Alumínio, possui boa resistência à elevados torque que podem ser gerados sobre a ferramenta, sem que ocorra lascamento do revestimento

Este revestimento apresenta também a capacidade de evitar trincas sobre a ferramenta. A figura 3.11 apresenta um comparativo entre um revestimento multicamadas e monocamadas.

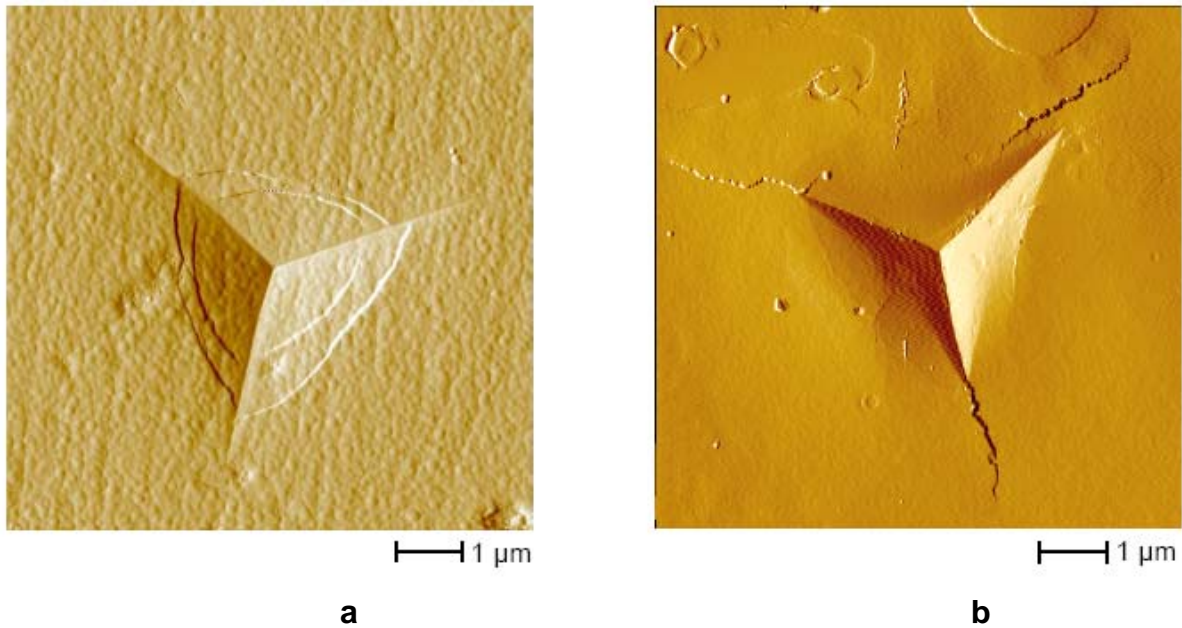


Figura 3.11: Propagação de trincas em filmes (a) Multicamadas e (b) monocamadas (Balzers, 2007).

O revestimento a base de Cromo-Alumínio possibilita o trabalho em temperaturas elevadas de aproximadamente 1.100 °C (Balzers, 2007).

A figura 3.12 apresenta comparativo com o revestimento de Nitreto de Titânio-Alumínio em ensaios de furação do Aço AISI 1045. Os ensaios foram realizados com refrigeração externa emulsional.

Observa-se no gráfico que as ferramentas revestidas com o revestimento a base de Cromo Alumínio, obteve um tempo de vida maior com um desgaste bem inferior em relação ao revestimento Nitreto de Titânio Alumínio.

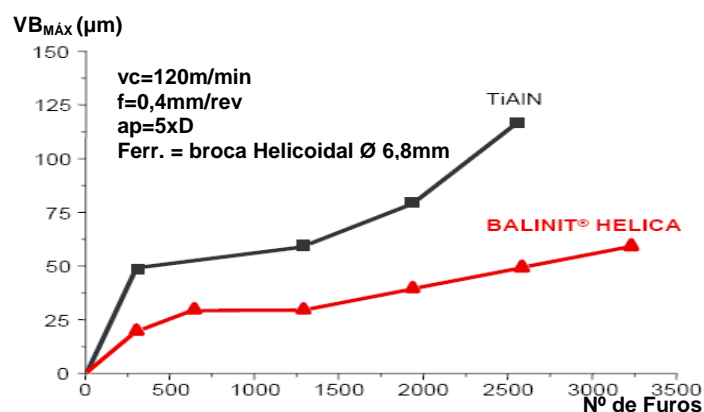


Figura 3.12: Ensaio de Furação com brocas revestidas com TiAlN e AlCr-Based (Balzers, 2007).

3.2.4 Parâmetros de corte no processo de furação

Os parâmetros de corte são componentes importantes no processo de furação pois são variáveis que originam as condições reais do processo de furação. Além disso, permitem uma melhor compreensão dos fenômenos de formação de cavaco, dos mecanismos de desgaste envolvidos e auxiliam na determinação das condições de corte (Schroeter, 1998).

O avanço (f) – é o deslocamento linear da ferramenta, podendo ser utilizado em mm por revolução ou até mesmo, em mm/min numa direção axial, ou seja, coincidente com o eixo do furo (Schroeter, 1998).

Com o aumento do avanço pode ocorrer com a quebra da ferramenta e, conseqüentemente. Altos avanços aliado a altas taxas de velocidade de corte podem ser prejudiciais à broca, caso esta não possua canais com espaços para o escoamento do cavaco. Já para avanços considerados pequenos, provocam um desgaste precoce na ferramenta, embora sua influência seja bem menor quando comparado com a velocidade de corte (Cohen, 2000).

A velocidade de corte (vc) – é a velocidade nominal no ponto de referência do gume cortante de acordo com a direção e o sentido de corte. A velocidade de corte está relacionada diretamente com o diâmetro do furo e com a rotação da ferramenta e mantém uma dependência direta com a vida da ferramenta. Em velocidades de corte elevadas, o atrito faz com que o gume ultrapasse a temperatura admitida pelo material da ferramenta, ocasionando uma perda da capacidade de corte (Bork, 1995).

3.2.5 Forças no processo de furação

As forças presentes nos processos de usinagem são de grande importância, pois fornecem informações para avaliação e determinação de excelentes condições de corte. Permite também o entendimento dos fenômenos na região de corte. Além disso, podemos compreender os fenômenos de formação de cavaco e dos

mecanismos de desgaste envolvidos que nos auxiliam na determinação das condições de corte (Bork, 1995).

A força de usinagem (F) que age entre os gumes principais durante o processo de furação pode ser decomposta em três forças atuantes: força de corte (F_c), força passiva (F_p) e força de avanço (F_f), conforme pode ser visualizado na figura 3.13.

- A força de avanço (F_f) é a resultante da soma das parcelas das reações ao avanço do gume de corte e do gume transversal. Como o gume transversal atua no sentido de extrudar material para os gumes principais, a parcela da respectiva força de avanço pode ser igual ou até mesmo maior que a força de avanço dos gumes principais de corte. É importante conhecê-la para se ter certeza que o eixo da máquina é capaz de suportar a operação (Stemmer, 2002).

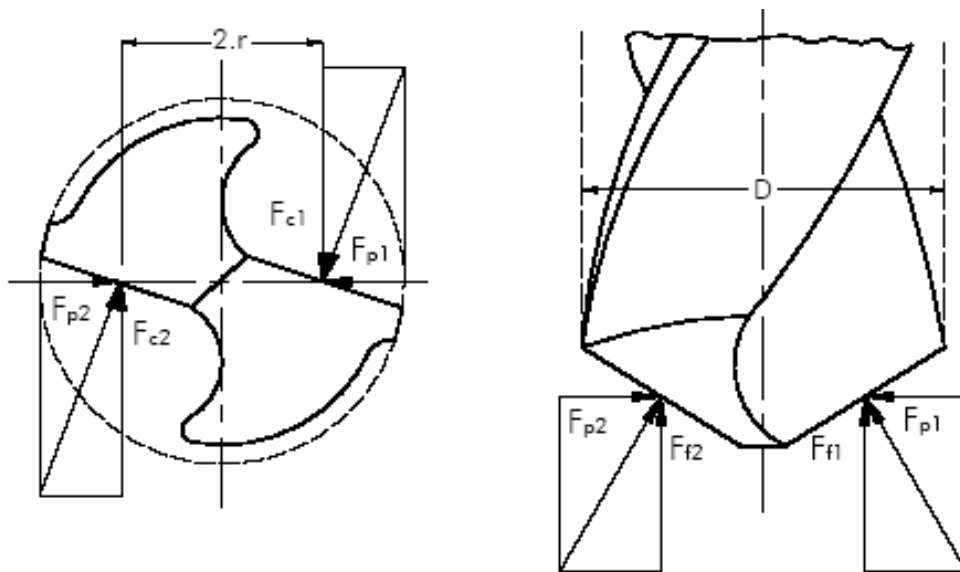


Figura 3.13: Forças atuantes no processo de Furação (Konig, 1997).

3.3 Desgaste de Ferramentas

3.3.1 Mecanismos de Desgaste

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça trabalhada, a ferramenta de corte sempre sofrerá desgaste (Machado, Silva, 1999). O desgaste pode ser definido como a perda gradual de material pela ação mútua entre o cavaco e a ferramenta e entre a peça e a ferramenta, decorrente das solicitações mecânicas, térmicas e químicas (Machado, Silva, 1999).

A falha de uma ferramenta de corte pode ocorrer de várias formas distintas, a seguir será relatado algumas das características dos tipos de desgaste que as ferramentas podem sofrer:

a) Abrasão – O desgaste frontal na superfície de folga que atrita diretamente a peça, e o desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta que atrita com o cavaco, podem ser gerados por abrasão, sendo causados pelo atrito de partículas duras do material da peça, formadas por carbonetos e óxidos, em especial o Al_2O_3 , sílicas e alguns silicatos, e pela temperatura gerada no corte que diminui a dureza da ferramenta (Diniz, 2003).

b) Aderência – Quando duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, é formado um extrato metálico que provoca aderência. A resistência deste 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 do outro. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte e no desgaste de entalhe (Cohen, 2000). Esta é a principal falha na usinagem de materiais macios como alumínio, cobre, aços moles, aços austeníticos e aço inoxidável.

c) Difusão – A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos do material da ferramenta ao material usinado e vice-versa. Depende da temperatura, da duração do contato e da afinidade físico-química dos dois metais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário), fazendo com que os

átomos movam-se livremente através da interface. Na usinagem, o espaço relativo entre a ferramenta com a peça, e a ferramenta com cavaco, são altas e o tempo de contato pequeno, isto contribui para um desgaste por difusão mínimo. Más, existe uma zona de aderência instável que se renova periodicamente, garantindo o desgaste por difusão, principalmente entre a ferramenta e o cavaco (Machado e Silva, 1999).

d) Oxidação – Altas temperaturas e a presença de ar ocasionam oxidação para muitos materiais, embora os óxidos formados sejam, na maioria das vezes, diferentes. Constituintes de ferramenta como tungstênio e cobalto (metal-duro), quando em contato com o ambiente a elevada temperatura, formam um filme poroso que é mais facilmente arrancado da superfície pelo cavaco, ocasionando um desgaste mais agressivo (Diniz, 2003).

e) Fadiga superficial – Este mecanismo normalmente ocorre em função de solicitações térmicas e mecânicas, presentes nos processos de corte intermitente do material. Assim, as variações de temperatura que ocorre na aresta da ferramenta, aliada com a aplicação de carga e descarga dos esforços de usinagem, propiciam o surgimento de micro trincas na aresta da ferramenta. Estas micro trincas provocam o surgimento de deformações plásticas, fissuras no flanco principal e na face de saída da ferramenta (Diniz, 2003).

f) Gume Postiço - Este tipo de desgaste ocorre em situações de carga elevadas e temperatura moderada. É típico nas operações com baixas velocidades de corte e baixo avanço de usinagem.

Os mecanismos de desgastes possuem um comportamento de acordo com a condição de usinagem empregada. O mecanismo de abrasão ocorre em toda a faixa de temperatura à qual é submetida uma ferramenta de corte. A adesão se limita a velocidades de corte baixas, ao passo que mecanismos de difusão e oxidação só ocorrem de forma acentuada para velocidades de corte elevadas, conforme mostra a figura 3.14.

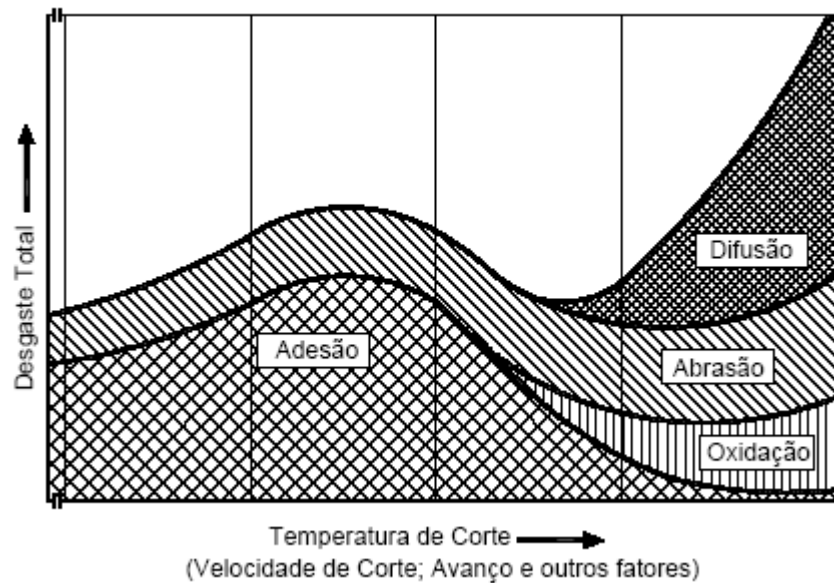


Figura 3.14: Mecanismos de desgaste causados em virtude da velocidade de Corte e avanço (Konig, 1997).

3.3.2 Formas de desgaste em Brocas

No processo de furação, os desgastes geralmente analisados são o de flanco e o de cratera. Este último ocorrendo na face da broca, sendo critério fundamental para definir o fim de vida de uma ferramenta. Porém, pode ocorrer desgaste em outras partes da broca como no gume transversal, na quina e nas guias laterais, conforme pode ser visualizado na figura 3.15.

É muito comum, o desgaste de flanco ser acentuado na ponta de corte, devido ao uso de maior V_c . Quando o desgaste na aresta transversal é maior que o das arestas principais de corte, existe então, uma indicação do uso de um avanço acima do desejado (Ferraresi, 1997).

Durante este estudo iremos analisar de forma mais específica o desgaste de Flanco, que será primordial para o desenvolvimento do trabalho.

a) Desgaste de Flanco (VB) – este desgaste ocorre nas quinas da broca. Neste desgaste, os mecanismos presentes são as solicitações térmicas em função de altas velocidades de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor provocado

pelo atrito dos cavacos com a superfície de saída, assim como o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo.

A Figura 3.15 mostra em detalhe o desgaste médio VB_{med} e o máximo VB_{max} nos flancos de uma broca. A largura do desgaste da broca resulta através da média entre esses dois gumes. Para as medições do Desgaste de Flanco, devemos tomar como referência, o gume da broca enquanto nova. Para esta medição, a marca de desgaste deve ser medida através desta referência.

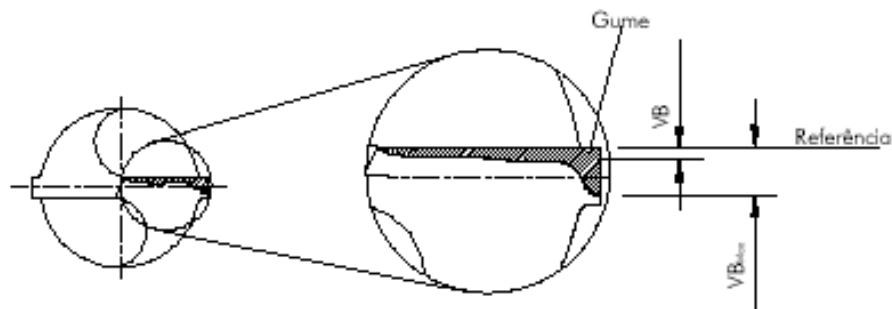


Figura 3.15: Representação da medição do desgaste de flanco de uma broca (Bork, 1995).

b) Desgaste das Guias (H) – é o desgaste que ocorre nas guias das brocas. Deve ser medido o desgaste na guia a partir da quina da broca, conforme na representação abaixo.

c) Desgaste de Cratera (K) – o desgaste de cratera é a medida entre a posição original do gume e o ponto mais distante da cratera onde o desgaste ocorre.

d) Lascamento dos Gumes – uma das regiões que mais sofrem durante o processo de furação é a região do gume transversal, pois é alí que ocorre avarias a partir do primeiro contato da broca com o material a ser usinado. Em virtude de solicitações mecânicas e da possibilidade da velocidade de corte ser nula nesta região da broca, há uma tendência de que ocorra um desgaste progressivo pelo esmagamento do material. Assim, esses esforços contribuem para o aparecimento de pequenos lascamentos no gume da broca e conseqüente destruição do gume transversal, podendo provocar uma falha da broca por colapso total (Bork, 1995).

Na figura 3.16, podemos observar a localização dos desgastes comentados acima.

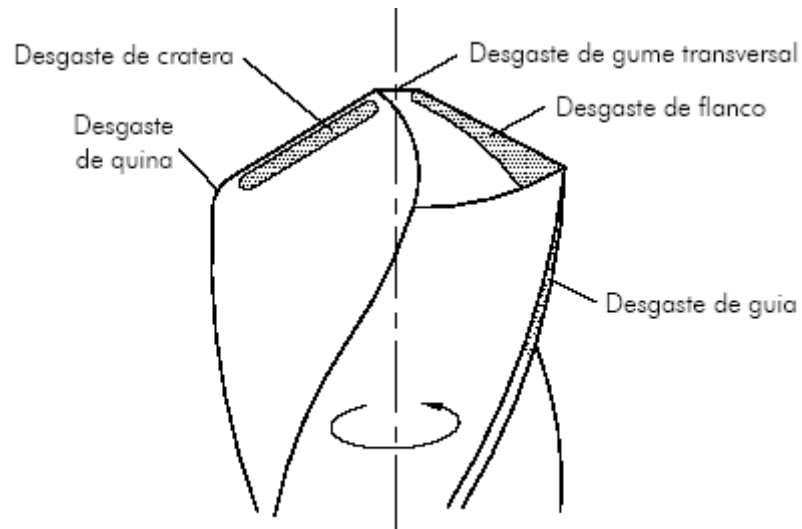


Figura 3.16: Representação do desgaste de uma broca (Novaski, 1996).

3.4 Usinabilidade

De acordo com Ferraresi (1997) a usinabilidade é uma grandeza tecnológica que expressa um conjunto de propriedades de usinagem do material por meio de um índice ou percentual, em relação a outro material tomado como padrão.

A usinabilidade de um material pode ser caracterizada também como o nível de dificuldade oferecido pelo material quando aplicado uma ferramenta de corte, é uma distinção que representa um conjunto de propriedades de usinagem podendo ser caracterizado em percentual (König, 1997).

Stemmer (2001) explica que a usinabilidade do material é avaliada através da análise da vida da ferramenta de corte, da força da usinagem e potência consumida, forma dos cavacos e qualidade superficial da peça.

3.4.1 Mecanismos de Formação de Cavacos

Para uma explicação científica do desgaste das ferramentas e as forças de cortes, se faz necessário conhecer o processo de formação de cavacos (Machado, 2004).

De acordo com Ferraresi (1997), a formação de cavacos pode ocorrer das seguintes maneiras:

a) Ao ocorrer à penetração da ferramenta ao material, certa quantidade de material (ainda em junção com a peça) é recalcado contra a superfície de saída da ferramenta, ou seja, início de deformação elástica e plástica do material.

b) Esta deformação plástica aumenta de forma significativa até que as tensões de cisalhamento se tornem grande o suficiente para iniciar o processo de deslizamento (sem ocorrer ainda o desligamento) entre a quantidade de material recalcada e a peça.

c) Dando procedência a este processo, ao persistir a penetração da ferramenta sobre o material, ocorrerá a ruptura do cavaco, podendo este ser parcial ou completo na região do cisalhamento de acordo com as características do material e das condições de usinagem.

Quando usinamos materiais relativamente dúcteis, podemos obter cavacos conhecidos como cavacos longos. Ao trabalhar com materiais frágeis, iremos obter cavacos curtos conhecidos como cavaco de ruptura (Bork, 1995).

d) Prosseguindo ao movimento de relação entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformado e cisalhado (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Quando ocorre este processo, imediatamente uma nova quantidade de material passa a ser removida e cisalhada e assim irá escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta.

Assim observar-se que os acontecimentos para a formação de cavaco, em um processo normal de usinagem se apresentam constante, alternando-se em fase de recalque do material e uma fase de escorregamento.

3.4.2 Tipos e Formas de Cavacos

Durante a usinagem uma nova superfície é gerada na peça, ou pela a formação de um cavaco contínuo quando se usina materiais dúcteis, ou pela formação de certa quantidade de cavacos curtos quando se usina materiais frágeis. Cavacos indesejados são capazes de dificultar ainda mais o processo de usinagem. No processo de furação, pode ocorrer obstrução dos canais da broca por onde devem escoar os cavacos, causando danos para a broca, como acúmulo de calor, dificuldades da passagem de fluido, podendo acarretar na quebra da ferramenta (Machado, 2004).

Com relação ao tipo de cavaco, no processo de furação podemos encontrar três tipos: cavaco contínuo, cisalhado e o cavaco arrancado conhecido como cavaco de ruptura. A seguir será comentado as características que cada um representa quando gerado pelo processo de furação.

a) Tipos de Cavacos

- Cavaco Contínuo – São formados pela usinagem de materiais dúcteis. O metal escoar sobre a ferramenta permanecendo em uma forma homogênea sem sofrer fragmentação. Baixos parâmetros de corte, como avanços e velocidade de corte, contribuem para a formação deste cavaco indesejado, pois podem prejudicar o acabamento superficial da peça e oferece risco ao operador (Machado, 2004).

- Cavaco Cisalhado – O cavaco sofre um deslizamento sobre a superfície da ferramenta, gerando então uma fissura do material sobre o plano de cisalhamento;. Esta se propaga até que ocorra uma ruptura total ou parcial do cavaco. Este tipo de cavaco se forma em função de grandes avanços e sob velocidades de corte média (Ferraresi, 1997).

- Cavaco Arrancado – Apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogêneas como Ferro fundido, Latão, Bronze, etc. A usinagem de materiais intermediárias à frágeis sob baixas velocidades de corte e elevados avanços, pode proporcionar a formação de cavacos de ruptura. Quando usinamos matérias intermediários ao frágeis podemos obter cavacos de ruptura, utilizando de velocidades de corte baixa e elevados avanços de corte, (Bork, 1995).

b) Formas de Cavacos

O cavaco pode apresentar diversas formas. Em relação aos processos de furação, o cavaco pode se encontrar da seguinte forma:

- Cavaco em fita – este tipo de cavaco pode provocar acidentes, pois ocupa grande espaço e é de difícil transporte.
- Cavaco Helicoidal – é considerada a forma de cavaco mais adequada para o processo de usinagem.
- Cavaco em Lascas ou pedaços – é preferido somente quando houver pouco espaço disponível no ambiente de trabalho (máquina/equipamento) ou quando o cavaco pode ser removido com fluido. Este tipo de cavaco é desejado em operações de furação profunda (Ferrores, 1997).

c) Formação de cavaco em ferros Fundidos

Durante a usinagem do ferro fundido, o cavaco é diretamente influenciado pela forma da grafita, pois apresentam baixa resistência mecânica e descontinuidades na matriz, facilitando o processo de remoção do material (Reuter et al, 1999).

Na usinagem de ferros fundidos cinzentos, a ferramenta comprime o material sobre o flanco. Como a grafita se apresenta na forma de lamelas, ocorre uma concentração de tensão nas extremidades, e por serem interconectadas, inicia-se então um plano de propagação de trincas sobre o gume Figura 3.17 (a). Com o deslocamento da ferramenta, o material é removido completamente com um menor esforço de corte Figura 3.17 (b). Em algumas situações, a ferramenta de corte não está sempre em contato com o material, pois certa quantidade de material é removida à frente da ferramenta, gerando crateras Figura 317 (c). O arrancamento de material contribui para a liberação da grafita que age como lubrificante e piora a rugosidade da superfície usinada Figura 3.17 (d), (Cohen, 2000).

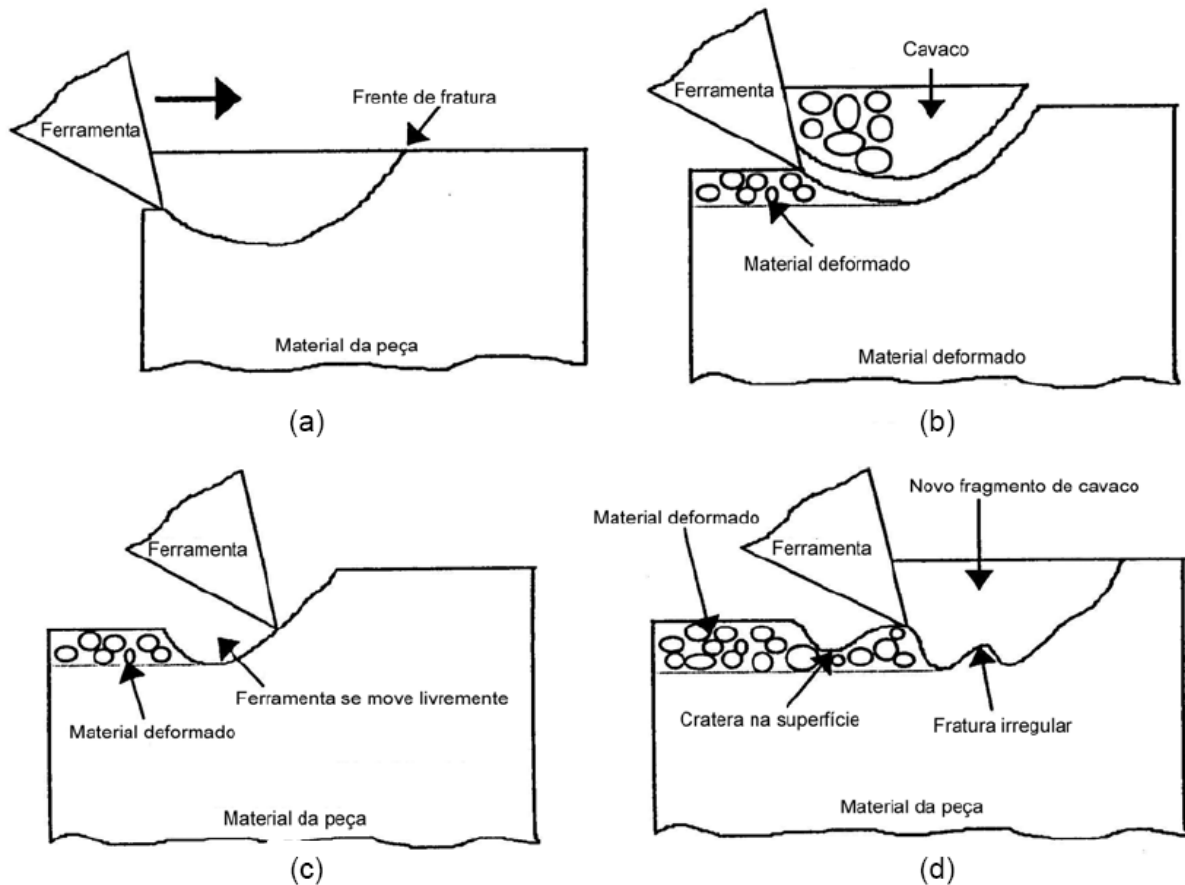


Figura 3.17: Formação de Cavacos em Ferros Fundidos (Cohem, 2000).

A formação do cavaco na usinagem do ferro fundido vermicular é apresentada através das características frágeis do ferro fundido cinzento e dúctil do ferro fundido nodular. Na usinagem do Vermicular ocorre trincas no plano da grafita que possui uma resistência menor aos esforços de corte. A diferença é que, como as arestas das lamelas das grafitas são arredondadas, o corte requer uma maior força, já que o formato do cavaco é muito mais parecido com a ocorrida durante a usinagem do nodular (Xavier, 2003).

3.4.3 Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular

A partir do surgimento do ferro fundido Vermicular, sua aplicação em diversos setores da indústria automobilística vem se tornando uma crescente, por combinar

características mecânicas e elásticas situadas entre o ferro fundido cinzento e o nodular, o que é ideal para a construção de blocos de motores a diesel.

No entanto, o que impede que a utilização dos blocos de CGI seja ampliada é sua maior dificuldade em ser usinado por determinados processos de corte quando comparado com o ferro fundido cinzento, material conhecido e amplamente usado na fabricação de blocos de motores a diesel (Reuter, 1999).

Dawson (2001) comenta que diversos fatores metalúrgicos podem influenciar na usinabilidade do vermicular; estes são caracterizados principalmente pela forma da grafita, os efeitos dos elementos de liga, quantidade de perlita na matriz, entre outros.

A seguir será caracterizado as principais variáveis envolvidas na usinabilidade do ferro fundido vermicular quanto a:

- Efeito da forma da grafita;
- Efeito do tipo e proporção de perlita;
- Efeito de elementos químicos (Mn, Si, S, Ti, Cr);
- Efeito das inclusões.

- Efeito da forma da grafita

Em ferros fundidos, a forma, o tamanho e a quantidade da grafita são normalmente mais significativos nas propriedades mecânicas do que a sua composição química (Reuter et al., 2000).

No vermicular, a distribuição da grafita não permite a clivagem e nem a propagação de trincas, conferindo ao material maior resistência mecânica e maior tenacidade (Dawson, 2001).

A variação da forma da grafita de lamelar para vermicular faz com que se altere o modo de ruptura do cavaco, passando a ser mais dúctil. O comportamento frágil do ferro fundido cinzento faz com que o contato do material com o flanco e a face da ferramenta seja intermitente, existindo portanto, intervalos de tempo em que não existe contato abrasivo sobre a ferramenta. Já no vermicular, a tendência é de se ter um maior contato entre o cavaco e a superfície da ferramenta. Este fato aliado

ao maior coeficiente de atrito e a baixa condutividade térmica tendem a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte (Dawson et al., 1999).

A grafita, por apresentar dureza relativamente baixa, quando comparada com outros constituintes da matriz, facilita a quebra do cavaco durante a usinagem, atuando diretamente como um agente lubrificante, além de reduzir o atrito entre a peça e a ferramenta e conseqüentemente, aumentar o tempo de vida da ferramenta de corte (Reuter et al., 2000).

Dawson (2001) estudou a usinabilidade de várias ligas de ferro fundido vermicular em relação aos processos de torneamento, sobre diversas condições de corte e utilizando-se de insertos de PCBN. Foi verificado a redução do tempo de vida da ferramenta na usinagem de ligas com crescentes quantidades de grafita vermicular e o aumento do tempo de vida da ferramenta na usinagem de ligas com quantidades crescentes da grafita nodular, quando comparada com grafita do tipo lamelar.

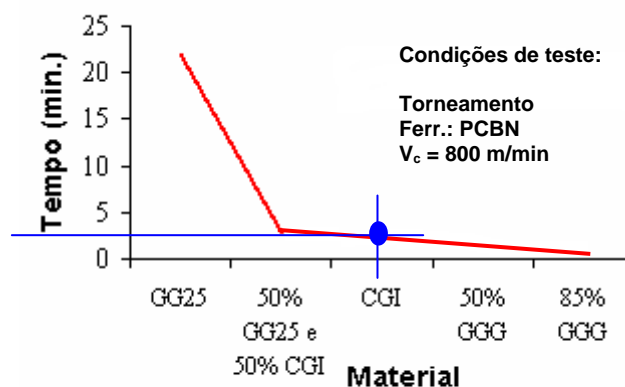


Figura 3.18: Influência da forma da grafita na vida da ferramenta no torneamento com ferramenta de PCBN ($V_c = 800 \text{ m/min.}$) (Dawson, et al 2001).

A forma da grafita está intimamente ligada a usinabilidade do ferro fundido. Uma explicação possível para o aumento do tempo de vida da ferramenta é que lamelas de grafita tendem a deslizar sob cargas, o que não ocorre com as grafitas na nodulares e vermiculares. Os nódulos de grafita na matriz da liga não podem ser cortados durante a usinagem, resultando na sua deformação e desprendimento da matriz. Porém, a grafita na forma vermicular não se desprende em função de apresentarem uma forte ligação com a matriz em função de sua característica

morfológica. Isto faz com que se altere o mecanismo de formação do cavaco que depende da forma, do tamanho e da sua ligação com a estrutura da matriz (Dawson et al, 2001).

- Influência da perlita

Durante o processo de solidificação do material, o mesmo passa por uma escala de temperatura na qual se localiza a austenita. Abaixo de 725 °C, o material sofre uma transformação passando para ferrita ou perlita. Caso o processo ocorra sobre uma velocidade de resfriamento relativamente baixa e se as condições químicas são favoráveis, os átomos de carbono localizados na austenita tendem a migrar para formar partículas de grafita através do processo de difusão. Entretanto, se os átomos não conseguirem sair da matriz, ocorrerá à formação de perlita. A perlita é constituída por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita (Fe_3C). Estas lamelas de Fe_3C reforçam a matriz, tornando-a mais dura e resistente (Dawson et al., 1999; Mocellin, 2002).

O efeito da perlita na usinabilidade deve ser considerado de duas maneiras distintas: a quantidade de Cementita (Fe_3C) nos grãos de perlita e a proporção de grãos de perlita versus ferrita.

- I) Tipo de perlita

Pesquisas realizadas estão preocupadas em analisar a relação do teor de Fe_3C na perlita com o tempo de vida da ferramenta, pois a perlita no diagrama ferro-carbono é composta por uma fração em volume de 88% de ferrita e 12% de Fe_3C (cementita). Na prática, uma série de fatores contribui para este equilíbrio termodinâmico da matriz do ferro: a adição de elementos inoculantes que promovem o crescimento de grafita; elementos perlitizantes que atuam como barreiras de difusão para o carbono se depositar na forma de grafita, formando a perlita; e também, quanto ao comportamento da solidificação e a velocidade de resfriamento. Estes fatores tornam aceitável a consideração da proporção de Fe_3C na faixa entre de 8-15% na composição da perlita (Dawson, 1999).

Caso os átomos de carbono não se difundam para a formação dos aglomerados de grafita, haverá então a formação de perlita em um estado saturado de ferrita. Persistindo um excesso de carbono, ocorre a formação de cementita, que

por sua vez apresenta características de alta dureza e de baixa usinabilidade (Bates, 1996).

Estudos realizados por Bates (1996) apresentam a relação entre a variação da porcentagem da Fe_3C na perlita com a usinabilidade de ferros fundidos nodulares e cinzentos. Os resultados obtidos em ensaios de furação, torneamento e fresamento utilizando ferramentas de CBN e metal-duro mostram que o tempo de vida da ferramenta decresce com o aumento da porcentagem de Fe_3C na perlita, como é apresentado na figura 3.19.

É possível observar que, quanto maior o conteúdo da perlita na estrutura da matriz, maior a dureza, conferindo assim, maior resistência à tração ao material (Bates, 1996).

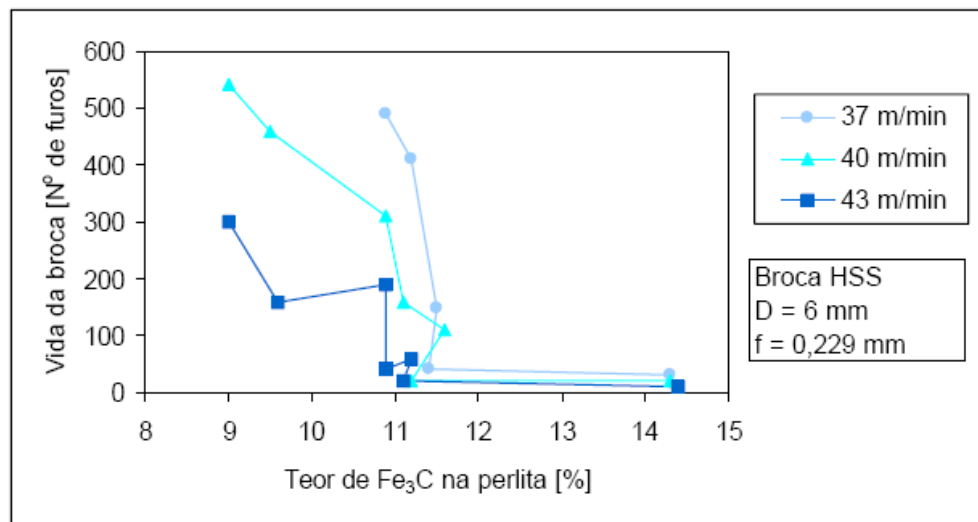


Figura 3.19: Redução do tempo de vida da ferramenta com aumento de quantidade de cementita (Fe_3C) na fase de perlita Bates, (1996)

Mocellin (2002) realizou ensaios avaliando os teores de elementos perlizantes como também a influência do tempo de desmoldagem em materiais fundidos. Nestes estudos foram realizados experimentos utilizando-se de duas ligas com a mesma composição química, alterando-se o tempo de desmoldagem entre uma liga e a outra, passando de 20 minutos para 2 horas. A liga com menor tempo de desmoldagem é referenciada como Vermicular 4 e apresentou estrutura perlítica com maior proporção de Fe_3C quando comparado com a outra liga conhecida aqui como Vermicular 5, fabricada com um tempo de desmoldagem de 2 horas. Esta apresentou maior dureza em relação ao Vermicular 4. A figura 3.20, apresenta a

usinabilidade do ferro fundido Vermicular 4 e 5. Observa-se que o material com maior tempo de desmoldagem (Vermicular 5) conduz ao considerável aumento do tempo de vida da ferramenta.

Mocellin (2002) relata que em função do aumento do tempo de resfriamento do fundido, ocorre a difusão do carbono para as regiões da grafita. A austenita permanece com menores quantidades de carbono gerando então, lamelas com menores espessuras de Fe_3C .

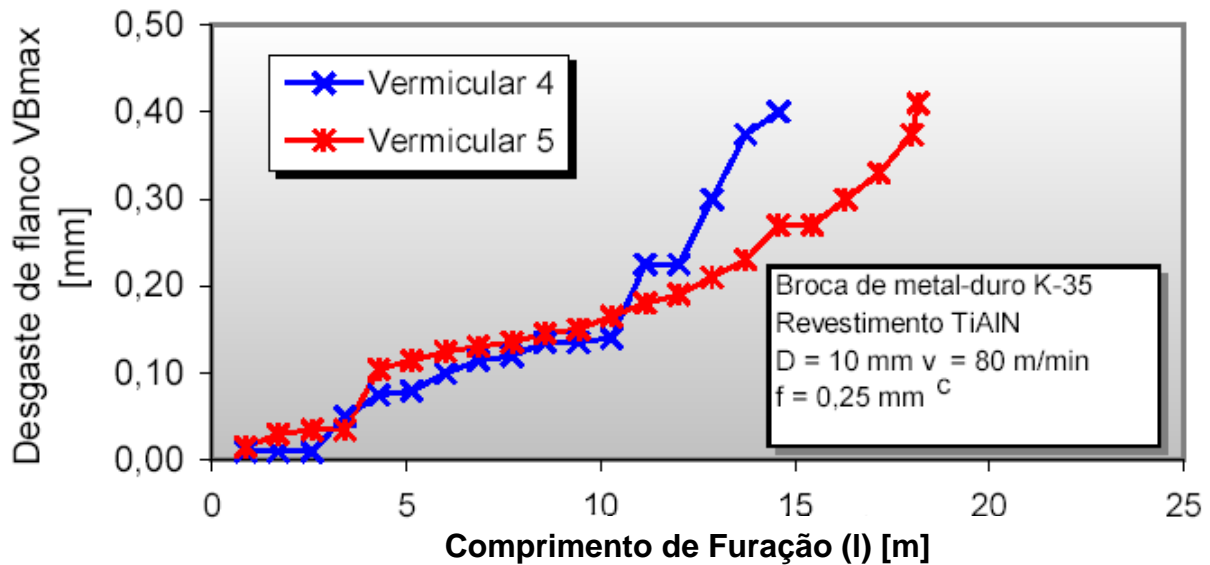


Figura 3.20: Usinabilidade do ferro fundido vermicular variando os tempos de desmoldagem (Mocellin, 2002).

II) Proporção perlita/ferrita

A resistência mecânica de um material é proporcional à razão perlita/ferrita, mantendo-se as demais variáveis constantes. Reuter et. al (2000) mostrou que quanto maior a presença de perlita na estrutura da matriz, maior será a dureza e a resistência à tração do material. Um acréscimo de 15% para 95% de perlita no Vermicular mantendo-se inalteradas as demais variáveis, ocasiona o aumento da tensão do limite de escoamento de 300 MPa até valores de 480MPa, refletindo diretamente na usinabilidade do material. O aumento da proporção entre a razão da perlita/ferrita, além da quantidade de Fe_3C na perlita, impacta diretamente na redução do tempo de vida da ferramenta.

Dawson (2004) realizou uma análise da influência da proporção de perlita na matriz, onde utilizou duas ligas de vermicular com características distintas. A

primeira apresentava uma estrutura 100% perlítica, assegurando que o material teria a mesma quantidade de perlita contida no ferro fundido cinzento padrão, e a outra apresentava uma estrutura 70% perlítica, garantindo a mesma dureza do ferro fundido cinzento padrão. Utilizou-se dois tipos de ferramentas para a realização dos ensaios em operações de torneamento e fresamento, sendo eles, metal duro e CBN. A velocidade de corte utilizada no experimento foi de 150 e 200 m/min para as ferramentas de metal duro e de 400 e 800 m/min para o CBN. Os resultados dos ensaios são apresentados na figura 3.21.

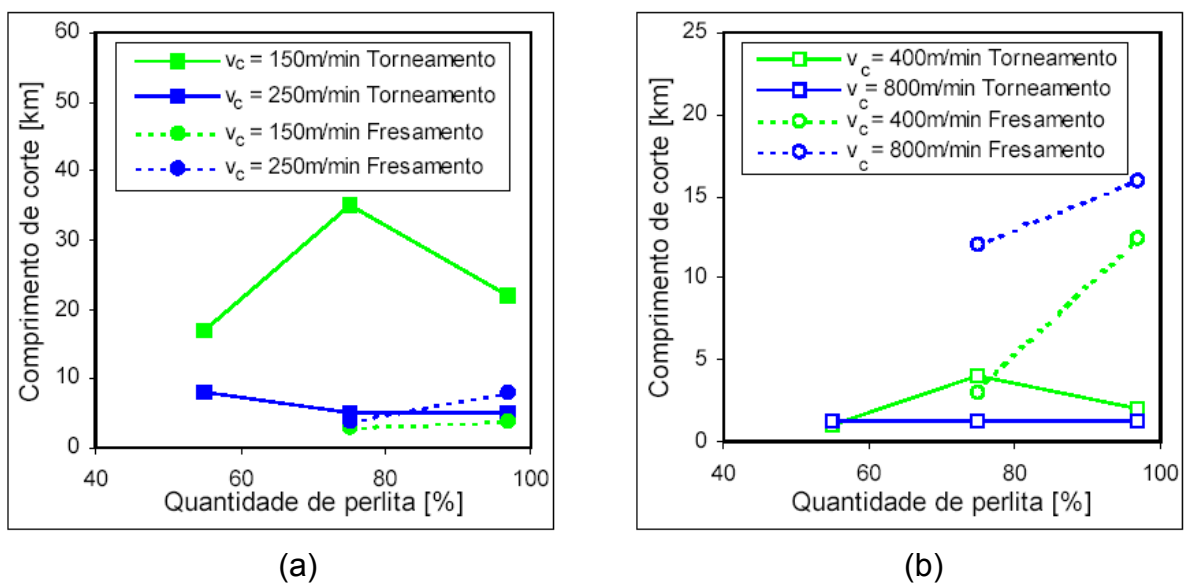


Figura 3.21: Tempo de vida da ferramenta em função do teor de perlita/ferrita na usinagem do Vermicular (a) Metal duro, (b) CBN (Dawson et al, 1999).

O efeito do teor de perlita na matriz do ferro fundido não é o mesmo para os processos de torneamento e fresamento (Dawson et al, 1999). Os resultados mostram que o rendimento do processo de fresamento utilizando ferramentas de CBN melhora com o aumento da quantidade de perlita, favorecendo também maior velocidade de corte. No caso do processo de torneamento, o tempo de vida da ferramenta diminui, devido os elementos perlitizantes favorecerem uma interação forte com a matriz de ferro.

Ferros fundidos com uma quantidade maior de perlita favorecem, de uma forma geral, um maior tempo de vida das ferramentas, obtendo-se melhores

resultados utilizando-se ferramentas a base de CBN quando comparadas ao metal duro.

Em ensaios de furação realizado por Dawson (2001), o ferro fundido Vermicular com matriz 70% perlítica apresentou uma diminuição de 40% no tempo de vida da ferramenta comparados com o ferro fundido cinzento, material este de grande presença em blocos de motor.

A tabela 3.3 apresenta as propriedades mecânicas obtidas para ferros fundidos com matrizes 70 e 100%. Pode-se observar um leve aumento das propriedades da liga com quantidades maiores de perlita.

Tabela 3.3: Propriedades Físicas e Mecânicas do Vermicular com nodularidade de 10% sob temperatura de 25°C (Guessser, Schoreder e Dawson, 2001).

Propriedade	70% perlítico	100% perlítico
Resistência à Tração (MPa)	420	450
Resistência ao Escoamento (MPa)	315	370
Módulo de Elasticidade (GPa)	145	145
Condutividade Térmica (W/m ^o C)	37	36
Dureza Brinell (HB)	190 - 225	207 - 255

- Efeito de elementos Químicos

Dawson (2001) observou uma tendência ferritizante, ao comparar o ferro fundido Vermicular com o ferro fundido cinzento, ocasionada pela pequena quantidade de oxigênio e enxofre presente que facilita o acesso de átomos de carbono sobre as partículas de grafita em formação. Verificou desta forma, que a usinabilidade do ferro fundido vermicular está diretamente relacionado aos elementos de liga presentes como enxofre, silício, titânio e o cromo.

a) Enxofre (S)

O enxofre juntamente com a forma da grafita, é considerado como a mais expressiva diferença do ferro fundido vermicular com relação ao ferro fundido cinzento (Dawson, et al 2001).

O enxofre em presença com o manganês forma o sulfeto de manganês (MnS). O encontro deste elemento em uma liga de ferro fundido proporciona ao material uma melhor usinabilidade. Em estudos realizado por Reuter (2000) observou-se que a presença do MnS no ferro fundido cinzento melhora sua usinabilidade facilitando a quebra dos cavacos. O MnS atua como lubrificante que adere sobre a face da ferramenta, formando uma camada protetora contra oxidação e difusão.

Nos vermiculares não se observa à formação de tal camada. Na pesquisa realizada por Dawson (1999), ficou comprovado que não se observa à formação da camada lubrificante em razão do baixo teor de enxofre residual presente ser dez vezes menor do que o apresentado no ferro fundido cinzento.

Outra situação que se deve levar em consideração é que o enxofre residual no vermicular combina-se preferencialmente com o magnésio, elemento este nodularizante. Desta forma, não há ficando quantidade suficiente de enxofre para se combinar com o manganês e formar a camada de MnS sobre a ferramenta, (Reuter et al., 2000).

b) Silício (Si)

O silício é um elemento formador de ferrita presente na estrutura do ferro fundido vermicular entre 2,0 a 2,4%. Tendem a melhorar a usinabilidade do material e na presença de elementos perlitizantes, permite atingir a proporção de perlita desejada (Dawson, 1999).

Caso os teores dos elementos formadores de perlita sejam reduzidos e o teor de silício aumentado para 3,0%, o CGI formado terá uma matriz totalmente ferrítica. Entretanto, a elevada concentração de silício tende a endurecer a ferrita por solução-sólida, fazendo com que um material ferrítico atinja valores de dureza e resistência do ferro fundido cinzento perlítico ou até mesmo do CGI perlítico. Dawson (1999), durante ensaios de torneamento avaliou os efeitos da usinabilidade do material. Foram elaborados corpos de prova de CGI com 3,0% e 4,0% de silício, sendo comparados com um CGI padrão, estabilizado com cobre e estanho. Na figura 3.22 pode-se observar que a usinagem do vermicular com teor de 3,0% de

silício proporciona um maior tempo de vida da ferramenta quando comparada a usinagem do vermicular com teor de 4,0% de silício.

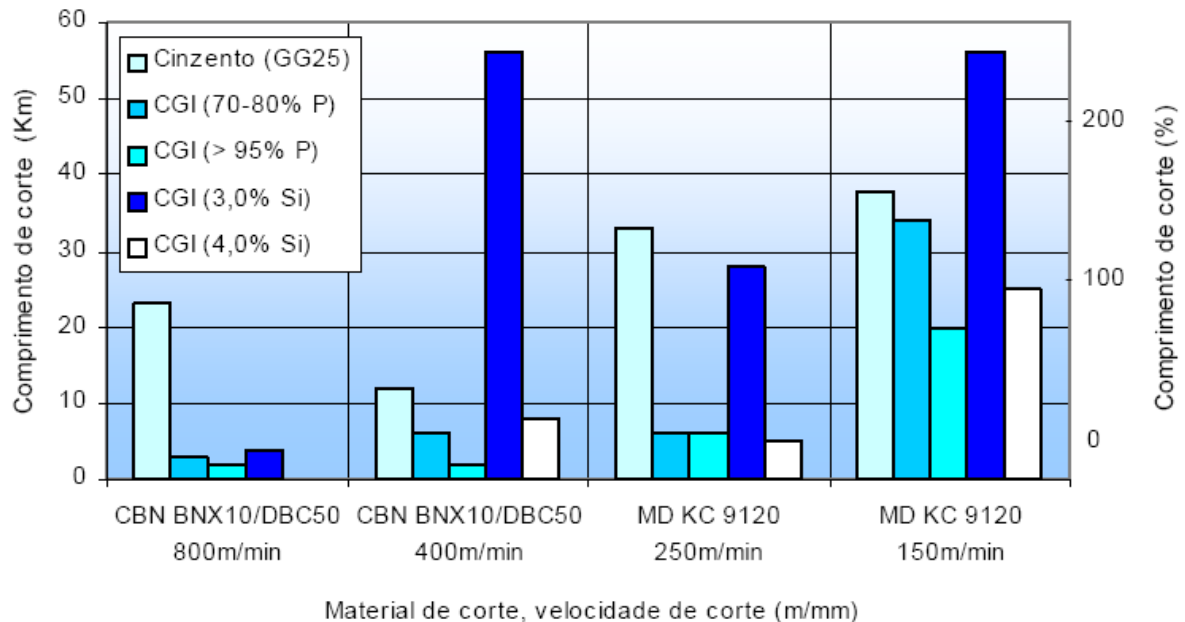


Figura 3.22: Efeito do teor de silício do vermicular no tempo de vida da ferramenta de torneamento (Dawson et al., 1999).

Os resultados obtidos mostram que a usinabilidade do vermicular é melhorada com a adição de 3,0% de silício, porém a resistência mecânica do material é relativamente baixa (360 MPa). Na liga com 4,0% de silício, a resistência mecânica apresenta resultado satisfatório, alcançando valores na ordem de 500 MPa. Como desvantagem, apresentou uma redução da sua usinabilidade e uma perda de aproximadamente 15% na sua condutividade térmica (Dawson, 1999).

c) Titânio (Ti)

O titânio pode estar presente na liga em teores de 0,005% a 0,02%. Esta quantidade pode gerar inclusões de dureza maior, quando comparado com outros materiais de corte como o carboneto de tungstênio. O Titânio reage com o carbono e com o nitrogênio presentes na liga para formar inclusões de carbonitreto de titânio, resultando em aglomerados com geometria cúbica que aumentam de forma considerável o desgaste da ferramenta por abrasão (Dawson, 1999).

Oplander (2003), explica que enquanto a adição de titânio pode ser tolerada em componentes com pequenas usinagem, o seu nível deve ser controlado na produção de peças que apresente diversos processos de usinagem, o qual impacta diretamente blocos de motores.

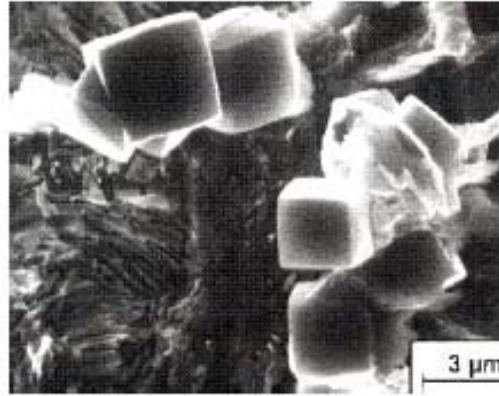


Figura 3.23: Inclusões de carbonitreto de titânio que possuem dureza maior do que o carboneto de tungstênio, aumentando consideravelmente o desgaste por abrasão (Dawson et al., 1999).

Andrade (2005) relata que de qualquer forma, a presença de tais carbonitretos piora a usinabilidade do material e numa proporção onde o teor de titânio presente no material for duplicado, a vida da ferramenta cairá pela metade.

Em pesquisas realizadas por Dawson et al. (1999) o desgaste de uma ferramenta de metal-duro diminui com o aumento do teor de titânio na liga em um processo cujas velocidades de torneamento foram de 150 e 250 m/min. A figura 3.24 apresenta a influência do titânio na liga de CGI em operações de torneamento.

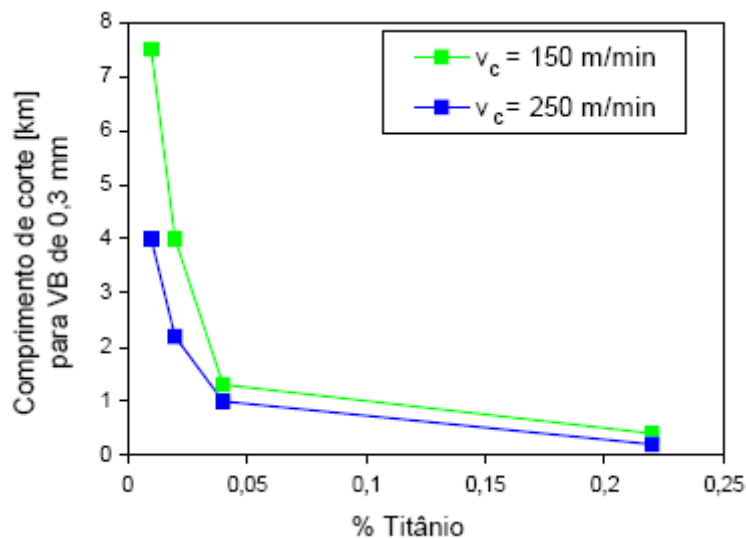


Figura 3.24: Vida da ferramenta de torneamento em função do teor de titânio no CGI (Dawson 1999).

d) Cromo(Cr)

Outro elemento que pode produzir efeitos negativos para a usinabilidade do ferro fundido vermicular é o cromo, que é adicionado à liga para aumentar a resistência à tração sob elevadas temperaturas. O cromo é um potente formador de perlita quando comparado com o manganês, provoca o aumento da quantidade de cementita e dificulta ainda mais a sua usinabilidade.

Dawson et al. (1999) recomenda que o teor de cromo esteja abaixo de 0,08%, por ser um resíduo que forma carbonetos. Desta forma, pode proporcionar o acréscimo do tempo de vida da ferramenta em torno de 40%.

- Influência das Inclusões

Metais fundidos normalmente possuem inclusões não-metálicas. Estas por sua vez, podem ser de óxidos, sulfetos ou complexos intermetálicos. As inclusões podem ser macias como MnS, ou duras como TiC.

Dawson et al. (1999), com o intuito de melhorar a usinabilidade do vermicular, buscou- solucionar o problema das inclusões no vermicular de duas formas:

a) Através da transformação das inclusões de alta dureza em inclusões de menor dureza;

b) Através da criação de inclusões que gerassem um acúmulo na superfície da ferramenta preservando-a contra mecanismos de desgaste e prolongando sua vida útil.

Em materiais dúcteis, como os aços, as inclusões de MnS se depositam sobre a ferramenta durante a usinagem à baixa velocidade. Assim, não se pode desconsiderar, como fator formador da camada de MnS, a maior quantidade destas inclusões presentes nestes materiais. Uma análise que reforça a idéia de que a abrasão tende a impedir a formação do filme protetor é que, com o aumento da velocidade de corte nos aços, ocorre uma redução na formação do filme protetor, o que fortalece a hipótese de que a abrasão impede a sua formação (Dawson et al., 1999).

4. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo faz uma descrição da metodologia experimental para o desenvolvimento e realização dos ensaios. Foi desenvolvido um diagrama esquemático, com o objetivo de constituir-se um modelo sistematizado para melhor orientar o desenvolvimento da pesquisa. Neste trabalho, busca-se analisar o desempenho dos revestimentos aplicados sobre as brocas de metal duro com canais retos, aplicadas no processo de furação do ferro fundido vermicular, CGI 450. Materiais, ferramentas, como também equipamentos e métodos utilizados serão comentados ao longo deste capítulo. Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Usinagem – LAUS da Universidade Pontifícia Católica do Paraná PUCPR.

4.1 Esquema Experimental

A figura 4.2 apresenta o fluxo do procedimento experimental definindo as variáveis pertencentes a cada etapa do trabalho, garantindo assim, coerência na realização dos ensaios, no sentido de estabelecer parâmetros ideais para o desenvolvimento da pesquisa, proporcionando o entendimento do experimento. Nesta figura observamos no primeiro bloco os parâmetros do processo, ou seja, as variáveis independentes da entrada, adiantando algumas características e parâmetros nos quais serão utilizados para a realização dos ensaios. A escolha destas variáveis foi definida com a finalidade de aproximar os ensaios realizados com as operações normais de fabricação de blocos e cabeçotes de motores.

Após a definição das variáveis de entrada, foram desenvolvidos ensaios preliminares em condições reais de pesquisa. Adotou-se o processo de furação, por ser um processos que apresenta maior dificuldade de operação Para a realização destes ensaios, estabeleceu-se uma profundidade de corte de $2x_d$, ou seja 20mm, com incremento de 10mm, utilizando-se dos parâmetros de corte adotados de 0,1mm

de avanço e velocidade de corte de 80m/min. Estes ensaios proporcionaram uma análise do comportamento dos materiais, possibilitando estabelecer uma metodologia adequada para monitoramento do processo e a análise dos esforços de corte. Estes ensaios proporcionaram também observar e analisar alguns resultados importantes para o desenvolvimento do trabalho:

- Análise do comportamento da broca com os parâmetros de usinagem, possibilitando assim, a efetivação dos parâmetros de corte;
- Definição de uma metodologia adequada para monitoramento de VB e análise dos esforços de corte ao longo do desgaste VB, observando alguns ruídos que surgiam ao longo do desgaste.
- Permitiu também a escolha da utilização de Fluido de corte, pois em ensaios realizados sem a presença do fluido, observou-se um acréscimo considerável na força de avanço e momento torçor.

O processo foi estabelecido com o objetivo de garantir coerência na realização dos ensaios, identificando os parâmetros envolvidos no procedimento a fim de proporcionar a compreensão sobre a usinagem do material.

Observou-se que na realização dos pré-ensaios, a ferramenta revestida com TIN+TIAlN apresentou um excelente rendimento. A ferramenta possibilitou usinar um comprimento de 5,8m atingindo um desgaste abrasivo nas guias da broca.

Os ensaios nos materiais foram realizados em um Centro de Usinagem vertical a CNC, da marca **CINCINNATI MILACRON** modelo **Arrow 500**. A máquina possui uma árvore com rotação máxima de 6000 rpm. A máquina como também, o sistema de fixação das placas e ferramentas, pode ser vista na figura 4.1.



Figura 4.1: Centro de Usinagem e Sistema de Fixação da ferramenta e dos corpos de prova para ensaios de vida e Força.

Por fim, transcorreu-se a etapa de análise e discussão das variáveis pertinentes e dependentes do processo, ou seja, os resultados de rendimento, nos quais serão apresentados nos próximos capítulos.

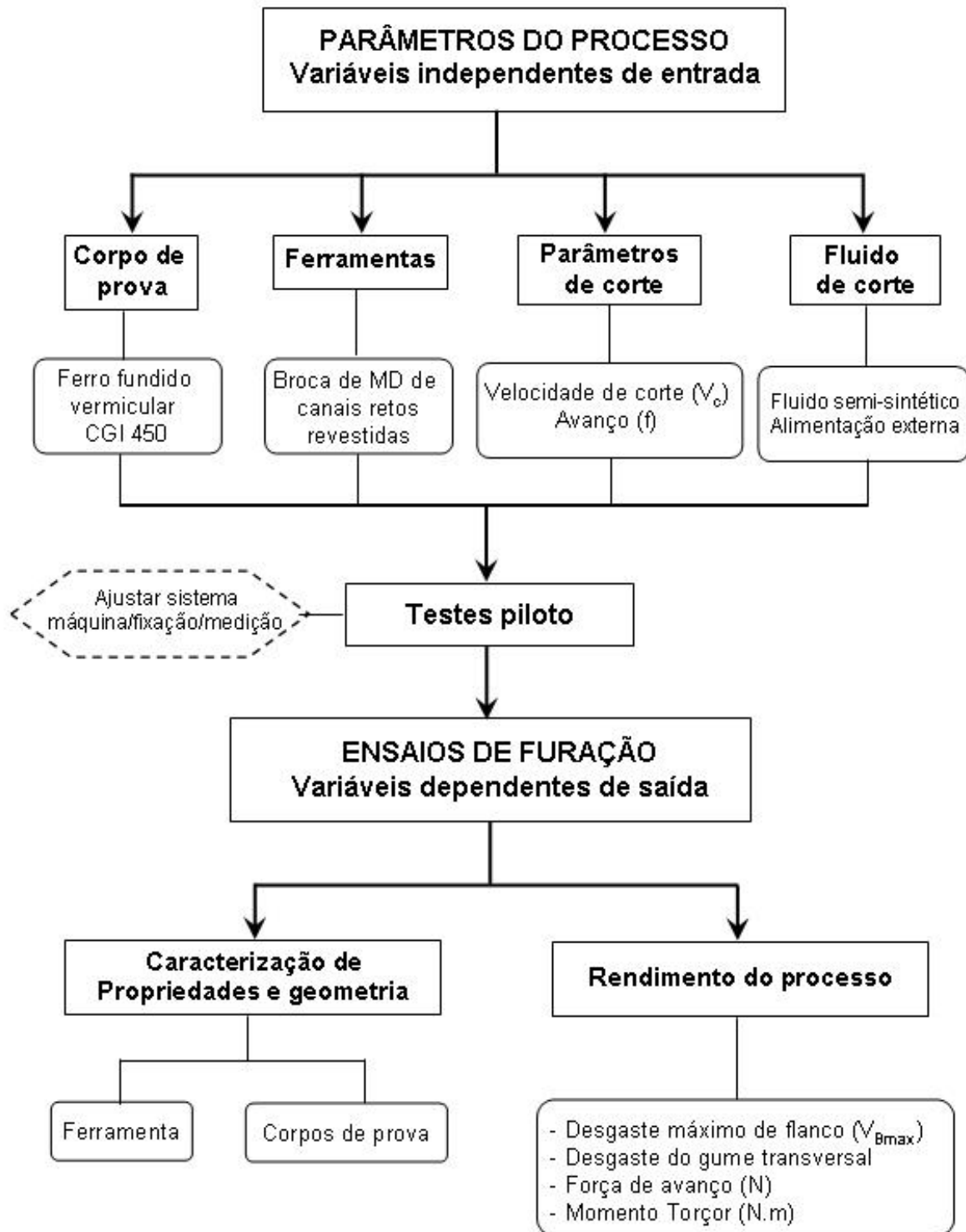


Figura 4.2: Modelo esquemático para desenvolvimento experimental.

• **Corpos e Prova:** O material utilizado para o desenvolvimento dos corpos de prova foi o ferro fundido vermicular CGI450 com espessura de 40mm. A geometria dos corpos de prova para ensaios de vida e ensaios de força podem ser vistas na figura 4.3. A escolha dos corpos de prova foi definida em função de alguns fatores importantes:

- (i) Matéria-prima com as mesmas propriedades mecânicas e microestruturais, utilizadas na indústria para a fabricação de peças automotivas;
- (ii) Facilidade no sistema de fixação das peças;
- (iii) Redução das vibrações durante a usinagem.

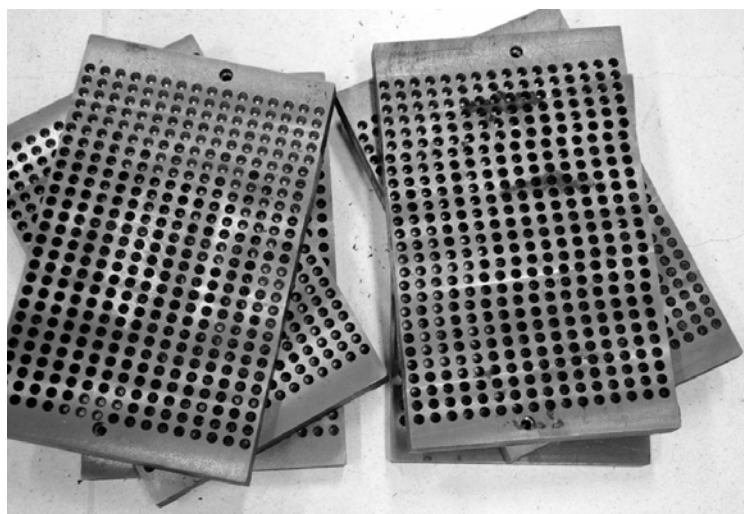
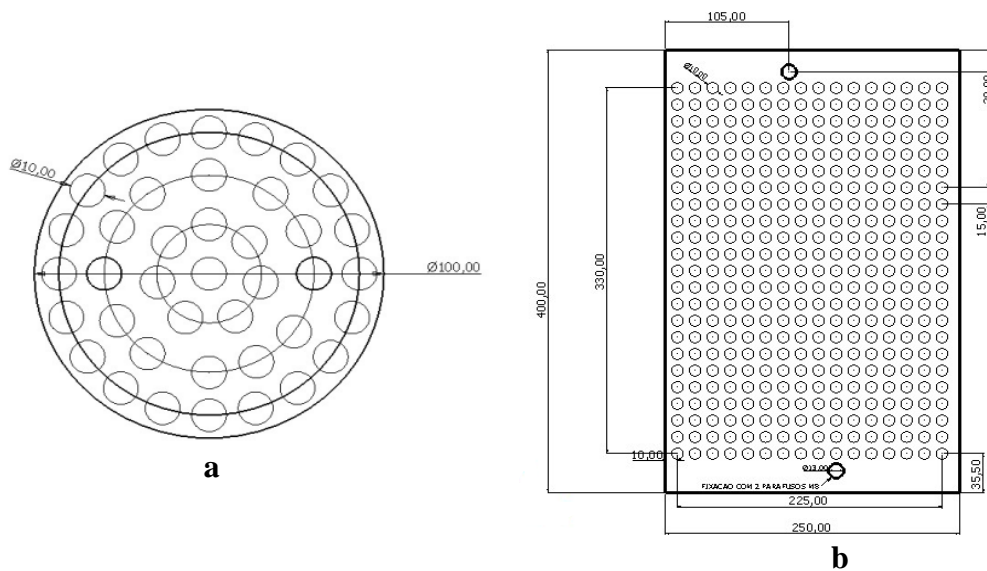


Figura 4.3: Geometria dos corpos de Prova; **a)** – Ensaios de Força; **b)** – Ensaios de Vida.

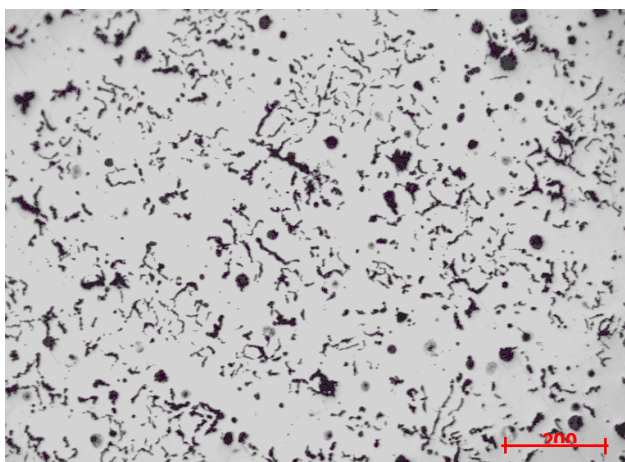
A fixação das placas para os ensaios foi realizado através de parafusos Allen M10, posicionado nas extremidades da placa. Estas placas foram enumeradas, conforme numeração seqüencial do processo de fabricação fornecida pela empresa parceira deste trabalho. As placas foram inicialmente fresadas, afim de que houvesse um posicionamento plano sobre a superfície da mesa da máquina, como também sobre o dinamômetro.

A análise química fornecida pelo fabricante é mostrada na Tabela 4.1. Antes de iniciar a usinagem, os corpos de provas foram avaliados microestruturalmente e preparados para realização dos ensaios.

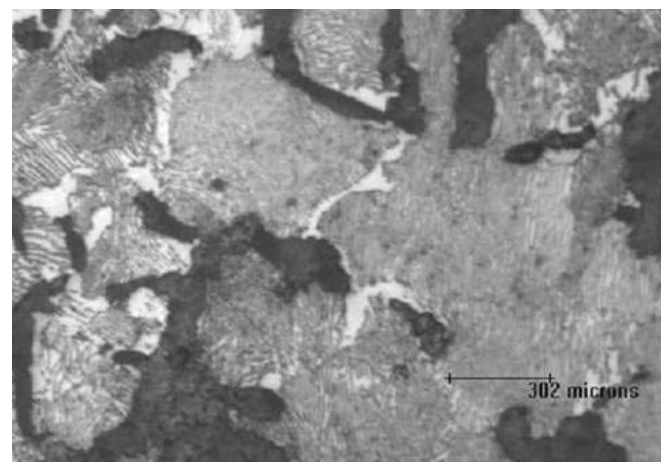
Tabela 4.1: Composição química do ferro fundido vermicular CGI450 (Fundição Tupy, 2007)

Elemento	C	Si	Mn	Cu	Sn	Cr	Mo
Teor (%)	3,62	2,41	0,37	1,17	0,064	0,029	-----

A análise microestrutural foi realizada nas seções transversais dos corpos de prova. As amostras foram preparadas metalograficamente para caracterizar o tipo e quantidade de grafita e perlita na microestrutura do material. Para revelar a microestrutura do material, foi realizado o ataque químico com solução de nital 3%. As imagens foram adquiridas por um microscópio Olympus com aumento de 100 vezes. Na Figura 4.4 podemos visualizar as imagens obtidas para a análise microestrutural do ferro fundido vermicular CGI450. Observa-se que o material é composto por uma matriz Vermicular Perlítica.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Micrografia do ferro fundido Vermicular CGI450. **(a)** Ampliação 10x, **(b)** ampliação 500x.

Outro ensaio realizado para a caracterização do material usinado foi a medição da dureza Brinell por meio de um durômetro da marca Pantec. Neste ensaio foi utilizada uma esfera com diâmetro de 2,5mm e carga de 187,5 Kgf. Os valores de dureza estão contidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dureza Brinell do Corpo de Prova

	Dureza Brinell (HB)			Desvio	Dureza Média
Amostra 1	260	260	255	2,9	260,0
Amostra 2	249	244	255	5,5	249,0
Amostra 3	249	255	249	3,5	249,0
Amostra 4	260	255	255	2,9	255,0
Amostra 5	260	260	260	0,0	260,0
Amostra 6	255	255	260	2,9	255,0
Média Geral					254,6

• **Ferramentas:** foram utilizados brocas de metal duro com canais retos, revestidas com TiN+TiAlN em multicamadas, AlCrN e AlCr-Based. A figura 4.5 apresenta as ferramentas utilizadas.

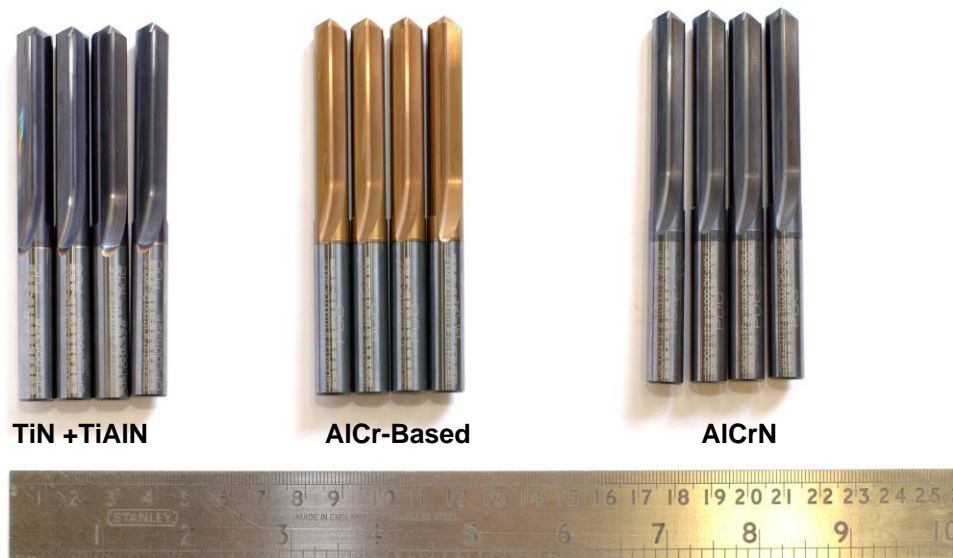


Figura 4.5 – Brocas utilizadas para a realização dos ensaios.

Foram utilizadas 12 brocas produzidas pela GUHRING COMPANY TOOLS, todas do mesmo lote de fabricação. A tabela 4.3 apresenta as características do metal duro utilizado na fabricação das brocas

Tabela 4.3: Composição química do metal duro classe K10 (Guhring, 2007).

Metal duro - DK500UF		
Característica	Unid	Valor
Tamanho de grão	µm	0,5µm
Dureza	HV30	1620
Densidade	g/cm ³	14,45
Percentual de WC	%	90
Percentual de Co	%	10

Para os revestimentos, pretende-se identificar o revestimento que apresente melhor rendimento durante os ensaios. A utilização de brocas com canais retos propicia uma melhor estabilidade no processo, apresentando baixa força de corte e conseqüentemente torques menores quando comparadas com brocas de canais helicoidais. Por apresentar tais características, esta broca esta se tornando uma tendência de mercado no processo de furação do Ferro fundido.

Todas as brocas foram classificadas por tipos de revestimentos para posterior identificação e codificação padrão em todas as brocas. Foram avaliadas as rugosidades (R_a) dos revestimentos aplicados sobre as brocas. A rugosidade das ferramentas foi determinada através da utilização do rugosímetro da marca **Taylor Hobson – FormSurf Series 2**. Este equipamento possui um apalpador mecânico com ponta em diamante de 1,5 à 2,5 µm de raio.

Para a realização dos ensaios de furação, optou-se pela fixação da broca sobre cone Hidráulico ISO 40 da marca **SECO TOLLS**. Esse sistema de fixação

proporcionou ao processo rigidez, eliminando possíveis giros da broca sobre o cone. Assim, foi possível analisar o comportamento do desgaste da broca sem a presença de interferências ou quebras ocorridas em função de um plausível giro da broca.

• **Parâmetros de Corte:** Os parâmetros de corte empregados, assim como os critérios de usinabilidade, foram definidos a partir de duas condições:

Condição 1 – Avanço de 0,1mm e VC 80 m/min – nesta condição ocorre abrasão, devido o arrancamento de partículas do material.

Condição 2 – Avanço de 0,1 mm e VC 150 m/min – com o aumento da velocidade de corte, a ferramenta tende a desgastar de forma mais rápida, ou seja, ocorre um acréscimo na temperatura de usinagem, resultando em mecanismos de difusão. Após a realização dos ensaios preliminares efetivaram-se os parâmetros iniciais, estabelecidos em conjunto com a empresa parceira deste trabalho.

Para a condição de usinagem utilizando-se de uma Vc de 80m/min, caracteriza a situação atual de trabalho nas linhas de produção da empresa para a usinagem do Ferro fundido vermicular.

A profundidade dos furos foi de 2Xd, para atingir está profundidade total o incremento de corte foi de 10mm. Este incremento foi adotado, pelo fato de utilizarmos refrigeração externa, assim foi possível evitar a presença de cavacos entre a superfície da broca e a peça.

• **Fluído de Corte:** Para a realização dos ensaios, utilizou-se de Fluido de Corte semi-sintético LANOCENT 25, com concentração de 5%, desenvolvido pela Solgren do Brasil. Este fluido de corte, segundo a Empresa é indicado para operações de Usinagem com altas velocidades de corte e avanço, apresentando alta lubricidade, preservando a baixa temperatura de corte e facilitando a saída do cavaco.

4.2 Procedimento Experimental

4.2.1 Ensaio de Vida

A metodologia utilizada para o desenvolvimento dos ensaios de vida foi sempre a mesma ao longo do trabalho. Inicialmente, foram medidas a força de

avanço e o momento torçor com as brocas novas, realizando dois furos no corpo de prova montado sobre a plataforma. Para cada ensaio na plataforma, a aquisição das informações ocorreu em todas as etapas de furação, do e início da furação até a saída da broca do corpo de prova. A frequência de aquisição utilizada foi de 1 Khz. Foram realizadas aquisições na condição de meia e final de vida da ferramenta. Na situação final foram realizados ensaios com e sem a presença do fluido refrigerante, nesta última observou-se um acréscimo considerável nas medidas de força de avanço e momento torçor.

Durante os ensaios foi observada a qualidade no acabamento do furo, como rugosidade, marcas na parede do furo e formação de rebarbas.

Todas as brocas foram testadas sobre as duas condições de corte citadas anteriormente. Após o fim de vida da ferramenta, repetia-se o ensaio com uma nova ferramenta a fim de observar a repetibilidade do processo.

Nos ensaios realizados na Plataforma Pzeuoelétrica, os furos foram produzidos sem a quebra de cavaco. Na figura 4.6 pode ser visto imagens, de todo o sistema de aquisição de dados.



Figura 4.6: Sistema de aquisição de dados

4.2.2 Caracterização de propriedades e geometria

A análise de propriedades e geometria das ferramentas e dos corpos de prova usinados teve por objetivo investigar a influência do desgaste da ferramenta sobre a qualidade dos furos, e avaliar a dureza e espessura dos revestimentos aplicados sobre as ferramentas. Para esta análise foram utilizadas as seguintes técnicas:

- **Avaliação da Qualidade dos furos:** Após os ensaios de força, os corpos de provas foram devidamente limpos e codificados com o objetivo de identificar a seqüência da operação e o número da ferramenta. Em seguida foram encaminhados para o laboratório de Metrologia da PUC para a realização da análise da qualidade dos furos nos intervalos de início, meio e fim de vida das ferramentas.

A qualidade dos furos foi analisada através dos parâmetros como de rugosidade da parede do furo, circularidade, retilineidade, diâmetro médio e em algumas situações, a formação de rebarbas. Tal avaliação visa registrar a influência do desgaste da ferramenta sobre a qualidade dos furos. Todas as medições foram realizadas numa profundidade de 5 a 15 mm.

Como parâmetro de avaliação nas medições de rugosidade, foi escolhido o parâmetro R_a , por ser um parâmetro utilizado no controle da qualidade de superfícies usinadas destinadas à indústria automotiva. As peças foram avaliadas em rugosímetro da marca **Taylor Hobson** modelo **Form TalySurf 50Ai**.

Para a avaliação da circularidade do furo, foi utilizado uma distância aproximada de 5 mm do início do furo, sendo medidas através de um circularímetro. Os corpos de prova foram montados sobre a base da máquina. Em seguida, por meio de um apalpador foram realizadas as medições em três diferentes seções: entrada, meio e saída do furo.

- **Caracterização Microestrutural:** Para realizar os ensaios de análise da microestrutura foram utilizadas seções transversais das brocas. A avaliação foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura, marca **Zeiss** modelo **EM109** com aumento de 2000 vezes. A análise possibilitou avaliar a granulometria do metal

duro nas brocas, a uniformidade do tamanho de grãos da ferramenta a espessura dos revestimentos aplicados sobre as brocas e a forma de desgaste ocorrido decorrentes dos ensaios de furação.

4.2.3 Rendimento do Processo

- **Medição do desgaste:** Para a avaliação do desgaste no flanco foi realizada a medição do desgaste em intervalos definidos previamente de 0,64 m de furação, compreendendo assim, o período para a realização de sucessivas medições de desgaste. Para medir o desgaste foi utilizado um microscópio da marca **Carl Zeiss** modelo **JEMA** com aumento de 60 vezes, conforme pode ser visto na figura 4.7. Foram medidos os desgastes máximos de flanco VB_{max} . Como ponto de referência para a medição dos desgastes máximos de flanco VB_{max} , foi utilizado o gume principal da ferramenta., Assim, foi medido o VB_{max} em ambos os gumes de cada ferramenta e foi determinado maior desgaste entre as duas medições como valor de desgaste. Tal procedimento foi adotado devido à diferença pouco significativa entre estas duas medições.

Para a medição do desgaste do gume transversal, utilizou-se o mesmo equipamento, sendo medido o gume de cada broca nas condições de início e fim de vida. Assim, foi possível observar o desgaste sofrido pelo gume transversal ao longo do processo de usinagem.

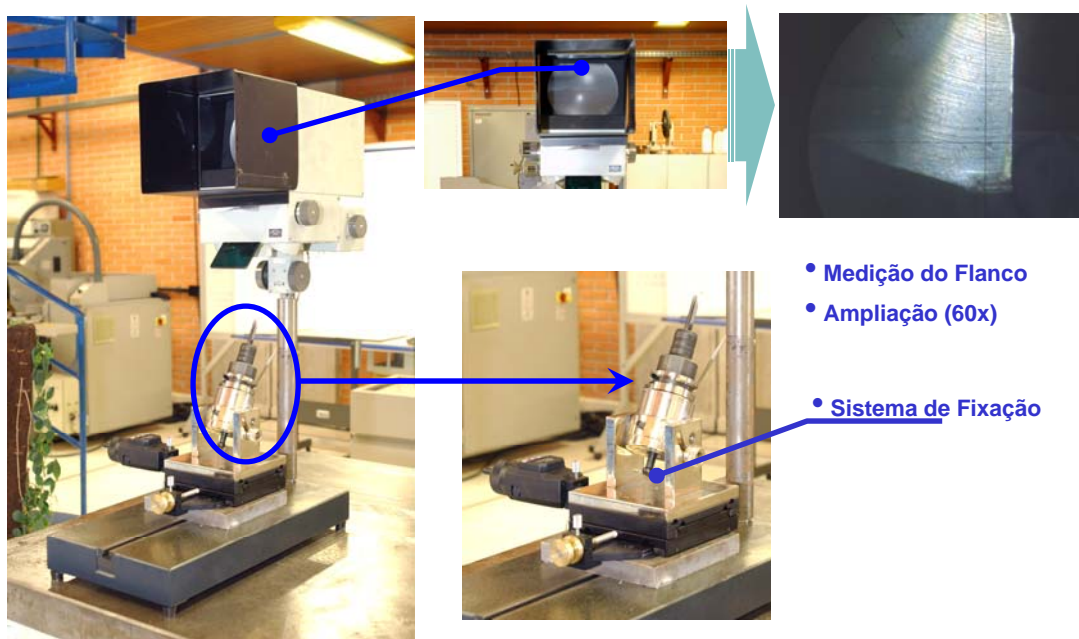


Figura 4.7: Sistema de Medição do desgaste de Flanco.

• **Aquisição de dados:** Variáveis de saídas como estas, foram obtidas para cada condição de corte com o objetivo de analisar a repetibilidade do processo. Foram realizadas duas medições para cada condição e assim, determinado os valores médios da força de avanço e momento torçor. Estes ensaios foram realizados na condição de início, meio e fim de vida de cada ferramenta. A força de avanço e o momento torçor foram medidos através da célula de carga da marca **KISTLER** tipo **9272**, componente utilizado para medir a força de avanço no processo de furação. O dinamômetro 9272 pode medir um torque M_z e os três componentes ortogonais da força. O kit de medição de força é apropriado para ensaios de medidas da força de corte no processo de furação (manual da célula de carga Kistler 9272). Para a medição deste sinal foi utilizado um amplificador de carga multicanal da marca **KISTLER** do tipo **5019**. Este kit, como também o sistema de fixação pode ser visto na figura 4.6.

Após uma análise inicial dos dados, foram excluídas as forças atuantes nas direções de x e y , as quais não possuíam interferências sobre os valores estudados. Para a análise dos resultados, todas as curvas de forças e momento torçor são valores médios das medições.

A partir dos resultados dos ensaios, foram organizadas planilhas para a elaboração de curvas de rendimento do processo, representadas individualmente

por: desgaste de flanco VB_{max} , parâmetros de qualidade e desempenho dos revestimento. Também são apresentadas as micrografias obtidas no desenvolvimento dos testes. Todos esses resultados são analisados e discutidos no capítulo seguinte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios de furação, sob as duas velocidades de corte adotadas ao longo dos ensaios tendo como critério para a determinação do fim da vida da ferramenta, um desgaste de flanco VB_{\max} de 0,4 mm.

5.1 Brocas de Metal Duro

Os resultados das medições geométricas das ferramentas utilizadas nos experimentos podem ser visto na tabela 5.1. Por serem todas as brocas de um único lote, foi possível observar que não houve variação geométrica entre as ferramentas. Isto contribui para a análise dos resultados, permitindo observar que o desgaste ocorrido durante os ensaios foi gerado pelo processo em si, e não em função de uma disparidade geométrica da ferramenta.

Tabela 5.1: Medições da geometria das brocas.

Ferr\lten	Ângulo da ponta	Simetria do ângulo da ponta	Comprimento do gume Transversal (mm)	Comprimento do gume principal (mm)
Broca MD Guhring	120	60	0,8	5,6

Na tabela 5.2 pode ser observado os resultados das medições da rugosidade dos revestimentos aplicados sobre as ferramentas de metal duro.

É possível observar uma diferença na média de 0,02 μmm Ra para a ferramenta revestida com TIN+TIAlN em multicamadas em relação aos outros revestimentos.

Tabela 5.2: Valores de Rugosidade Ra dos revestimentos (μm).

Medição	TiN+TiAlN	AlCrN	AlCr-based
1	0,066	0,04	0,047
2	0,06	0,037	0,036
3	0,062	0,035	0,056
4	0,06	0,049	0,042
Média	0,06	0,04	0,04
Desvio	0,003	0,006	0,008

Faz-se necessário conhecer as rugosidades dos revestimentos pois nas operações de usinagem, (HAINSWORTH, 2003) observa-se que o coeficiente de atrito e a força de atrito para materiais de alta dureza, como os revestimentos, ambos sofre um acréscimo com o aumento da rugosidade superficial, assim é de suma importância, que os filmes revestidos, apresentem baixos valores de rugosidade garantindo então, baixo coeficiente de atrito, que por sua vez irá contribuir para o escoamento do cavaco e reduzir interferências entre ferramenta-cavaco, vibrações e contribuindo então para a redução da geração de calor durante a usinagem.

5.2 Ensaios preliminares

Ao definir as variáveis principais que envolvem o trabalho, foram realizados ensaios preliminares utilizando-se dos parâmetros de corte de 0,1mm de avanço e velocidade de corte de 80m/min para a realização de furos de 10 mm de diâmetro e 20mm de profundidade com incremento de 10mm.

Estes ensaios proporcionaram observar e analisar alguns resultados importantes para o desenvolvimento dos ensaios:

- Análise do comportamento da broca com os parâmetros de usinagem, possibilitando assim, a efetivação dos parâmetros de corte;
- Definição de uma metodologia adequada para monitoramento de VB e análise dos esforços de corte ao longo do desgaste VB, observando alguns ruídos que surgiam ao longo do desgaste.

- Possibilidade da escolha da utilização de Fluido de corte, pois em ensaios realizados sem a presença do Fluido observou-se um acréscimo considerável na força de avanço e momento Torçor.

A figura 5.1 apresenta o desempenho da ferramenta revestida com TIN + TIAIN Multicamadas, utilizando-se de fluido Refrigerante. Observa-se o acréscimo considerável da força de avanço e momento torçor na situação de fim de vida sem fluido de corte.

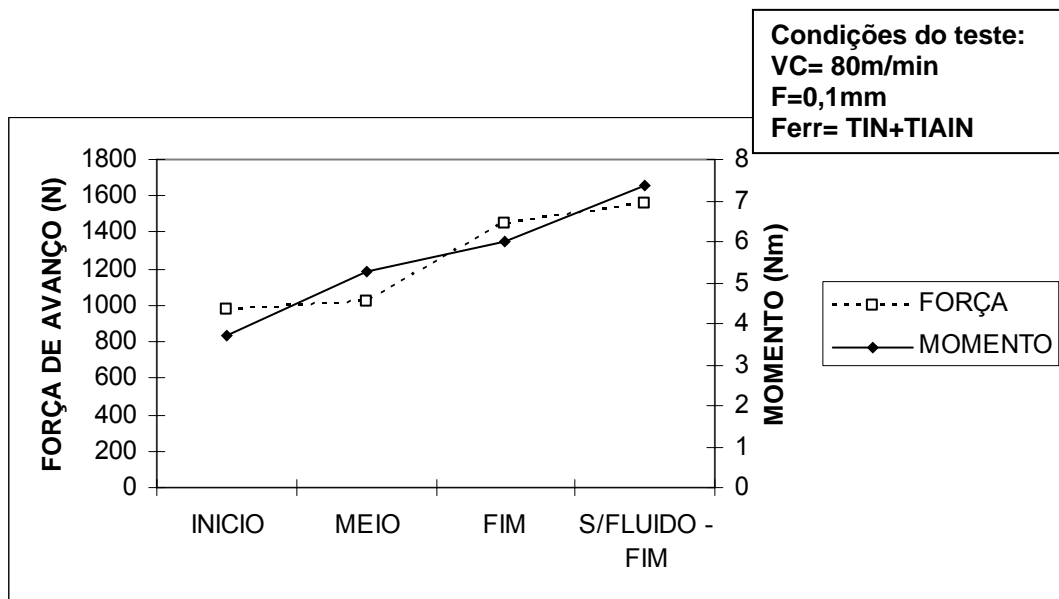


Figura 5.1: Força de Avanço e momento Torçor nas condições de vida da ferramenta.

Foi analisado também o comportamento da broca com relação ao seu desgaste ao longo do comprimento usinado. Na figura 5.2 pode-se observar que após atingir uma condição do desgaste de flanco VB 0,2mm (considerado aqui como situação de meio de vida), a broca sofreu um desgaste mais expressivo, reduzindo assim, o comprimento usinado quando comparado com a situação inicial de vida.

Observou-se que na realização dos pré-ensaios, a ferramenta revestida com TIN+TIAIN, apresentou um excelente rendimento. A ferramenta possibilitou a usinagem de um comprimento de 5,8m atingindo um desgaste abrasivo nas guias da broca.

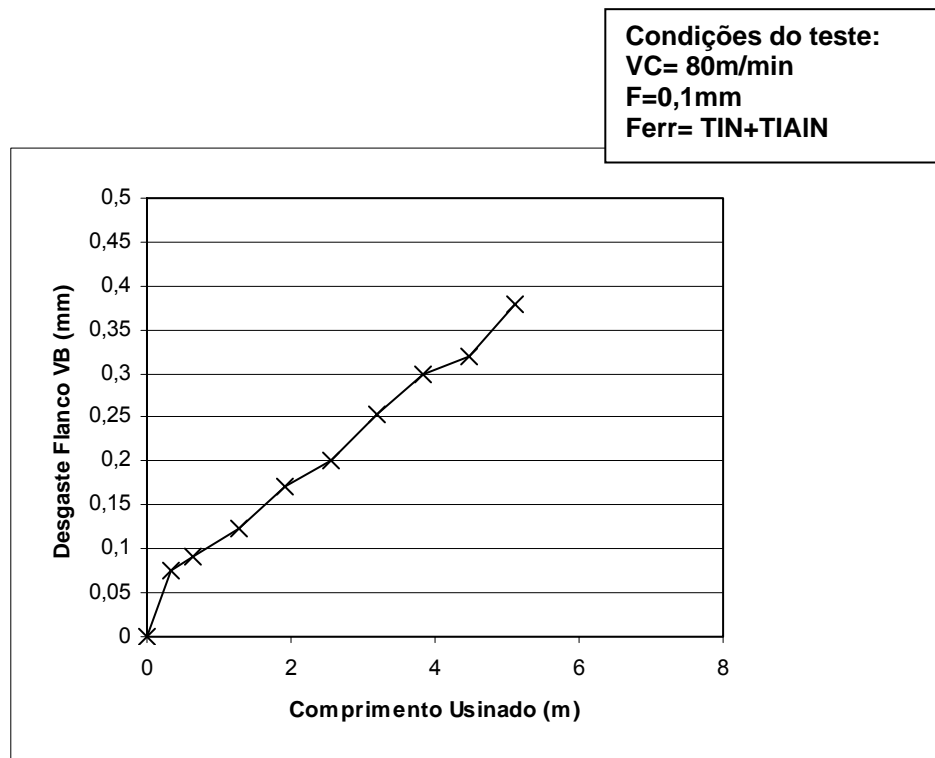


Figura 5.2: Desgaste de Flanco ao longo do Comprimento Usinado em ensaios préliminares com ferramenta revestida TIN+TIAN.

5.3 Ensaio de vida

Na realização dos ensaios de vida, foi observado o comportamento dos revestimentos, como também a evolução do desgaste das ferramentas. Na figura 5.3 observa-se as curvas de vida obtida, para cada revestimento sob as duas condições de corte ensaiadas.

É notável que o revestimento a base de Cromo Alumínio (AlCr-based) apresentou menor desgaste ao longo do comprimento usinado, durante os ensaios de furação. Foi comprovado que este revestimento apresenta alta resistência ao desgaste abrasivo e alta resistência à oxidação. Por ser um revestimento multicamadas à base de AlCr, pode suportar trabalhos em temperaturas acima de 1100°C. Com essas características, o Hélice como comercialmente é conhecido, supera os revestimentos de nitreto de titânio-alumínio em todos os materiais comuns em operações de furação (Balzers, 2007).

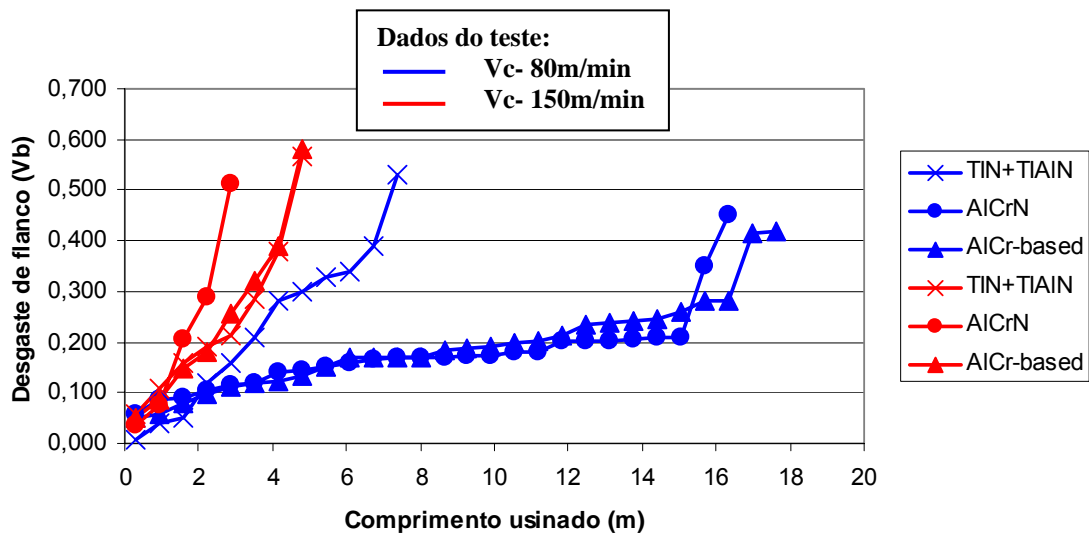


Figura 5.3: Desgaste de Flanco ao longo do Comprimento Usinado.

O Revestimento AlCrN apresentou também um excelente desempenho quando comparado com o revestimento TIN+TiAlN, obtendo-se valores bem próximos aos revestimentos AlCr-based. Mesmo se tratando de um revestimento monocamada desenvolvido para operações de fresamento, em estudos realizados pela Balzers em operações de fresamento com um aço de dureza 52HRC, ficou comprovado que este revestimento possui elevada resistência a oxidação quando comparado com os revestimento TIN e TiAlN. Para tanto, a empresa explica também, que para esta velocidade de corte os revestimentos AlCr-based e o AlCrN, podem apresentar o mesmo desempenho, ou ainda, em se tratando de operações de furação o revestimento a base de AlCr, pode apresentar uma ligeira vantagem, pelo fato de ser desenvolvida especificamente para tal operação, (Balzers, 2007).

Na figura 5.4 podemos observar a quantidade de número de furos produzidos ao atingir um desgaste de flanco de V_b 0,2mm, para os ensaios realizados sob velocidade de corte de 80m/min e 150m/min. Nesta condição, as ferramentas revestidas apresentaram um baixo rendimento com relação o comprimento usinado.

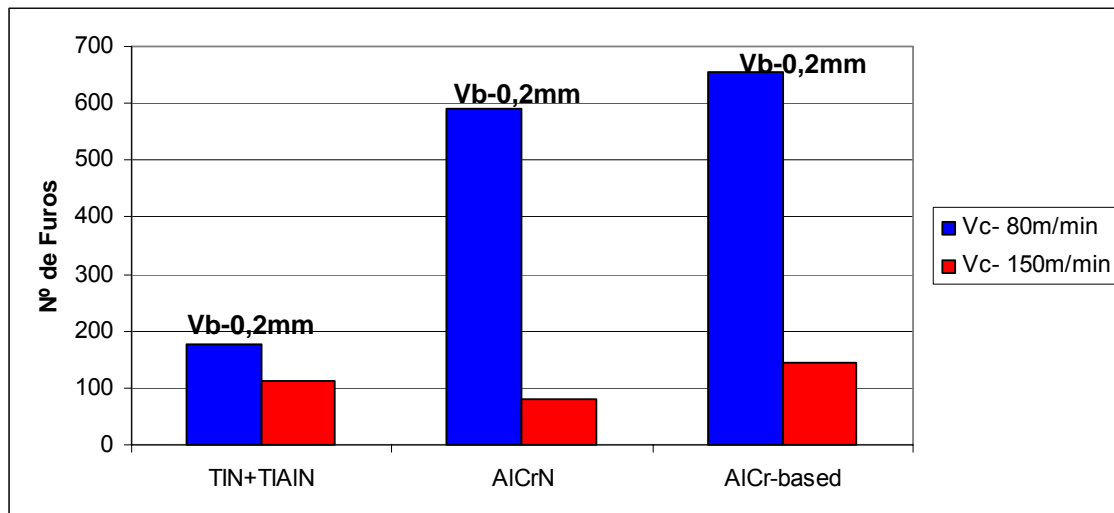


Figura 5.4: Quantidade de furos produzidos pelas brocas ensaiadas, ao desgaste de Flanco de 0,2mm.

Era esperado resultados melhores com relação ao revestimento AlCrN, em termos de desgaste em função do comprimento usinado. Apesar do revestimento de TIN+TiAlN possuir maior dureza que o revestimento em questão (3300HV contra 3200HV) o revestimento AlCrN possui uma dureza à quente maior que o revestimento TIN+TiAlN (1200°C contra 800 °C). Pode-se considerar então, em função de vibrações existentes sob tal velocidade de corte, ocorrer arrancamento do revestimento sob o substrato. Bouzakis (2001) afirma que a causa do arranque antecipado dos revestimentos localizado na região do corte efetivo da ferramenta, ocorre em função da sobrecarga causada pela relação entre cavaco e ferramenta. Por se tratar de um revestimento monocamada, o substrato fica exposto à usinagem quando ocorre o arrancamento do revestimento.

Comparando-se os revestimentos AlCr-based e o revestimento TIN+TiAlN, os resultados apresentados na figura 5.4 contrariaram as expectativas, pois esperava-se que o revestimento AlCr-based apresentasse um comportamento melhor. Neste caso, ambos revestimentos obtiveram o mesmo rendimento, levando em consideração um pequeno desvio da medição e do monitoramento do desgaste do flanco. Jindal (1999), em estudos de torneamento (Jindal, 1999), relata que ferramentas revestidas com o revestimento TiAlN apresentam melhor estabilidade sob altas temperaturas de corte, pois resulta na formação de uma camada de Al_2O_3 sobre a aresta de corte da ferramenta, preservando assim, a aresta de corte por um tempo maior.

De maneira geral, os revestimentos multicamadas apresentaram melhores resultados que o revestimento monocamada. Provavelmente isto ocorreu em função da perda do revestimento e também em virtude da elevada dureza do revestimento monocamada, resultando numa maior fragilidade e menor capacidade para suportar as vibrações ocorridas em virtude do acréscimo da velocidade de corte. Para os revestimentos em multicamadas, mesmo ocorrendo à perda de camadas mais externas, o substrato não fica exposto de imediato, então uma nova camada de revestimento estará logo abaixo da qual se separou da ferramenta, isto ocorrerá até a perda total do revestimento. Isto explica em partes, o bom rendimento das ferramentas revestidas com revestimentos multicamadas em relação ao revestimento monocamada.

Observou-se que a vida da ferramenta é influenciada pela velocidade de corte. Tal fato foi provado nos estudos, pois com o aumento da velocidade de corte de 80m/min para 150m/min houve a diminuição da vida da ferramenta, onde o comprimento usinado foi de 16,96m para 4,16m respectivamente. Isto representa uma perda de 75,5% na vida da ferramenta.

5.4 Força de Avanço e Momento Torçor

A figura 5.5 apresenta os resultados de força de avanço obtidos nos ensaios de furação com velocidade de 80m/min e 150m/min. Os ensaios foram repetidos para cada broca revestida, assim foi possível observar coerência dos valores entre um ensaio e o outro. Os resultados expressos no gráfico correspondem ao valor médio dos ensaios, nas condições de início, meio e fim de vida da ferramenta, ou seja, momento em que a ferramenta atingiu o critério de fim de vida utilizado neste trabalho sendo um $V_{b_{máx}}$ de 0,4mm ao longo de um comprimento usinado.

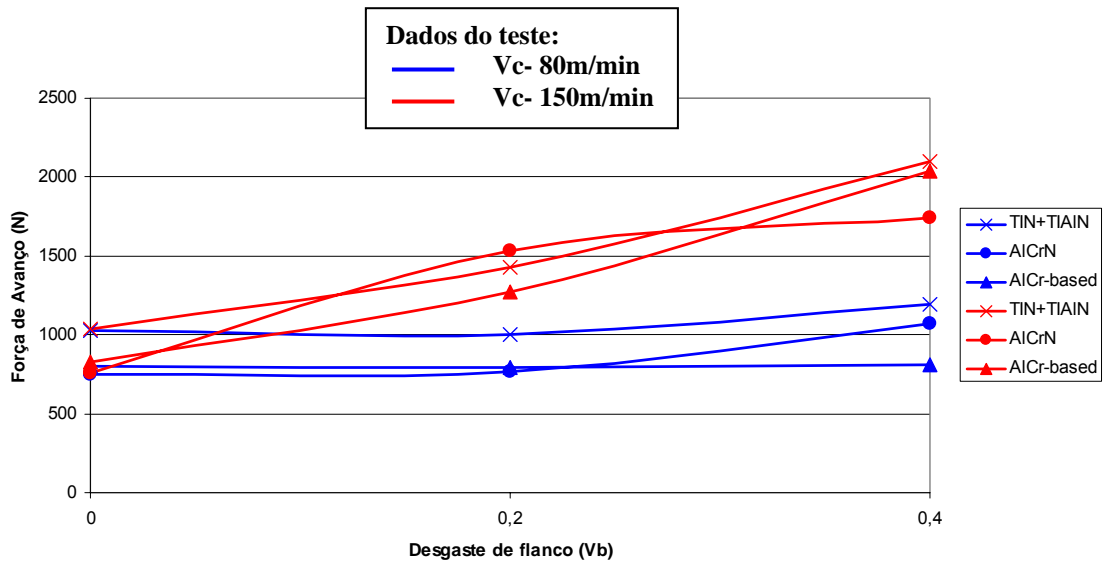


Figura 5.5: Forças de avanço medida nas condições de início meio e fim de vida das ferramentas sob velocidades de Corte de 80 e 150m/min, com Avanço de 0,1mm.

Ao longo do desgaste da ferramenta é possível observar que ocorreu diferenças expressivas nas forças de avanço entre os revestimentos sob ambas velocidades de corte. Porém fica evidente que a velocidade de corte não contribui de forma significativa para o aumento da força de avanço na condição de início de vida, representando apenas, um acréscimo de aproximadamente de 2%. Já para fim de vida, foi obtido um acréscimo considerável de 70%. Conforme Lim, (2001) forças de avanço ao longo do comprimento usinado tendem a aumentar, com a evolução do desgaste de flanco.

Em linhas gerais, o revestimento a base de Cromo Alumínio apresentou melhor comportamento sob ambas velocidades de corte. Isto pode ser explicado pela alta resistência térmica do revestimento, preservando assim, o substrato. Não o expondo de imediato aos esforços de usinagem, serão obtidos esforços menores quando comparado com os revestimentos utilizados no atual trabalho.

Em relação ao comportamento da ferramenta no fim de vida sob uma mesma velocidade de corte, foi possível observar uma pequena variação da força de avanço, provavelmente ocorrida, em função das condições de desgaste de cada ferramenta. Este fato é explicado por Wertheim (2002), onde a atual situação da aresta de corte da ferramenta contribui de forma considerável para o aumento dos

esforços de usinagem, podendo chegar a valores 25% maiores para um desgaste da ferramenta dentro da faixa admissível de desgaste.

Analisando o desempenho das ferramentas com relação ao momento torçor, foi feita comparação dos resultados de momento torçor, no início meio e fim de vida, sob as duas velocidades de corte utilizadas no trabalho. Estes resultados são apresentados na figura 5.6.

Assim como nos estudos de Andrade (2005), que verificou uma grande influência da velocidade de corte sobre o momento torçor, no atual observou-se pouca influência, onde as tendências dos resultados de momento torçor mantiveram o mesmo padrão mostrado para as forças de avanço. Foi observado um aumento significativo nos resultados de momento torçor quando comparado na condição de fim de vida, com relação ao seu início de vida, sob uma mesma condição de corte. Esse comportamento pode ser justificado pela tendência ao aumento dos esforços de usinagem decorrentes do alto grau de desgaste dos gumes (Kudla, 2001).

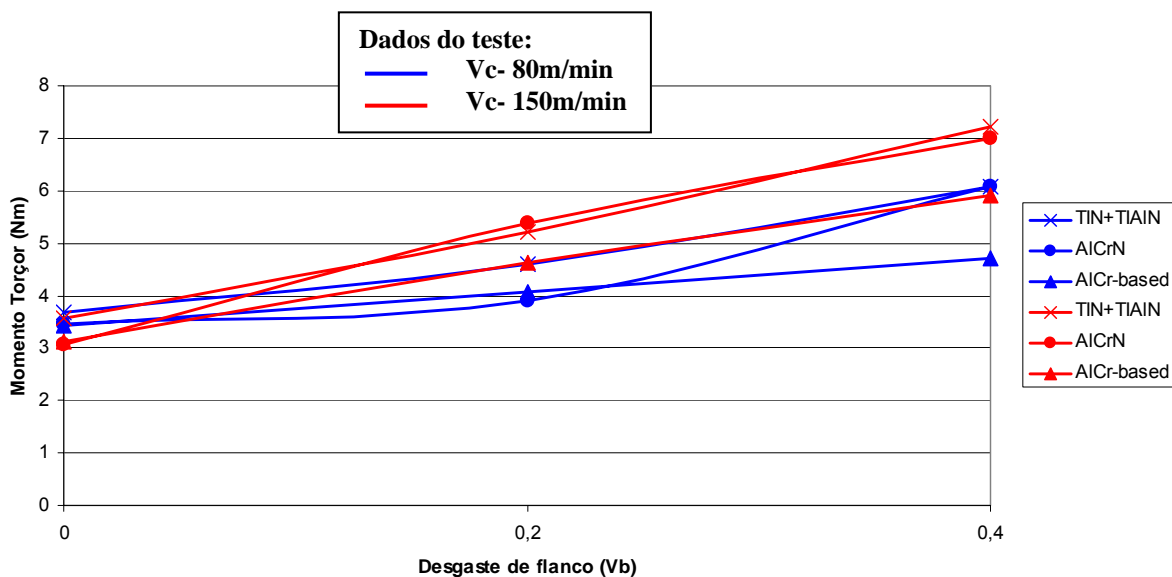


Figura 5.6: Momento torçor nas condições de início meio e fim de vida das ferramentas sob velocidades de Corte de 80 e 150m/min, com Avanço de 0,1mm.

Os resultados obtidos sob uma velocidade de corte de 80m/min mostra que a broca revestida por AlCr-based apresentou baixos valores de momento, quando comparado com os outros revestimentos. Isto pode ser explicado pelo baixo coeficiente de atrito deste revestimento quando comparado com os outros, pois em estudos realizados, o coeficiente de atrito de um revestimento sobre uma ferramenta está diretamente relacionado com os mecanismos de desgaste de adesão e

abrasão, os quais influenciam de maneira negativa o tempo de vida e as forças de usinagem (Harris, 2003).

Observa-se também que, em fim de vida, o revestimento a base de Cromo Alumínio apresentou melhores resultados para uma velocidade de corte de 150m/min.

5.5 Rugosidade superficial (Ra)

As medições de rugosidade nas paredes internas dos furos foram realizadas nas mesmas condições de parâmetros. Estas foram analisadas através da média de duas medições realizadas com uma distância de 90° realizadas nos mesmos intervalos de medição dos desgastes das ferramentas, obtendo-se assim, valores de rugosidade para cada condição por ferramenta testada. A figura 5.7 apresenta os resultados obtidos nas condições de início, meio e fim de vida, para os ensaios realizados sob velocidade de corte de 80m/min e 150m/min, respectivamente. Tais medidas foram realizadas próximas do comprimento médio do furo.

Na primeira condição, com velocidade de corte de 80 m/min, foi observado um comportamento oposto entre as ferramentas testadas, sendo que, valores obtidos pela ferramenta revestida por AlCrN, representam um acabamento superficial de qualidade superior quando comparado com os outros revestimentos, na situação de fim de vida. No início de vida, fica claro que a ferramenta revestida com TIN+TiAlN apresenta baixíssimo valor de rugosidade sobre o parâmetro R_a , ficando claro que ao longo do desgaste da ferramenta, ambos revestimentos apresentaram maiores rugosidades superficiais. Andrade e Balzers (2005) relatam que as ferramentas ainda revestidas por completo, colaboram positivamente para obtenção de melhores texturas superficiais devido ao menor coeficiente de atrito no contato entre cavaco-ferramenta.

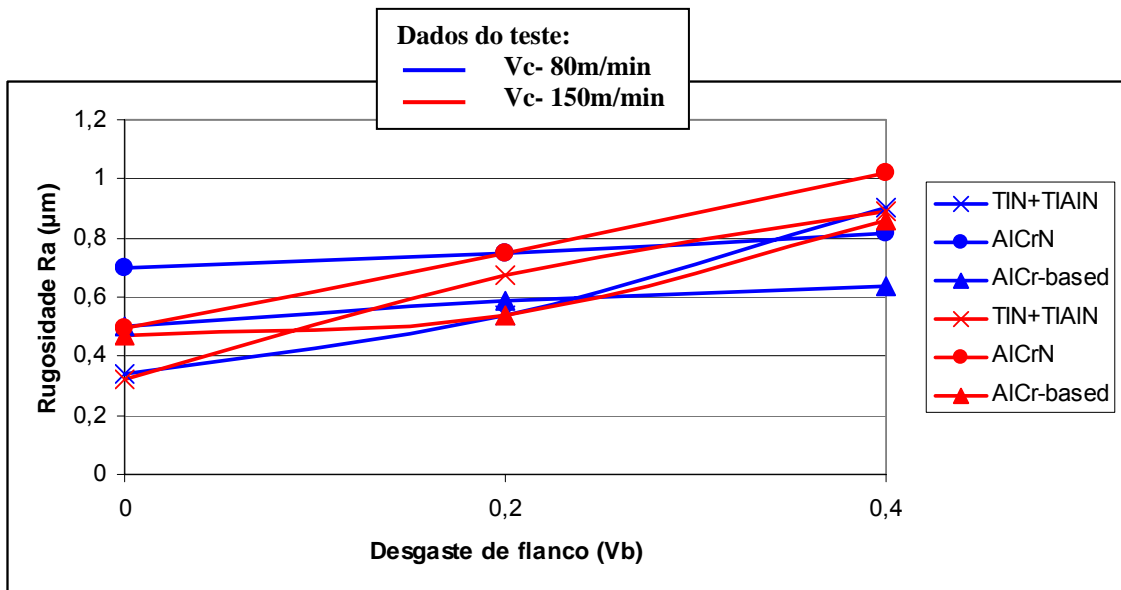


Figura 5.7: Rugosidade dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.

Na figura anterior pode-se notar que sob velocidade de corte de 150m/min obtiveram-se menores valores de rugosidade superficial na condição de início de vida quando comparado com os valores obtidos sob velocidade de corte de 80m/min. Porém, foram observadas pequenas diferenças na condição de fim de vida, entre os revestimentos TIN+TiAlN e AlCr-based. Desta forma, os revestimentos multicamadas apresentaram melhor rendimento em ensaios realizados com velocidade de corte 150m/min. Kim (2004) concluiu em seus estudos que, os revestimentos multicamadas representam melhor desempenho que os revestimentos monocamadas, quando ocorre o aumento da velocidade de corte.

De uma forma geral, observa-se que a ferramenta revestida por AlCr-based, apresentou melhor estabilidade durante os ensaios, não sofrendo grandes influências devido variação da velocidade de corte. Esta por sua vez, teve um acréscimo de aproximadamente 8% na textura dos furos produzidos quando submetidos a maior velocidade de corte.

Percebe-se também que os parâmetros de rugosidade, para os furos produzidos com a ferramenta revestida com TIN+TiAlN, mantiveram-se praticamente com os mesmo valores de rugosidades sob ambas condições de corte, independentemente da situação de desgaste da ferramenta.

5.6 Características Geométricas

Como características geométricas, foram analisadas a Circularidade, Retilidade e diâmetro médio dos furos produzidos nas condições de início, meio e fim de vida das ferramentas sob velocidade de corte de 80m/min e 150m/min.

5.6.1 Erro de circularidade

Ao observar o comportamento dos revestimentos sob o erro de circularidade, existe dificuldade na avaliação, pois através do comportamento evolutivo do erro de circularidade podemos observar curvas muito semelhantes. As brocas revestidas com os diferentes revestimentos utilizados no estudo apresentaram boa estabilidade com relação a este erro. Dessa forma, é difícil comentar sobre qual revestimento apresenta os melhores resultados de tolerâncias de circularidade em função da pequena variação entre os mesmos.

Como pode ser observado na figura 5.8, o erro de circularidade foi pouco notável quando observado os ensaios realizados, sob uma mesma velocidade de corte. Ambos apresentaram um mesmo comportamento de acréscimo do erro de circularidade na situação de fim de vida, ou seja, sob um desgaste de flanco de 0,4mm. Este comportamento também foi observado em estudo realizado por Andrade (2005). O autor afirma que não existiu tendência de maior variação do erro da circularidade dos furos sob velocidade de corte de 80 e 150m/min. Santos (2002) afirma também que a maioria das brocas apresenta melhores resultados de circularidade em início de vida do que no fim de vida, sob uma mesma velocidade de corte.

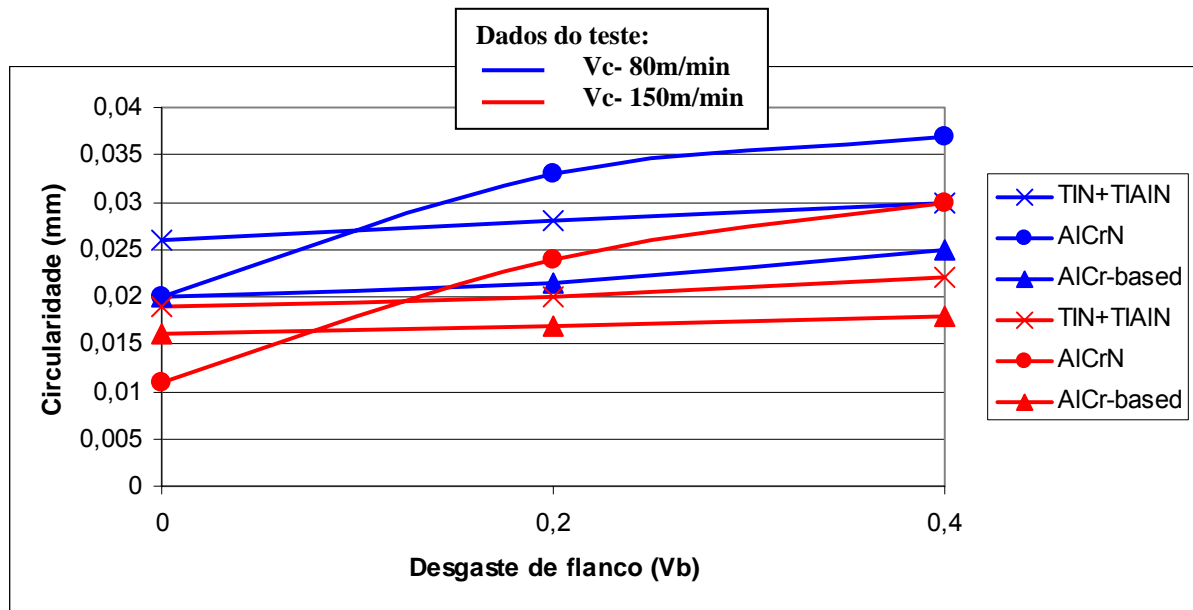


Figura 5.8: Circularidade dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.

A partir daí percebe-se que nos ensaios realizados sob uma velocidade de corte maior, todos os revestimentos apresentaram uma curva de resultado com valores de erro de circularidade menor que os ensaios sob uma velocidade de corte de 80m/min. Percebe-se que o revestimento a base de cromo alumínio apresentou desempenho estável, menor valor de erro de circularidade sob as duas velocidades de corte ensaiadas. Uma explicação para tal situação se deve ao fato de se tratar de um revestimento multicamadas que por apresenta baixo coeficiente de atrito. Outro fato pode estar relacionados também à estabilidade do processo, ou seja, pelo sistema de fixação peça e ferramenta. Tal situação sofreu interferências por maiores vibrações e esforços gerados no mesmo, quando aumentada à velocidade de corte.

5.6.2 Diâmetro Médio

Na figura 5.9 observa-se, que todas as brocas revestidas utilizadas apresentaram uma tendência praticamente constante do comportamento do diâmetro médio durante a usinagem. A ferramenta revestida a base de cromo alumínio apresentou menores dispersões nos resultados em relação às ferramentas com outros revestimentos.

Analisando os ensaios na condição de velocidade de 150m/min, observa-se que os valores medidos foram maiores quando ensaiados sob uma velocidade de corte de 80m/min. Esse comportamento pode ter ocorrido em função de vibrações

que ocorreram com o acréscimo da velocidade de corte, como também o aumento da interface entre ferramenta e cavaco em usinagem com altas taxas de velocidade de corte.

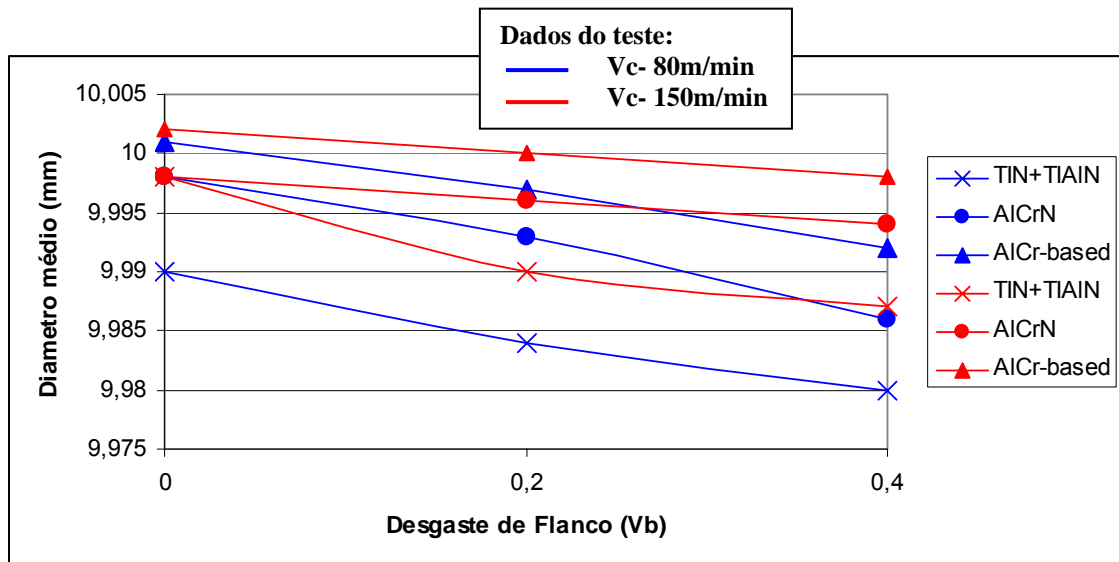


Figura 5.9: Diâmetro médio dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.

Na figura 5.9 é possível observar a redução dos furos produzidos em situação de fim de vida. No final de vida e com arranque do revestimento, o substrato fica exposto acarretando em uma diminuição do diâmetro da ferramenta. Conseqüentemente furos menores poderão ser produzidos. Esta tendência de reduzir a dimensão do diâmetro dos furos ao longo da vida da ferramenta é atribuída ao progressivo desgaste da ferramenta (Santos, 1999). Essa tendência foi observada em todas as brocas revestidas.

Na usinagem dos furos sob velocidade de corte de 150m/min, foram observados valores dimensionais maiores quando comparado com velocidade de 80m/min. Tal fato foi comprovado por Castillo (2005), que observou maior instabilidade dimensional sobre maiores velocidades de corte.

As melhores qualidades de furo obtidas com as ferramentas testadas nas três condições de usinagem correspondem à ferramenta revestida com AlCr-based, as quais apresentaram pequenas dispersões sobre os diâmetros dos furos nas condições testadas com velocidade de corte de 80m/min e 150m/min.

5.6.3 Retilidade

Para as brocas em início de vida, pode-se observar melhores resultados de retilidade, independentemente do tipo de revestimento em ambas as situações de corte estudadas. Este comportamento foi observado também nos ensaios realizados sob velocidade de corte de 80m/min. Isto se deve ao fato do processo apresentar melhor estabilidade sob esta condição.

Observa-se também que o revestimento AlCr-based apresentou melhores valores sob este erro.

A figura 5.10 apresenta os resultados expostos.

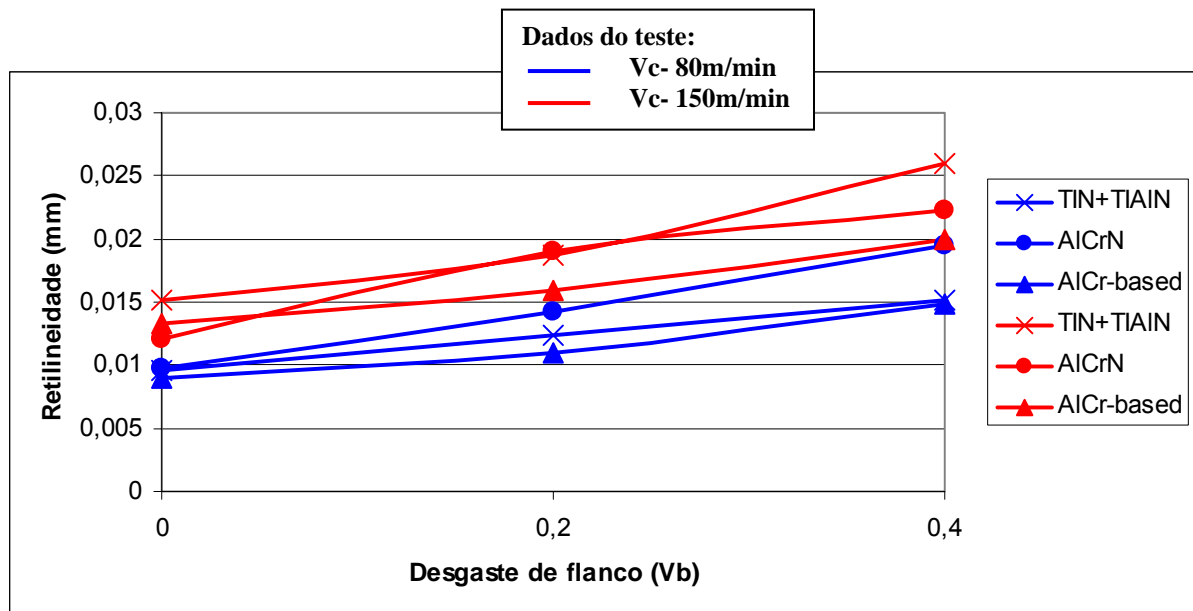


Figura 5.10: Diâmetro médio dos furos obtidos ao longo do desgaste de flanco.

5.7 Formação de rebarbas

Ao longo da realização dos ensaios foi observada também a formação de rebarbas. Este fato pode indicar fim de vida de uma ferramenta em linhas de usinagem, pois podem ser detectados facilmente pelo operador da máquina e também como critérios de qualidade de aceitação do produto fabricado.

Este por sua vez, não foi o critério adotado para fim de vida da ferramenta neste trabalho, assim, sendo feito o controle apenas de forma visual dos furos produzidos nas condições de início e fim de vida sob as duas condições testadas.

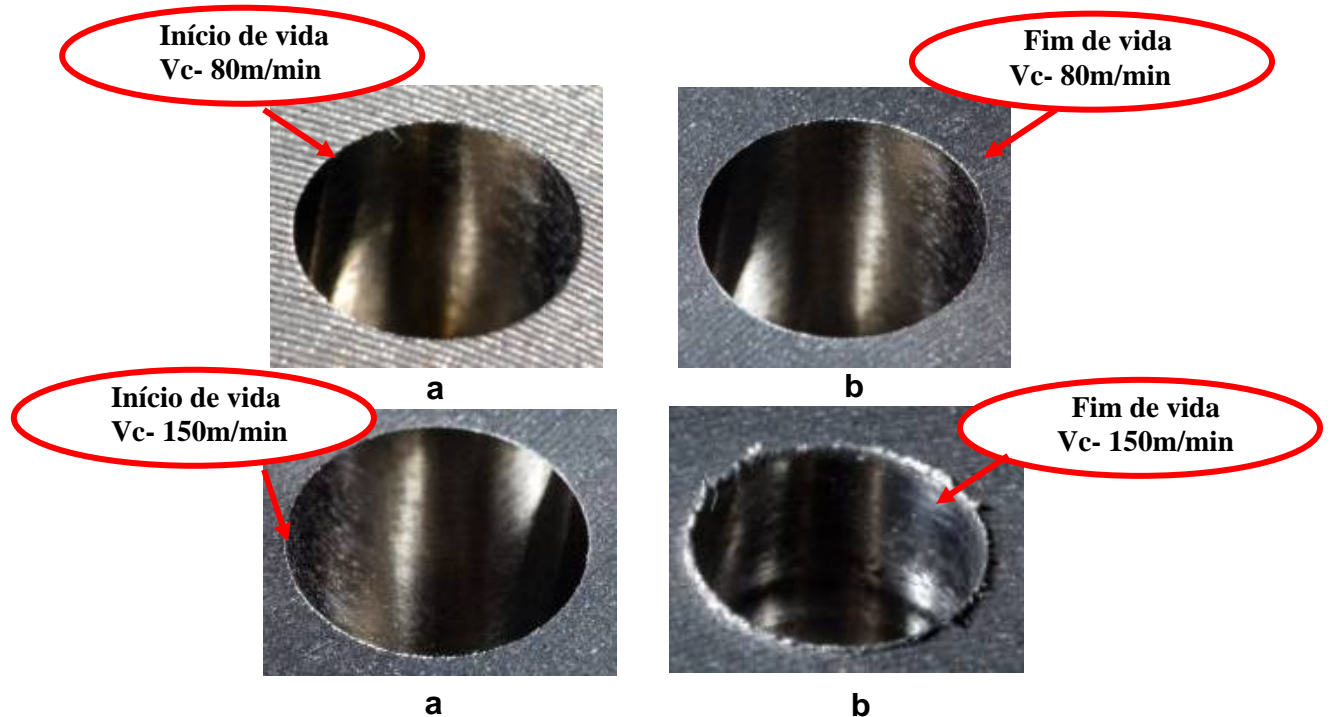


Figura 5.11: Formação de rebarbas na entrada dos furos nas condições de início e fim para o revestimento AlCr-based.

A figura 5.11 mostra a formação da rebarba na entrada dos furos usinados com a ferramenta revestida com o revestimento AlCr-based nas duas condições ensaiadas. Pode-se observar que no fim de vida sob velocidade de corte de 150m/min, os furos apresentam maior altura de rebarbas quando comparado com a mesma situação sob velocidade de corte de 80m/min. Ainda é possível observar que na usinagem sob velocidade de corte de 80m/min não ocorreu formação de rebarbas.

Este comportamento foi observado em todas as ferramentas ensaiadas, pode-se citar que ao ponto de vista do revestimento, estes não apresentam influência na formação da rebarba.

5.8 Análise do Cavaco

Como informação pertinente ao trabalho foi observado também a formação dos cavacos nas condições de início, meio e fim de vida da ferramenta, sob as duas condições de corte testadas. A figura 5.12 apresenta a análise de formação de cavacos. Observa-se a figura que os cavacos não apresentaram diferenças em função dos parâmetros de corte e seu estado de vida.



Figura 5.12: Análise da formação de cavacos nas condições de início e fim para os revestimentos ensaiados.

Desta forma, fica evidente que os revestimentos não apresentaram influência sobre os mecanismos de formação do cavaco.

5.9 Análise dos revestimentos

A fim de investigar o tipo de desgaste ocorrido nas ferramentas, foi realizada a caracterização do desgaste das ferramentas através da análise em MEV-microscópio eletrônico de varredura. Para está situação, foi necessário cortar as pontas de todas as brocas para que fosse possível seu posicionamento na câmara de vácuo do MEV. Foram analisadas as brocas testadas nas duas condições de corte, que detalham o flanco, com o objetivo de verificar o desgaste nesta região da ferramenta. Foi possível identificar os mecanismos de desgastes ocorridos nas ferramentas testadas; a adesão e abrasão estiveram presentes em todas as condições, como também em todas as ferramentas ensaiadas. O desgaste por adesão ocorre devido à ruptura de pequenas partículas do material usinado, posicionando ou unindo-se sobre a face da ferramenta. Essa união ocorre pela ação de forças elevadas ou devido à interação das superfícies do cavaco e face da ferramenta (Ferraresi, 1997). Foi observado que nos ensaios sob V_c de 150m/min, a ferramenta revestida com TIN+TIAlN apresentou o mesmo mecanismo de desgaste.

O desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície de elevada dureza desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo assim, diversas ranhuras sobre o material de dureza menor. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste geralmente soltas (Harris, 2003).

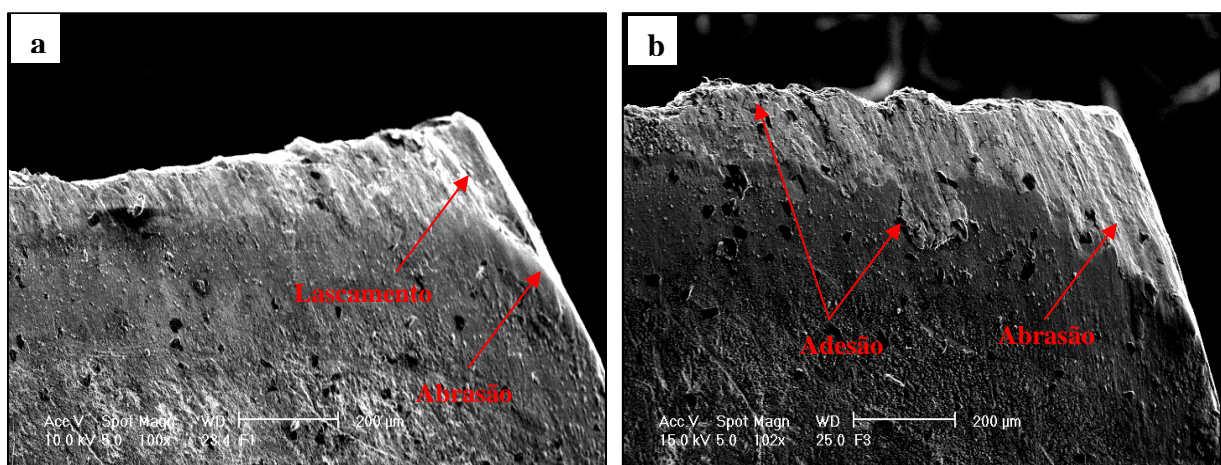


Figura 5.13: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com TIN+TIAlN: a) Ensaios realizados com V_c de 80m/min; b) Ensaios realizados sob V_c de 150m/min.

Na figura 5.13 observa-se pequenos lascamentos na quina da broca revestida com TIN+TIAIN, utilizada nos ensaios sobre Vc de 80m/min. Pode-se afirmar que as interrupções do processo proporcionam condições severas de usinagem, principalmente na entrada e na saída do furo, podendo produzir lascamentos em ferramentas de metal-duro.

Analisando o revestimento AlCrN, foi possível observar os mesmos mecanismos de desgaste observado na ferramenta TIN+TIAIN, porém, com uma intensidade de desgaste e uma área afetada menor. Para os ensaios realizados sob uma Vc de 80m/min, observa-se o desgaste abrasivo e também a presença de adesão de material. Pode-se afirmar que o fato do desgaste abrasivo ser menor quando comparado com o revestimento TIN+TIAIN, é devido ao revestimento possuir uma dureza a quente maior, suportando a maiores temperaturas geradas pelo processo de corte.

A figura 5.14 apresenta a estrutura dos materiais usinados sob velocidade de corte maior. Pode-se observar sinais de desgaste na forma de cratera na superfície da quina da broca. Este desgaste pode ser caracterizado pela formação de um canal ou uma cratera na quina da ferramenta onde o cavaco está escoando, que tem como origem a fusão do material da ferramenta.

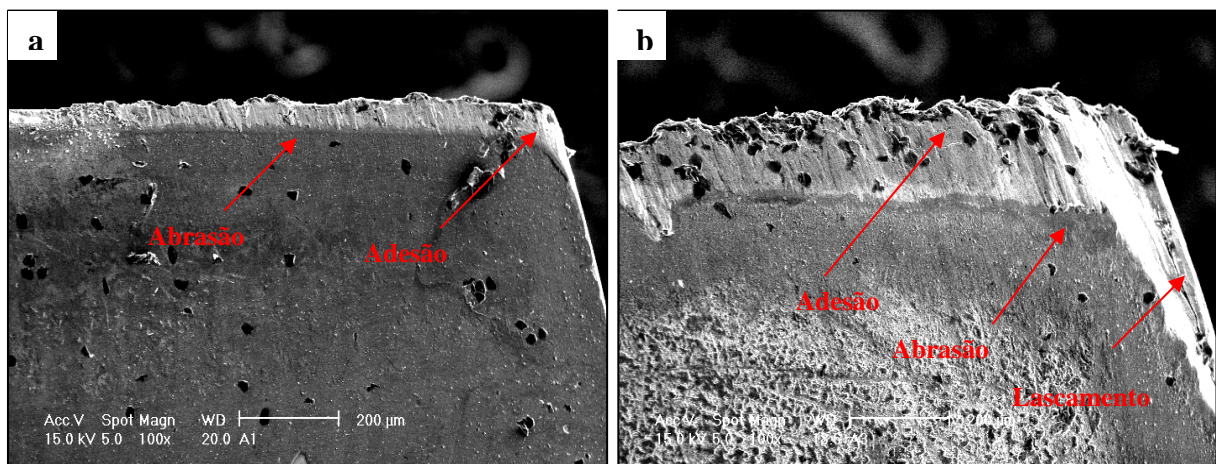


Figura 5.14: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com AlCrN: a) Ensaios realizados sob Vc de 80m/min; b) Ensaios realizados sob Vc de 150m/min.

A figura 5.15 apresenta as imagens obtidas das ferramentas revestidas com o revestimento AlCr-based. Observa-se que houve um pequeno desgaste abrasivo nas duas condições testadas. As brocas apresentaram um comportamento de desgaste maior em relação às demais brocas. Porém analisando apenas o desgaste de flanco

percebe-se que a ferramenta, mostrou um comportamento evolutivo do $VB_{\text{máx}}$, com uma tendência constante, até atingir o final de vida.

A presença do desgaste por abrasão se dá porque, com o passar do tempo, o material aderido juntamente com o atrito na interface peça-ferramenta, resulta na remoção da camada de revestimento de forma progressiva, intensificando assim, o desgaste sobre o substrato, face e flanco da ferramenta. Desta forma, a ferramenta torna-se mais suscetível à ação da abrasão e a solicitações térmicas. Além disso, ocorre o aumento do consumo de energia para o corte e piora da qualidade da superfície usinada.

Pode-se observar também uma pequena quantidade de adesão de material nas duas condições ensaiadas. Este fato está relacionado as ferramentas possuírem alumínio em sua estrutura que, em altas temperaturas e em contato com o oxigênio cria uma camada de Al_2O_3 de elevada dureza protegendo a ferramenta contra a exposição a altas temperaturas de corte (Balzers, 2007).

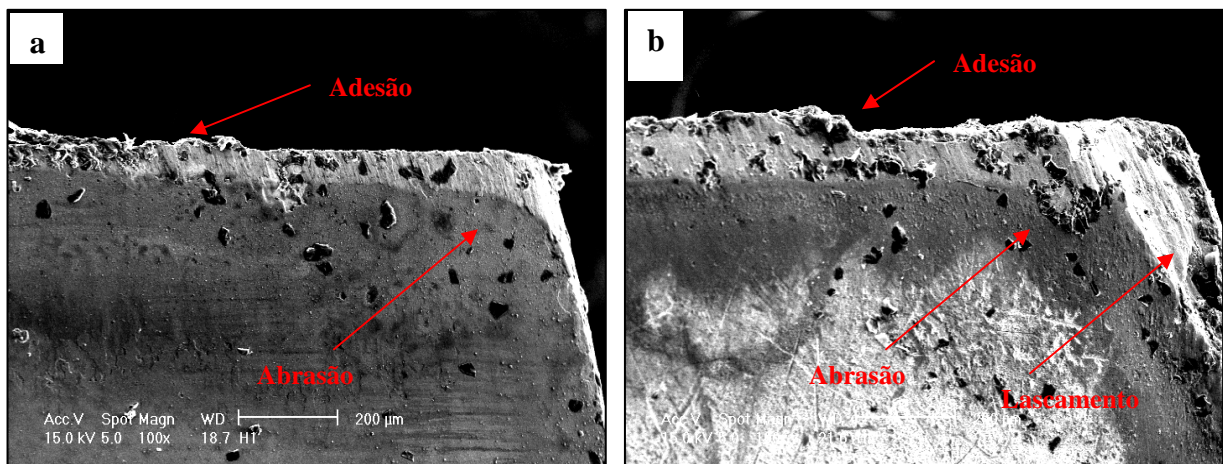


Figura 5.15: Análise do desgaste ocorrido nas ferramentas revestidas com AlCr-based: a) Ensaios realizados com V_c de 80m/min; b) Ensaios realizados sob V_c de 150m/min.

6. CONCLUSÕES

O trabalho avaliou a influência dos parâmetros de corte nos processos de furação do ferro fundido. No processo de furação do ferro fundido vermicular, os parâmetros de usinagem, o sistema de fixação peça e ferramenta, como também a rigidez da máquina, são fatores que podem gerar interferências nos resultados.

Com relação à vida da ferramenta, as brocas revestidas com TIN+TIAIN não são recomendadas para a furação do ferro fundido vermicular sob uma velocidade de corte de 80m/min, pois apresentaram baixo rendimento neste processo. Ferramentas revestidas com AlCrN ou a base de Cromo alumínio são recomendadas para este tipo de operação sobre baixas velocidade de corte, atingindo um rendimento de 2 vezes maior que brocas revestidas com TIN+TIAIN.

- Para velocidade de corte de 150m/min, o revestimento AlCrN apresentou o pior desempenho, pois, por ser um revestimento monocamada, durante a perda do revestimento, ocorre maior desgaste pela exposição do substrato.

- Altas taxas de velocidade de corte não são recomendadas para o processo de furação do ferro fundido vermicular, pois com o acréscimo da velocidade de corte aumenta-se o desgaste da ferramenta.

- A análise das forças aqui estudadas permitiu afirmar que existe pouca influência da variação da velocidade de corte sob os valores obtidos para a força de avanço e momento torçor. Porém, ao longo do desgaste da ferramenta, as forças de avanço como momento torçor apresentaram uma tendência de crescimento.

- Analisando a rugosidade superficial dos furos produzidos, a velocidade de corte apresenta influência sobre a qualidade da superfície, onde os valores de rugosidade (Ra) são inferiores aos obtidos com velocidades de corte menor. Com maior velocidade de corte, este acréscimo foi pouco notável. As condições de vida da ferramenta também apresentaram influência nos resultados de rugosidade da superfície sendo maiores em situação de fim de vida, independente da velocidade de corte utilizada. De maneira geral, a ferramenta revestida a base de Cromo Alumínio apresentou melhores valores de rugosidade da superfície nos ensaios sob as duas condições de corte.

- A circularidade mostrou pequenas variações em função dos parâmetros de corte. Desta forma conclui-se que o aumento da velocidade de corte tende ao aumento da circularidade. Observando os valores obtidos, as ferramentas revestidas em multicamadas apresentaram menores valores para o erro de circularidade. Com o desgaste da ferramenta, os erros de circularidade tendem a aumentar.

- As tolerâncias dimensionais dos furos são claramente influenciadas pelos parâmetros de corte. Com o aumento da velocidade de corte, o diâmetro do furo aumenta e, à medida que a velocidade de corte é aumentada, o diâmetro do furo torna-se maior. O diâmetro dos furos diminui com o desgaste das brocas, isto pode ser causado pela perda de revestimento e instabilidade do processo.

- A tolerância de retilidade apresentou melhores resultados com baixas velocidades de corte e em situação de início de vida da ferramenta. Este comportamento foi observado independentemente do tipo de revestimento. Os parâmetros de avanço de 0,1mm e velocidade de corte de 150m/min, contribuíram para o aumento dos esforços gerados durante a usinagem, resultando em vibrações e deformações que afetam de forma negativa nas tolerâncias de retilidade do furo.

- A formação de rebarba foi influenciada pelo aumento da velocidade de corte pelo desgaste da ferramenta. Em velocidades de corte menores não foi visualizada altura de rebarbas independente da vida da ferramenta. Este por sua vez poderia ser visualizado se os ensaios fossem continuados após o critério de fim de vida estabelecida no projeto.

- Ao analisar o desempenho dos revestimentos, via MEV, pode-se observar que todas as ferramentas apresentaram desgaste de abrasão e adesão em todas as condições ensaiadas.

- Foi possível observar também que para os ensaios realizados sob uma velocidade de corte de 150m/min, foi detectado a presença de microlascamentos da camada revestida.

- Conclui-se que ferramentas revestidas a Base de Cromo Alumínio são indicadas para a usinagem do Ferro Fundido vermicular CGI450 sob velocidade de corte de 80m/min, por apresentarem excelentes resultados de tempo de vida, rugosidade superficial, circularidade e retilidade.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com objetivo de prosseguir com outros estudos relacionados com a usinabilidade do ferro fundido vermicular, sugerem-se alguns temas:

- Estudo do processo de furação contínua do ferro fundido vermicular com brocas revestidas e utilização de refrigeração interna;
- Testar outras geometrias no processo de furação do ferro fundido vermicular, e novos revestimentos, tais como PCBN, WC/C.
- Análisar a da integridade da superfície ao longo do furo em diversas condições de corte;
- Realizar um comparativo da usinagem do vermicular com o cinzento, utilizando brocas de canais retos revestidas com TIN+TiAlN, AlCrN e AlCr-based;
- Analisar o comportamento dos revestimentos na usinabilidade do vermicular sob velocidade de corte de 100m e 120m/min;

8. BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, Cássio Luiz Francisco. 2005, **Análise da Furação do Ferro Fundido Vermicular com Brocas de Metal-Duro com Canais Retos Revestidas com TiN e TiAlN**, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina.

BALZERS. **Catálogos de produtos**. Disponível em: <<http://www.balzers.com.br>>. Acesso em: 31 de maio 2007.

BATES, C. E. **Study examines influences on machinability of iron castings**. **Modern Castings**, p. 36-39, out. 1996.

BORK, C. A. S. 1995. **Otimização de variáveis de processo para a furação do aço inoxidável austenítico DIN 1.4541**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina.

BOUZAKIS, K. D. Et al. **Failure Mechanisms of Physically Vapour Deposited Coated Hardmetal Cutting Inserts in Turning**. **Wear**, Cambridge, v 248, p 29-37, mar. 2001.

CASTILLO, W. J. G. 2005. **Furação Profunda do Ferro Fundido Cinzento GG25 com brocas de Metal-Duro com Canais Retos**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina.

COHEN, P. H.; VOIGT, R. C. e MARWANGA, R. O. **Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons**. In: AFS Casting Congress, 2000, Pittsburg. American Foundrymen's Society.

COROMANT, Sandvik. **Manual Técnico de Usinagem**. Sandvik Coromant, Technical editorial dept., Sweden, 2000.

DAWSON, S.; WÜRTEMBERG, J. M. von. **Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compactada Como Material para Componentes Automotivos**. IN: 26º Simpósio Internacional sobre Tecnologia Automotiva e Automação – ISATA, 1993, Aachen. **Anais...** Aachen: 1993.

DAWSON, S., et al. **The mechanical and physical properties of compacted graphite iron**. In: Global Powertrain Congress, 1998.

DAWSON, S., et al. **The effect of metallurgical Variables on the machinability of compacted graphite iron**. In: Design e Machining Workshop – CGI, 1999.

DAWSON, S. et al. **The effect of mettallurgical variabels on the machinability of Compacted Graphite Iron**. Society of Automotive Engineers, 2001 p.41-59.

DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Pratical Aplicattions for Compacted Graphite Iron**. AFS Transactions 2004 American Foundry Society, Des Plaines IL USA

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPINNI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. MM Editora. São Paulo: 2003.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1997.

GUESSER, L. W. e GUEDES, L. C. **Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística**. In: IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA, São Paulo, 1997.

GUESSER, W.; SCHROEDER, T. DAWSON, S. **Production Experience with Compacted Graphite Iron Automotiva Components.** In: AFS CASTING CONGRESS, 105, 2001, Dallas.

GUHRING TOOLS. **Blank de Metal duro.** Catálogo do produtos. Guhring Tools, 2007.

HAINSWORTH, S. V.; SOH, W. C. **The Effect the Substrate on the Mechanical propertie of TIN Coatings.** *Surface and Coatings Technology*. Elsevier, V. 163-164, p.515-520, 2003.

HARRIS S.G. et al. **A study of the wear mechanisms of TiAlN and TiAlCrN coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions.** Elsevier, *Wear*, v. 254, p. 723-734, 2003.

JINDAL, P. C. et al. **Performance of PVD TIN TiCN an TiAlN Coated Cemented Carbide Tools in Turning.** *International Jounarl of Refractory Metals and Hard Materials: Science Direct*, 1999.

KIM D., RAMULU M. **Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy steacks.** *Composite Structures*, v. 63, p. 101-114, 2004.

KONIG, W., KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, fräsen, bohren.** 5 ed. Berlin: Springer, 1997, 471 p.

KUDLA L. **Influence of feed motion features on small holes drilling process.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 109, p. 236-241, 2001.

LIM, S. C.; Lim, C. Y. H. **Effective use of coated tools – the wear - map approach.** *Surface and Coatings Technology*, v. 139, p. 127-134, 2001.

MACHADO, R. A.; Silva, M. B. **Usinagem dos Metais.** 4a versão. Uberlândia: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - UFU, p. 180-190, 1999.

MACHADO, R. A. **Tecnologia da usinagem de materiais endurecidos**. In: Curso de Especialização em tecnologia da Usinagem, Joinville; SOCIESC, IST. 2004.

MOCELLIN, F., 2002, **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em ensaios de Furação**. Tese de Mestrado Apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina.

NOVASKI, O. 1996. **Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais**. Tese de Livre Docência apresentado à universidade de Campinas.

REUTER, U. SCHULZ, H. Compact and bijou: The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome. **Engine Technology International**. V. 4, p. 58-60: 1999.

REUTER, Ulrich, et al. **The wear process of CGI cutting and machining developments**. In: Compacted Graphite Iron – Machining Workshop, 2000, Darmstadt, Germany.

SAHM, A.; ABEL, E. E.; SCHULZ, H.. **State of the art in CGI machining**”. In: **Compacted Graphite Iron – machining workshop**, 5., 2002. Darmstadt. Anais... Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002

SANTOS, C. S. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**. 1999. Dissertação de Mestrado apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Uberlândia.

SANTOS, S. C., 2002, **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**, Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia.

SCHROETER, Rolf Bertrand. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de geometria definida**: Curso Tecnologia de Usinagem I, 1998. 170

SINTERCAST. **Compacted graphite Iron**. Catálogo do produtos. SinterCast S.A, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I**. 5º ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte II**. 2º ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.

TEIXEIRA, C. 1995. **Influência dos erros geométricos de afiação nas brocas helicoidais de aço rápido na qualidade dos furos produzidos**. Tese de mestrado apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina.

XAVIER, F. A. 2003. **Aspectos Tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. Tese de mestrado apresentado a universidade federal de Santa Catarina.

WERTHEIM, R. **Develoment of CGI cutting materials**. In: Compacted Graphit – Machining Workshop, 5., 2002. Darmstadt. Anais... Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.