

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Leonardo Monteiro Barbosa**

**Pesquisa do Comportamento da Broca Chamdrill  
durante sua vida útil na usinagem do Ferro Fundido  
Cinzento GG 25**

**Taubaté - SP**  
**2006**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Leonardo Monteiro Barbosa**

**Pesquisa do Comportamento da Broca Chamdrill  
durante sua vida útil na usinagem do Ferro Fundido  
Cinzento GG 25**

**Dissertação apresentada para obtenção do  
Certificado de Título de Mestre pelo Curso de  
Mestrado em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.**

**Área de Concentração: Materiais e Processos  
de Fabricação**

**Orientador: Prof. Dr. Gilberto W. A. Miranda**

**Taubaté - SP**  
**2006**

B238p

Barbosa, Leonardo Monteiro.  
Pesquisa do Comportamento do broca Chamdrill na  
usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG 25./ Leonardo Monteiro  
Barbosa. – Taubaté: Unitau, 2006.

106 f. :il;30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de  
Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Materiais e  
Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda.

1. Furação. 2. Força de avanço. 3. Desgaste. I. Universidade  
de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 621.6

**LEONARDO MONTEIRO BARBOSA**

**PESQUISA DO COMPORTAMENTO DA BROCA CHAMDRILL DURANTE SUA VIDA  
ÚTIL NA USINAGEM DO FERRO FUNDIDO CINZENTO GG 25**

Dissertação apresentada para obtenção do  
Certificado de Título de Mestre pelo Curso de  
Mestrado em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Materiais e Processos  
de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Gilberto W. A. Miranda

Data: \_\_\_\_\_

Resultado \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Universidade \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais José e Cláudia pelo esforço que tiveram na minha educação.

À Renata, minha esposa pela ajuda e compreensão durante a realização deste.

Aos meus irmãos Leandro, Leopoldo, Larissa, Lariane e Lucas um exemplo de trabalho; e à minha avó Filomena (in memoriam) que nunca esquecerei.

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus pela força que me deu para realizar este trabalho.

À minha esposa pela compreensão e apoio durante a realização deste.

Ao Professor Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda pela orientação.

À empresa Iscar do Brasil, pela cessão das ferramentas utilizadas, bem como do espaço e máquinas para realização de parte deste trabalho.

Aos colaboradores da Iscar do Brasil que me incentivaram e apoiaram durante todo este tempo, em especial aos grandes amigos Éderson Soares Marretto do Centro Tecnológico de Usinagem e Adriano de Oliveira do Laboratório de Metrologia, que despenderam horas de suas folgas para me auxiliar na preparação das amostras, ferramentas, ensaios e medições.

Aos docentes, funcionários e pesquisadores do Laboratório de Usinagem da FATEC – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, em especial ao Prof. Dr. Marcelo Neublum Capuano e ao Instrutor Marcos Roberto Nascimento, que tiveram fundamental importância na realização deste trabalho cedendo o espaço e equipamentos para a realização dos ensaios experimentais, bem como na análise e preparação dos resultados obtidos.

*“Tudo vale a pena se a alma não é pequena”*

*Fernando Pessoa*

BARBOSA, Leonardo Monteiro. Pesquisa do Comportamento da broca Chamdrill durante sua vida útil na usinagem do Ferro Fundido Cinzento GG 25. 2006. 106f. Dissertação (Mestrado, Engenharia Mecânica – sub-área Materiais e Processos de Fabricação) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté.

## RESUMO

As empresas preocupadas em reduzir seus custos, buscam alternativas que possam torná-las mais competitivas. O aumento na vida útil da ferramenta proporciona um aumento de produtividade e redução nos custos do processo, desde que a qualidade do produto não seja alterada. Atualmente é conhecido que os operadores de máquinas possuem poucos recursos no “pé-da-máquina” para definir o fim de vida de uma ferramenta, utilizando-se de recursos pouco confiáveis como: lupa para verificar o desgaste da ferramenta; evolução do aumento da potência; acabamento superficial do produto, ruídos, vibrações e experiência adquirida, porém esses métodos não são muito confiáveis. Neste trabalho demonstrar-se-á um método de monitoramento da vida da ferramenta que seja confiável. Os testes foram realizados através do processo de furação do ferro fundido cinzento GG 25 sem a utilização de fluido de corte, utilizando uma broca com pastilha intercambiável de metal duro modelo Chamdrill, observando-se a evolução do desgaste da ferramenta. São apresentados gráficos mostrando o comportamento durante os ensaios da força de avanço, do torque e da corrente, em função da evolução do desgaste da pastilha. Durante todos os ensaios foram utilizados os mesmos parâmetros de corte, independentemente da evolução do desgaste, simulando assim uma condição de usinagem real na indústria. Os parâmetros de corte foram definidos através de pré-ensaios onde foram utilizados os dados de corte recomendados pelo fabricante da ferramenta, bem como valores superiores e inferiores na ordem de 20%, para verificar o comportamento do processo, pois sabemos que normalmente os dados de corte indicados pelo fabricante são bastante conservadores.

**Palavras chave:** *Furação, Ferro Fundido, Desgaste, Usinagem sem fluido de corte, Força de avanço, Torque.*

## ABSTRACT

Many companies worried in reduce their costs, are looking for alternatives to improve their competitiveness. The tool life's improvement offer a productivity increase and a process costs decrease, since the quality product doesn't be changed. Actually is known that the machine operators have few resources on the shop floor to define the end's tool life, making use of unreliable resources like: magnifying glass to check the tool's wear; cutting power increase; product's finishing surface, noise, vibrations and experience, however the methods mentioned aren't very trustful. This work will show a reliable method to monitoring the tool life. The tests were accomplished in the grey cast iron (GG 25) drilling process, without cutting fluid, making use of a drill with carbide interchangeable insert model Chamdrill, observing the tool's wear improvement. Graphics are presented showing the behavior during the tests of the: feed force, torque and current in relationship with the wear increase. During the tests were utilized the same cutting conditions, independent of the wear increase, simulating a real condition in the industry. The cutting conditions were defined by pre-tests where were used the recommended cutting conditions by the tool's manufacturer, just to check the process behavior, were increased and decreased 20% in the cutting data, because is known which normally the cutting conditions recommended by the tool's manufacturer are very conservatives.

**Key Words:** *Drilling, Cast Iron, Wear, Dry Machining, Feed Force, Torque.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Divisão dos processos de usinagem na indústria automobilística atual.....	17
Figura 2.1 – Partes de uma Broca Helicoidal (ABNT NBR 6176).....	23
Figura 2.2 – Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176).....	28
Figura 2.3 - Perfis das brocas helicoidais.....	29
Figura 2.4 – Desvio de circularidade (A).....	38
Figura 2.5 – Detalhe do alojamento da broca Chamdrill.....	40
Figura 2.6 – Flexibilidade para montagem de diversos diâmetros em um só corpo.....	40
Figura 2.7 – Ilustração da broca Chamdrill.....	41
Figura 2.8 – Foto do Corpo da Broca Chamdrill.....	41
Figura 2.9 – Ilustração da Pastilha da Broca Chamdrill.....	43
Figura 3.1 – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte Emulsionável.....	46
Figura 4.1 – Furação do bloco de ferro fundido para desgaste da pastilha.....	60
Figura 4.2 – Bloco de ferro fundido após uma bateria de furação.....	61
Figura 4.3 – Início do fresamento do bloco para uma nova bateria de furação.....	61
Figura 4.4 – Bloco fresado uma etapa anterior ao faceamento final.....	62
Figura 4.5 – Bloco totalmente fresado para uma nova bateria de furação.....	62
Figura 4.6 – Micrografia dos CP I.....	65
Figura 4.7 – Micrografia dos CP II.....	65
Figura 4.8 – Tarugo fundido.....	65
Figura 4.9 – Primeiro desbaste do tarugo.....	65
Figura 4.10 – Preparação da máquina para usinagem das amostras.....	66
Figura 4.11 – Corpos de Prova para ensaios.....	66
Figura 4.12 – Corpo de Prova furado após ensaio.....	67
Figura 4.13 – Principais características da Broca Chamdrill.....	67
Figura 4.14 – Esquema de ligação dos equipamentos.....	70
Figura 4.15 – Bancada de aquisição de dados.....	71
Figura 4.16 – Tela de plotagem AD8Bv2.....	72
Figura 4.17 – Foto da célula de carga.....	74

Figura 4.18 – Detalhe interno da célula de carga.....	74
Figura 4.19 – Calibração da célula de carga.....	75
Figura 4.20 – Foto do Rugosímetro portátil SurfTest SJ-201P.....	76
Figura 4.21 – Foto da Máquina de Medir Coordenadas Crysta-Plus M7106.....	77
Figura 5.1 – Gráfico do ensaio VB = 0,05 (1).....	79
Figura 5.2 – Gráfico geral do ensaio VB=0.....	80
Figura 5.3 – Foto do desgaste VB=0,05 (200x).....	81
Figura 5.4 - Gráfico geral do ensaio VB=0,05.....	81
Figura 5.5 – Foto do desgaste VB=0,10 (200x).....	82
Figura 5.6 – Gráfico geral do ensaio VB=0,10.....	82
Figura 5.7 – Foto do desgaste VB=0,15 (200x).....	83
Figura 5.8 – Gráfico geral do ensaio VB=0,15.....	83
Figura 5.9 – Foto do desgaste VB=0,20 (200x).....	84
Figura 5.10 – Gráfico geral do ensaio VB=0,20.....	84
Figura 5.11 – Tensão e Corrente em função do VB.....	85
Figura 5.12 – Comportamento do momento torsor em função do VB.....	86
Figura 5.13 – Comportamento da força de avanço em função do VB.....	87
Figura 5.14 – Diâmetro efetivo em função do desgaste frontal.....	90
Figura 5.15 – Erro de circularidade em função do desgaste frontal.....	91
Figura 5.16 – Rugosidade média em função do desgaste frontal.....	92
Figura 6.1 – Grandezas diretas em função do desgaste frontal.....	95
Figura 6.2 – Grandezas indiretas em função do desgaste frontal.....	96
Figura 6.3 – Foto do corpo de prova com quebra de borda.....	97

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Propriedades dos revestimentos.....	31
Tabela 2.2 - Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ABNT.....	52
Tabela 2.3 - Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ASTM.....	53
Tabela 2.4 – Evolução das Ferramentas.....	54
Tabela 4.1 – Resultado dos pré-ensaios.....	59
Tabela 4.2 – Composição química dos corpos de prova.....	64
Tabela 4.3 – Dureza Brinell dos corpos de prova.....	64
Tabela 4.4 - Característica da célula de carga.....	73
Tabela 4.5 – Características de leitura do Rugosímetro SJ-201P.....	76
Tabela 5.1 – Resultados agrupados para grandezas diretas (1ª pastilha).....	78
Tabela 5.2 – Resultados agrupados para grandezas diretas (2ª pastilha – Réplica).....	79
Tabela 5.3 – Medidas Indiretas.....	87
Tabela 6.1 – Resultados conclusivos das grandezas diretas.....	93

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1 O Processo de Furação.....	20
2.1.1 Classificação das Brocas Quanto à Forma e Aplicações.....	24
2.1.1.1 Brocas de Uso Geral.....	24
2.1.1.2 Brocas para Uso em Condições Severas.....	24
2.1.1.3 Broca Helicoidal.....	24
2.1.1.4 Brocas com Ângulo de Hélice Reduzido.....	24
2.1.1.5 Brocas com Ângulo de Hélice Elevado.....	24
2.1.1.6 Brocas com Canais Internos para Injeção de Fluido de Corte.....	25
2.1.1.7 Brocas com Comprimento de Hélice Reduzido.....	25
2.1.1.8 Brocas com mais de Dois Canais.....	25
2.1.1.9 Brocas com Hélice à Esquerda.....	25
2.1.1.10 Brocas de Centro.....	25
2.1.1.11 Brocas Canhão.....	26
2.1.1.12 Brocas Espada.....	26
2.1.2 Geometria das Brocas.....	26
2.1.3 Perfis das Brocas Helicoidais.....	28
2.1.3.1 Perfil do tipo I.....	29
2.1.3.2 Perfil do tipo II.....	29
2.1.3.3 Perfil do tipo III.....	30
2.1.4 Revestimentos de Ferramentas.....	30
2.1.4.1 Desenvolvimento de Novos Revestimentos para Ferramentas.....	32
2.1.5 Fatores importantes na Seleção de Brocas.....	33
2.1.5.1 Conjunto Máquina / Elementos de fixação.....	33
2.1.5.2 Características da peça.....	34
2.1.5.3 Qualidade do furo usinado.....	34
2.1.5.3.1 Tolerâncias Dimensionais.....	34
2.1.5.3.2 Medidas.....	35

2.1.5.3.3	Diferenças ou Afastamentos.....	35
2.1.5.3.4	Tolerância.....	35
2.1.5.3.5	Tolerâncias Geométricas.....	36
2.1.5.3.6	Desvios de Forma.....	36
2.1.5.3.7	Desvios de posição.....	37
2.1.5.3.8	Tolerância de Circularidade.....	37
2.1.5.3.9	Rugosidade.....	38
2.1.5.3.10	Sistemas de Medição de Rugosidade.....	38
2.1.5.3.11	Desvio médio aritmético Ra.....	39
2.1.6	A Broca Chamdrill.....	39
2.1.6.1	Material do corpo da ferramenta.....	41
2.1.6.2	Material da pastilha.....	42
2.2	Fluidos de Corte.....	44
2.2.1	Classificação dos fluidos de corte.....	44
2.2.2	Restrições à utilização do fluido de corte.....	45
2.2.2.1	Danos à Saúde Humana.....	45
2.2.2.2	Custos Operacionais.....	45
2.2.2.3	Problemas Ambientais.....	46
2.2.2.4	Descarte do Fluido de Corte.....	46
2.2.2.5	Legislação.....	46
2.2.3.	Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL).....	47
2.3	O Ferro Fundido Cinzento.....	49
2.3.1	Classificação dos ferros fundidos.....	49
2.3.2	Classificação dos ferros fundidos cinzentos.....	51
2.3.3	A Usinabilidade do ferro fundido cinzento.....	53
2.3.3.1	Ferramentas para usinagem do ferro fundido cinzento.....	54
<b>3</b>	<b>PROPOSIÇÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>58</b>
4.1	Planejamento Experimental.....	58
4.1.1	Definição dos dados de corte para os ensaios.....	58
4.1.2	Preparação das pastilhas para os ensaios.....	59

4.1.3 Metodologia dos ensaios.....	62
4.2 Codificação dos ensaios.....	63
4.3 Material dos corpos de prova.....	64
4.4 Ferramenta.....	67
4.5 Equipamentos e Instrumentos.....	68
4.5.1 Equipamentos utilizados para pré-ensaios e preparação das amostras.....	68
4.5.2 Máquina utilizada nos ensaios.....	69
4.5.3 Sistema para Aquisição de Dados.....	69
4.5.4 Placa de aquisição de dados.....	71
4.5.5 Dados de alimentação da máquina.....	73
4.5.6 Força de avanço e momento torsor.....	73
4.5.7 Calibração dos equipamentos.....	75
4.5.8 Aquisição dos valores das Grandezas indiretas.....	75
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>78</b>
<b>6 DISCUSSÃO.....</b>	<b>93</b>
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>98</b>
7.1 Conclusões.....	98
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	99
<b>Referências.....</b>	<b>100</b>
<b>Anexo A.....</b>	<b>104</b>
<b>Anexo B.....</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente os operadores de máquinas tem poucos recursos no “pé-da-máquina” para definir o fim de vida de uma ferramenta, utilizando recursos pouco confiáveis ou de difícil utilização, como:

1. Lupa para verificar a evolução do desgaste da ferramenta;
2. Aumento da potência consumida;
3. O acabamento superficial do produto após a usinagem;
4. A experiência adquirida, ruídos, vibrações.

Porém nem sempre a instrução para utilização de lupa para verificar o desgaste da ferramenta é utilizada, além de existirem operações onde o acesso à ferramenta para essa verificação é restrito. Nem todas as máquinas possuem potenciômetro, e ainda que possuam, cada vez mais operadores multi-função têm que desenvolver outras atividades durante a usinagem, ficando impossibilitado de verificar a potência consumida durante a usinagem. O acabamento superficial pode levar o operador da máquina ao erro, pois o desgaste pode ser repentino, não sendo notado durante as trocas do produto na máquina.

A evolução deste desgaste determina a vida da ferramenta e foi definida por Diniz et al. (2000) como sendo o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos) até perder a sua capacidade de corte dentro de um critério previamente estabelecido.

Vários parâmetros influenciam a vida da ferramenta, porém a velocidade de corte é o principal, posteriormente tem-se o avanço e como terceiro parâmetro a profundidade de corte, que no caso da furação é constante. Outros parâmetros, embora secundários, tais como: temperatura, vibração do conjunto ferramenta peça e fatores externos ao processo, como tipo de material, dureza, vazão e tipo de fluido de corte, influenciam na vida da ferramenta (CAPUANO, 2004).

É sabido que dos três processos de usinagem mais tradicionais (fresamento, torneamento e furação), este último é o menos estudado, mesmo com o desenvolvimento de novos tipos e geometrias de brocas, bem como de materiais pelos fabricantes das mesmas.

Vale destacar a importância de se estudar esta operação já que, segundo levantamentos da empresa Iscar Ltd, ela é responsável por 34% do tempo consumido em usinagem pela indústria

automobilística, sendo inclusive um pouco superior ao tempo gasto com torneamento, que fica na ordem de 26% (Figura 1.1). (Fonte: Levantamento do Depto Automobilístico da empresa Iscar Ltd.).

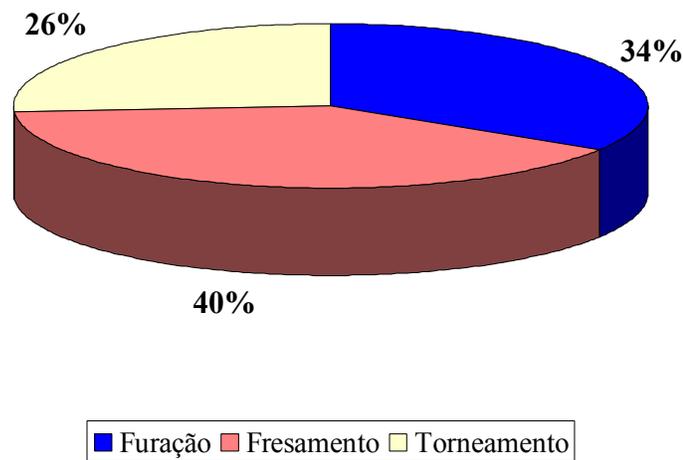


Figura 1.1 – Divisão dos processos de usinagem na indústria automobilística atual

Porém, devido ao fato de máquinas com altas potências durante a usinagem, boa rigidez e altas rotações, serem uma realidade recente no mercado nacional, aliado ao fato da geometria complexa da broca aumentar o tempo para desenvolvimento de novos materiais e revestimentos para a mesma, fez com que poucos estudos sobre esta operação tenham sido feitos até pouco tempo atrás.

Com a evolução das máquinas CNC, hoje é possível ter no chão de fábrica máquinas de pequeno porte, que não custam muito, mas que podem trabalhar em altas rotações. Com essas novas máquinas, foram possíveis evoluções no processo de furação, como: (SANTOS, 1999)

- ⇒ Otimização dos parâmetros de corte
- ⇒ Variação da geometria das brocas
- ⇒ Desenvolvimento de revestimentos para brocas
- ⇒ Desenvolvimento de novos materiais para fabricação de brocas

Apesar de as linhas de evoluções serem distintas como mostrado anteriormente, é possível

a associação de duas ou mais delas.

Também tem-se observado a grande quantidade de trabalhos publicados recentemente sobre a necessidade da não utilização de fluido de corte na usinagem, como os de Santos (1999), Schroeter et al. (2000), Yang et al. (2002), Miranda (2003) e Capuano (2004), devido aos diversos transtornos que estes trazem como: danos à saúde humana, problemas ambientais, altos custos operacionais e legislações cada vez mais rígidas.

Uma alternativa ao uso de fluido de corte em casos onde seja necessária lubrificação durante a usinagem, a utilização da mínima quantidade de lubrificação (MQL) é uma solução que tem se mostrado bastante eficiente.

A usinagem sem fluido de corte tem sido possível em função do desenvolvimento de máquinas com potência e rigidez maiores, altas rotações e, principalmente, pelo grande desenvolvimento dos materiais, revestimentos, e geometria das ferramentas de corte.

O ferro fundido cinzento é seguramente um dos materiais mais empregados na indústria metal-mecânica, principalmente no segmento automotivo, em peças que requerem boa resistência mecânica, resistência ao desgaste e capacidade de amortecimento, além de ser considerado um material de boa usinabilidade.

O objeto de estudo deste trabalho é o processo de furação do ferro fundido cinzento GG 25, sem a utilização de fluido de corte, utilizando uma broca com pastilha intercambiável de metal duro modelo Chamdrill.

Durante os ensaios foram utilizados os mesmos dados de corte, independente da evolução do desgaste, simulando assim uma condição de usinagem real da indústria. Estes dados de corte foram definidos através da metodologia indicada no capítulo 5.

Para poder atingir os objetivos descritos, este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: Introdução
- Capítulo 2: Revisão da Literatura
- Capítulo 3: Proposição
- Capítulo 4: Método
- Capítulo 5: Resultados
- Capítulo 6: Discussão

- Capítulo 7: Conclusões

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O PROCESSO DE FURAÇÃO

Furação é um processo mecânico de usinagem, utilizado para a obtenção de uma superfície cilíndrica circular interna, sendo esta coaxial com o eixo de rotação do movimento de corte. Esta rotação pode ser tanto da peça quanto da ferramenta, e simultaneamente uma delas se desloca segundo uma trajetória retilínea coincidente ou paralela ao eixo de rotação da máquina. (NOVASKI, 1996)

O processo de furação é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria manufatureira. A grande maioria das peças de qualquer tipo de indústria tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena dessas peças, já vêm com o furo pronto do processo de obtenção da peça bruta (fundição, forjamento, etc.).

Além disso, a furação é considerada o processo mais barato para obtenção de furos na maioria das operações realizadas. A aplicação de outros processos só se justifica no caso da operação apresentar características que não podem ser atendidas pelo processo tradicional de furação.

O processo de furação pode ser classificado em (FERRARESI, 2003):

- **Furação em Cheio**

Processo destinado à obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, onde todo o material contido no volume do furo é retirado na forma de cavaco.

- **Escareamento**

Processo que tem por objetivo a obtenção de um furo cilíndrico em uma peça previamente furada.

- **Furação Escalonada**

Processo que tem por objetivo a geração de furos com dois ou mais diâmetros distintos.

- **Furação de Centros**

Processo que visa a obtenção de furos de centros, que têm por objetivo facilitar a fixação

da peça para operações posteriores.

- **Trepanação**

Processo de furação onde apenas uma parte do material contido no volume do furo, localizado próximo à circunferência que delimita o furo, é removido. Um núcleo permanece maciço após a operação.

Apesar da importância já demonstrada anteriormente, este processo recebeu poucos avanços até alguns anos atrás, enquanto que os demais processos tiveram grandes avanços, principalmente com a introdução de novos produtos para ferramentas, como metal duro, cerâmica, CBN (nitreto cúbico de boro), PCD (diamante sintético). Na furação o material mais empregado ainda é o aço rápido (aço ferramenta composto essencialmente de molibdênio, tungstênio, carbono, vanádio, cobalto e cromo).

O principal motivo deste atraso se deve ao fato de que para utilizar os mesmos dados de corte que são empregados nos demais processos são necessárias máquinas com altas rotações, já que a maioria dos furos usinados na indústria são de pequenos diâmetros (entre 8 e 12mm), porém com a evolução do parque fabril nacional com a crescente evolução da utilização de Centros de Usinagem e Centros de Furação é cada vez mais crescente a utilização de novos materiais e revestimentos em brocas helicoidais, bem como a utilização de brocas com pastilhas intercambiáveis. (DINIZ et al, 2000).

A máxima profundidade de furação com broca helicoidal em execução normal é da ordem de 4 à 10xD (o comprimento tendo uma relação de 4 à 10 vezes em relação ao diâmetro); quando a profundidade do furo ultrapassa 4xD, torna-se necessária uma parada freqüente e retorno da broca para facilitar a saída do cavaco. Para estas furações, recomenda-se utilizar outros tipos de ferramentas, próprias para estes casos.

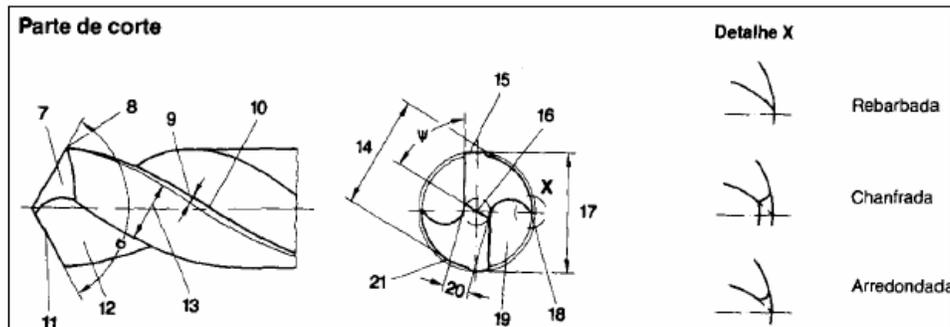
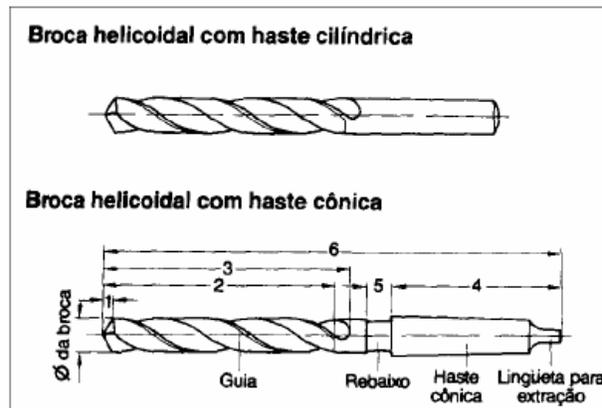
Para furos de até 20mm de diâmetro com brocas helicoidais comuns, a recomendação dos fabricantes julga ser dispensável o uso de pré-furação, levando-se em conta que as qualidades dos furos obtidos são da ordem de IT 11. Nos furos acima de 20 mm, recomenda-se utilizar pré-furação, a fim de se diminuir a força de avanço e conseqüentemente diminuir o esmagamento do material pela aresta transversal. (MIRANDA, 2003).

É importante salientar que os furos obtidos através do processo de furação têm em sua grande maioria a qualidade IT 11, porém com a utilização de brocas de metal duro em máquinas

modernas com altas rotações e boa rigidez já é possível a obtenção de furos com qualidade IT 9.

O sistema de tolerância designado acima como IT (ISO Tolerance) define, para cada medida nominal, dezoito graus de tolerância, que recebem a denominação de tolerâncias fundamentais e cada grau é denominado qualidade de trabalho. As normas que tratam dos desvios dimensionais definem um valor para IT para cada grupo de dimensões.

Existem vários tipos de brocas, porém a broca helicoidal é certamente a ferramenta de furação mais utilizada. As diversas partes de uma broca helicoidal estão apresentadas na Figura 2.1 (NBR 6176, 1977).



- |                                 |                                    |                                     |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Comprimento da ponta          | 10 Aresta secundária               | 19 Canal                            |
| 2 Comprimento utilizado         | 11 Aresta principal de corte       | 20 Espessura do núcleo              |
| 3 Comprimento do canal          | 12 Superfície de saída             | 21 Superfície secundária de folga   |
| 4 Comprimento da haste          | 13 Largura da sup secund, de folga |                                     |
| 5 Comprimento do rebaixo        | 14 Diâmetro da sup secund de folga | $\sigma$ Ângulo da ponta            |
| 6 Comprimento total             | 15 Guia                            |                                     |
| 7 Superfície principal de folga | 16 Aresta transversal              | $\psi$ Ângulo da aresta transversal |
| 8 Ponta de corte                | 17 Diâmetro da broca               |                                     |
| 9 Largura da guia               | 18 Quina                           |                                     |

Figura 2.1 – Partes de uma Broca Helicoidal (ABNT NBR 6176)

Estimativas mostram que o processo de furação é responsável por aproximadamente 40% de todo o material removido em operações de usinagem na indústria aeroespacial. (NOORI-KHAJAVI e KOMANDURI, 1995)

Também estima-se que somente nos Estados Unidos sejam utilizadas cerca de 250 milhões de brocas helicoidais ao ano (ERTUNC et al., 2000).

### **2.1.1 - Classificação das Brocas Quanto à Forma e Aplicações**

Atualmente, existe uma grande variedade de brocas disponíveis no mercado, sendo possível a obtenção de um mesmo furo através da utilização de mais de um tipo de broca.

Os vários tipos de broca podem ser divididos em dois grandes grupos de acordo com a dificuldade de execução do furo (ASM Metals Handbook, 1989):

#### **2.1.1.1 - Brocas de Uso Geral**

São as brocas mais utilizadas. Podem sofrer diversas alterações na geometria de corte da ferramenta para melhorar o desempenho da operação de acordo com a característica da operação.

#### **2.1.1.2 - Brocas para Uso em Condições Severas**

São ferramentas desenvolvidas para suportar elevadas tensões de torção e devem apresentar maior rigidez, comparadas às brocas de uso geral.

#### **2.1.1.3 - Broca Helicoidal**

A broca helicoidal apresenta grande versatilidade, baixo custo e possui uma grande faixa de diâmetros, o que as torna aplicáveis na usinagem dos aços, dos ferros fundidos e dos metais não ferrosos.

#### **2.1.1.4 - Brocas com Ângulo de Hélice Reduzido**

Este tipo de broca apresenta menor ângulo de hélice, comparado às brocas padrão. Essa característica tem por objetivo facilitar a penetração da ferramenta em materiais como o latão, plásticos e outros materiais macios, além de aumentar o espaço para comportar os cavacos. Este tipo de broca foi projetado com o objetivo de promover a quebra dos cavacos no interior de peças pequenas e apresenta grande eficiência em aplicações onde há geração de grande volume de cavaco.

#### **2.1.1.5 - Brocas com Ângulo de Hélice Elevado**

Ao contrário das brocas apresentadas na seção anterior, este tipo de broca possui valores de ângulo de hélice maiores que os das brocas padrão. Apesar de serem recomendadas para a furação de metais não ferrosos, este tipo de broca vem sendo usado na furação de aços carbono,

aços liga e aços inoxidáveis. A geometria da broca facilita a remoção de cavaco, o que a torna mais eficiente em relação à broca padrão para a execução de furos profundos, principalmente em aplicações que requerem altas taxas de avanço.

#### **2.1.1.6 - Brocas com Canais Internos para Injeção de Fluido de Corte**

Os canais que atravessam a broca, têm por objetivo permitir a injeção de fluido de corte a alta pressão na região de corte, o que promove a retirada de cavacos, impedindo que estes venham a obstruir a saída do furo e causar danos à sua superfície interna. Esses canais internos podem ser longitudinais (para brocas de afiação longitudinal) ou em hélice (para brocas helicoidais).

#### **2.1.1.7 - Brocas com Comprimento de Hélice Reduzido**

A redução do comprimento da hélice em relação ao diâmetro tem por objetivo elevar a resistência da ferramenta, sem prejudicar as suas propriedades de corte. Este tipo de broca é indicado para máquinas multioperacionais e para equipamentos portáteis, na usinagem de materiais de elevada dureza ou tenacidade.

#### **2.1.1.8 - Brocas com mais de Dois Canais**

Este tipo de broca possui de três a seis cunhas de corte. São utilizadas no alargamento de furos, podendo também ser adotadas em operações com alta taxa de remoção de cavaco, gerando superfícies rugosas, que devem passar posteriormente por processos de acabamento.

As brocas com mais de dois canais são empregadas em casos onde a saída dos furos é irregular, por garantirem a maior estabilidade do processo.

#### **2.1.1.9 - Brocas com Hélice à Esquerda**

Possuem a mesma forma construtiva das brocas helicoidais. A principal aplicação deste tipo de ferramenta ocorre quando se utilizam máquinas multiprocessos cujo eixo gira em sentido inverso ao normal.

#### **2.1.1.10 - Brocas de Centro**

Utilizadas para gerar furos em peças de forma cilíndrica, que têm por finalidade facilitar a

fixação das peças para posteriores operações de usinagem, ou ainda facilitar a penetração de brocas em operações adversas, como furos em superfícies inclinadas.

#### **2.1.1.11 - Brocas Canhão**

Aplicadas na execução de furos horizontais e verticais profundos. Possuem um canal em “V” e a região de corte é afiada de modo a formar dois ângulos de corte, que durante a furação geram dois cavacos que se quebram, facilitando assim a sua remoção. De um modo geral, essas brocas possuem canais internos para injeção de fluido de corte a alta pressão.

#### **2.1.1.12 - Brocas Espada**

A ponta da broca espada permite a fixação de pastilhas de metal duro através de um parafuso. Este tipo de broca é utilizada em furos com diâmetros de 25 a 152 mm. A usinagem de furos com diâmetro inferior a 25 mm é feita com brocas espada de metal duro integral.

### **2.1.2 - Geometria das Brocas**

A broca helicoidal, é normalizada de acordo com suas características construtivas e geométricas.

Em função das suas características construtivas e aplicação na usinagem dos materiais, as brocas helicoidais possuem três tipos de hélice normalizados (DIN 1836, 1977).

- ⇒ *Tipo W*: de passo curto, recomendada para materiais que formam cavacos longos, tais como ligas de alumínio, magnésio, etc..;
- ⇒ *Tipo N*: de passo normal, recomendada para materiais mais comuns, como aços, ferros fundidos, e materiais similares;
- ⇒ *Tipo H* : de passo longo, recomendada para materiais que formam cavacos curtos, tais como ligas de cobre, ligas de zinco, borracha dura, baquelite e certos materiais plásticos.

Para a descrição dos ângulos empregados numa análise de brocas helicoidais, tratadas neste estudo, faz-se necessário a conceituação de alguns termos, apresentados na Figura 2.2.

- ⇒ *Parte de corte*: parte ativa da ferramenta formada pelas cunhas de corte com as respectivas arestas de corte.
- ⇒ *Cunha de corte*: é a cunha da ferramenta formada pela intersecção das superfícies de

saída e de folga. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta, formam-se os cavacos sobre a cunha de corte.

- ⇒ *Superfície de saída ( $A\gamma$ )*: é a superfície da cunha de corte, sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoia durante sua saída da região do trabalho de usinagem.
- ⇒ *Superfície principal de folga ( $A\alpha$ )*: é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem.
- ⇒ *Superfície secundária de folga ( $A'\alpha$ )*: é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém a sua aresta de corte secundária principal e que defronta com a superfície em usinagem secundária.
- ⇒ *Aresta principal de corte ( $S$ )*: é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície principal de usinagem.
- ⇒ *Aresta secundária de corte ( $S'$ )*: é a aresta da cunha de corte observada formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície secundária de usinagem.
- ⇒ *Ponta de corte*: parte relativamente pequena da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas através de um chanfro (DINIZ et al., 2000).

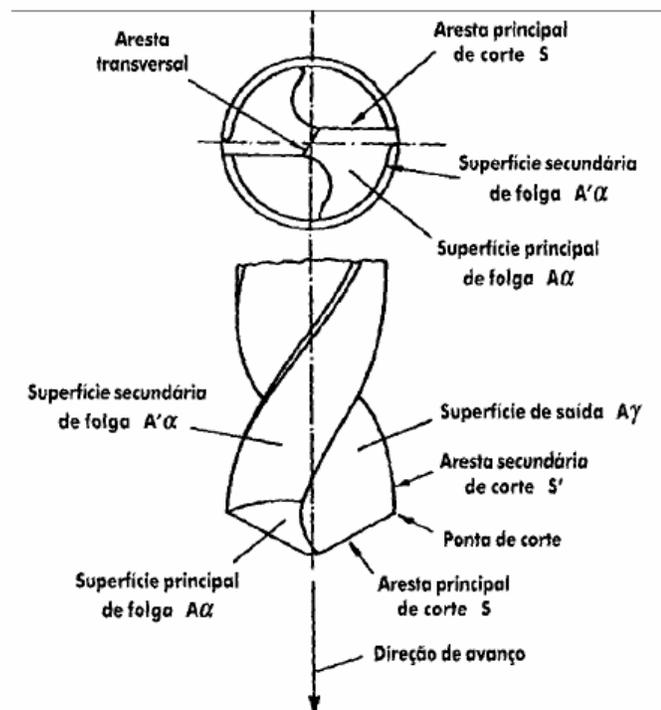


Figura 2.2 – Arestas e superfícies de corte de uma broca helicoidal (ABNT NBR 6176)

### 2.1.3 – Perfis das Brocas Helicoidais

Conforme Santos (1999), após análise sistemática das secções transversais utilizadas, classificamos 3 grupos de perfis (Figura 2.3). O primeiro grupo contém os perfis clássicos desenvolvidos ao longo de vários anos e que já são normalizados (DIN 1412, 1966; DIN 1414, 1977; DIN 1836, 1962).

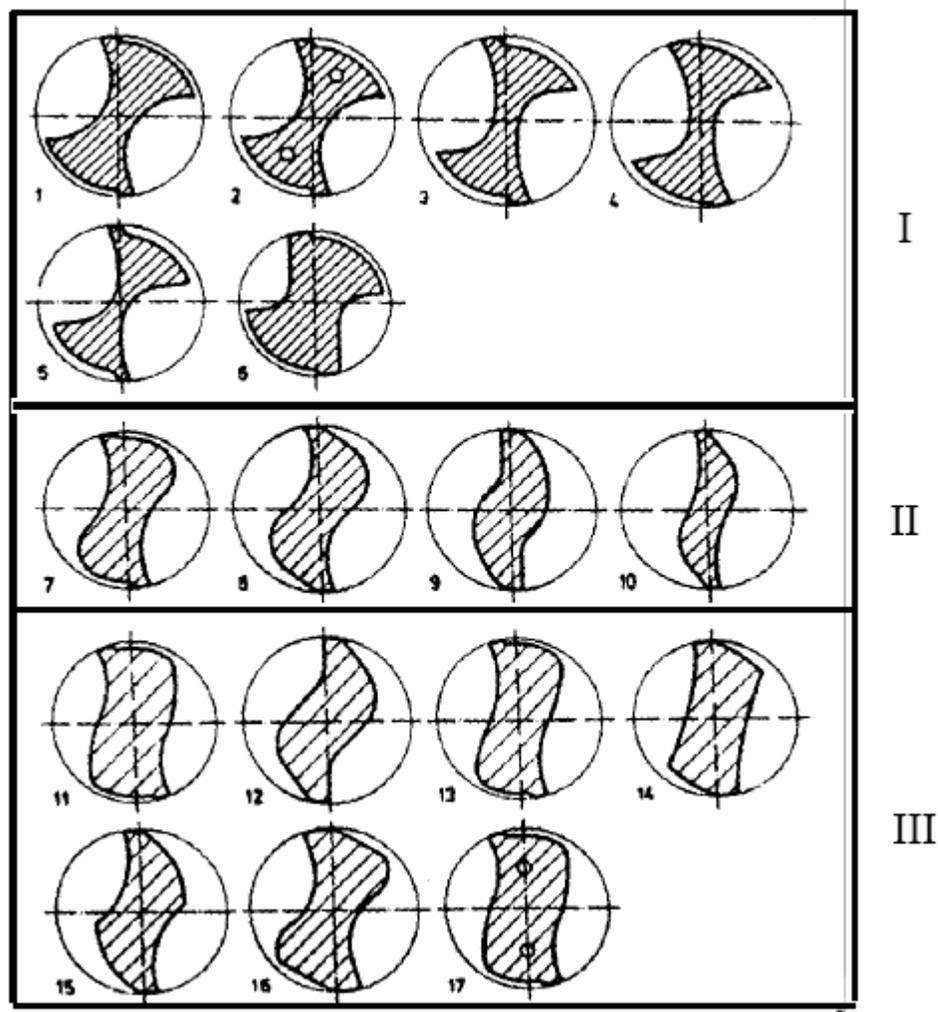


Figura 2.3 - Perfis das brocas helicoidais (Santos, 1999)

### 2.1.3.1 - Perfil do tipo I

Nestes perfis, verificam-se as seguintes características:

- ⇒ uma guia com largura entre  $0,0025$  e  $0,15d$ ;
- ⇒ diâmetro do núcleo entre  $0,08$  e  $0,2d$  e um aumento do diâmetro do núcleo no sentido da haste variando entre  $1,4$  e  $1,8$  mm em  $100$  mm;
- ⇒ uma secção transversal, que compreende entre  $35\%$  e  $45\%$  da secção total do círculo.

### 2.1.3.2 - Perfil do tipo II

É um desenvolvimento a partir do perfil I, com as seguintes características:

- ⇒ uma guia arredondada, que não permite determinar o diâmetro da superfície secundária de folga;

- ⇒ um núcleo mais reforçado, com diâmetro variando entre 0,2 e 0,28 x D;
- ⇒ uma guia bastante delgada, fazendo com que o atrito entre a guia e a parede do furo seja diminuída.

### **2.1.3.3 - Perfil do tipo III**

Tipo de perfil desenvolvido para furações difíceis. Suas principais características são:

- ⇒ perfil aproximadamente romboidal, limitado por curvas aproximadamente paralelas entre si;
- ⇒ núcleo extremamente reforçado, em tomo de 0,3 e 0,4 x D;
- ⇒ uma guia extremamente delgada, diminuindo o atrito entre a guia e a parede do furo.

### **2.1.4 - Revestimentos de Ferramentas**

Independentemente do desenvolvimento de novos materiais para confecção de brocas, o revestimento das ferramentas possibilita separar as propriedades da camada superficial das propriedades do substrato da ferramenta, e assim combinar livremente as propriedades. Essa característica é muito importante no processo de furação, já que permite que se tenha boas propriedades de resistência na periferia, através da deposição do revestimento e boa tenacidade no núcleo da ferramenta (GEY, 2006).

Com isso, o substrato da broca é responsável por minimizar os mecanismos de danos mecânicos, como fadiga de material, escoamento e deformação plástica, enquanto que a cobertura suprime mecanismos de danificação tribologicamente fundamentados como aderência, abrasão e difusão (GEY, 2006)

Além disso, os revestimentos atuam de duas formas importantes: como barreira térmica entre o material cortado (peça) e o material de corte (ferramenta), reduzindo o aporte térmico para o substrato da ferramenta. A outra é como camada lubrificante, reduzindo o coeficiente de atrito entre cavaco-ferramenta-peça e atuando também na redução do processo de adesão (MIRANDA, 2003).

Os revestimentos para as ferramentas de aço rápido foram desenvolvidos no início dos anos oitenta e desde o início, os revestimentos de nitreto de titânio (TiN) já permitiam a duplicação dos valores de avanço e velocidade de corte ou a quadruplicação da vida da ferramenta (CSELLE e BARIMANI, 1995). Em função das suas propriedades, os revestimentos

utilizados nas ferramentas de usinagem são classificados como endurecedores ou lubrificantes.

As camadas do primeiro tipo possuem dureza, freqüentemente superior a 2.500 HV (apenas a título de comparação, o metal duro tem dureza entre 1.500 e 2.000 HV). Essas camadas, além do reduzido desgaste por abrasão, proporcionam pouca adesão dos cavacos gerados na usinagem. Isto, por sua vez, leva à redução do desgaste por adesão, coeficiente de atrito e forças de corte (SCHULZ et al., 2000).

O desenvolvimento de revestimentos para ferramentas de furação tem sido bastante significativo nos últimos anos. Dados de 1991 indicam que mais de 50 % das brocas de aço rápido e de metal duro recebiam revestimento, sendo que metade delas eram revestidas com nitreto de titânio (CSELLE e BARIMANI, 1995).

As técnicas adotadas para a deposição de camadas de revestimento são a deposição química de vapor CVD (Chemical Vapour Deposition), a técnica de deposição física de vapor PVD (Physical Vapour Deposition) e a plasma-CVD.

A técnica CVD permite a deposição de camadas de TiC (carbeto de titânio), TiN, TiCN (carbonitreto de titânio), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio), ou a combinação entre elas. O revestimento pode consistir da deposição de mais de dez camadas. Este método é o mais utilizado e por isso considerado como padrão.

A camada de revestimento depositada pelo método PVD apresenta melhor tenacidade e com isso, são mais resistentes ao lascamento. O revestimento de brocas através desta técnica é limitado pela geometria complexa da ferramenta, o que torna esse método pouco usual. Na tabela 2.1 pode-se ver as principais propriedades dos revestimentos mais usuais.

Tabela 2.1 - Propriedades dos revestimentos (Schulz et al., 2000)

Tipo	Espessura típica (µm)	Microdureza HV 0.05	Resistência à oxidação (°C)	Coeficiente de atrito
TiN	1 à 5	2.100 à 2.600	até 450	0,4
TiCN	1 à 5	2.800 à 3.200	até 350	0,25 à 0,4
TiAlN	1 à 5	2.600 à 3.000	até 700	0,3 à 0,4
TiAlCrYn	1 à 5	2.600 à 3.000	até 900	0,3 à 0,4

Nas várias aplicações em usinagem, o revestimento das ferramentas tem tornado dispensável a utilização de fluidos de corte. A presença de uma camada de baixa condutividade

térmica e termicamente estável protege o núcleo da ferramenta das elevadas temperaturas atingidas na superfície. Porém, em alguns casos a utilização de fluido de corte ainda é indispensável, como na usinagem de materiais que geram cavacos longos e materiais tenazes, onde a utilização de fluido de corte promove a geração de superfícies com melhor acabamento.

Além do versátil revestimento de TiN, as brocas recebem também revestimentos de TiCN e TiAlN (nitreto de titânio-alumínio), que são indicadas para aplicações especiais (CSELLE e BARIMANI, 1995).

Ferramentas revestidas com TiCN, apresentam bom comportamento na usinagem de aços, tanto em ferramentas de aço rápido, quanto em ferramentas de metal duro. O revestimento é composto por múltiplas camadas sobrepostas, que impedem a propagação das trincas, o que faz com que as trincas originadas na superfície da ferramenta não atinjam o substrato. O revestimento de TiCN apresenta a desvantagem de não apresentar técnica disponível para a aplicação de novo revestimento, após a reafiação da ferramenta (CSELLE e BARIMANI, 1995).

O revestimento de TiAlN apresenta bom comportamento na usinagem de materiais abrasivos, tais como o ferro fundido e as ligas de Al-Si. A sua elevada resistência ao calor permite a usinagem sem refrigeração, mesmo em velocidades de corte elevadas. A sensibilidade à deformação desse tipo de revestimento o torna não recomendável para a usinagem de aços de alta tenacidade com brocas de aço rápido, pois os grandes esforços de torção e a conseqüente deformação da broca geram trincas na camada de revestimento. As ferramentas revestidas com TiAlN apresentam desgaste praticamente nulo, até o surgimento das primeiras trincas (CSELLE e BARIMANI, 1995).

#### **2.1.4.1 – Desenvolvimento de Novos Revestimentos para Ferramentas**

Os revestimentos para ferramentas têm apresentado diversos progressos recentemente, a seguir serão apresentadas algumas dessas linhas de desenvolvimentos.

Existem no mercado materiais que conferem à ferramenta altíssima dureza, como o CBN (nitreto cúbico de boro) para usinagem de aços e o diamante sintético PCD (diamante policristalino) para usinagem de alumínio. Porém pastilhas que possuem este material em sua ponta são extremamente caras, e por esse motivo foram desenvolvidas técnicas para deposição desses materiais em forma de cobertura em pastilhas.

Os revestimentos a base de nitreto de boro têm apresentado bons resultados, apesar de seu desenvolvimento recente. Este tipo de revestimento apresenta a vantagem de poder ser utilizado em geometrias complexas. Os bons resultados obtidos para os processos de torneamento e fresamento geram a expectativa de também serem encontrados no processo de furação.

Os revestimentos a base de diamante são depositados através do método plasma PVD, conferindo à pastilha altíssima dureza. Este material só pode ser aplicado em metal duro e sua coloração é cinza claro (BALZERS, 2006). Este revestimento é aplicado à superfície de pastilhas polidas e com aresta de corte bastante positiva, para evitar a formação de aresta postiça na ferramenta.

Outra linha de pesquisa para usinagem de alumínio se dá com revestimentos macios de sulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ), depositado pelo método PVD. A camada de sulfeto de molibdênio promove a lubrificação permanente da ferramenta o que, além de aumentar a sua vida, dá origem a superfícies com melhor acabamento superficial.

Recentemente um novo revestimento tem se destacado e vem sendo aplicado cada vez mais, principalmente em fresas e insertos intercambiáveis de metal duro, fresas de aço rápido, fresas caracol e insertos de CBN. É um revestimento de tom azul-acinzentado denominado Alcrona ( $\text{AlCrN}$ ) e suas principais propriedades são (BALZERS, 2006):

- Altíssima resistência à abrasão;
- Resistência à temperaturas altas e constantes;
- Elevada resistência à oxidação;

### **2.1.5 – Fatores importantes na Seleção de Brocas**

A escolha da broca mais correta para uma determinada operação depende de alguns fatores. Os principais fatores a serem considerados para efetuar a escolha da broca mais apropriada para a operação são:

#### **2.1.5.1 – Conjunto Máquina / Elementos de fixação**

O estudo detalhado da máquina a ser utilizada faz-se necessário, uma vez que fatores como rotação máxima, potência disponível, rigidez da mesma, presença ou não de refrigeração interna, influem diretamente na escolha do tipo de broca a ser utilizado.

Outro fator bastante importante nessa escolha é a rigidez de todo o conjunto envolvido no

processo, ou seja, da máquina, da fixação da peça a ser usinada no dispositivo da mesma, e também da qualidade da fixação da broca no adaptador e do mesmo na máquina.

#### **2.1.5.2 – Características da peça**

Diversas características da peça a ser usinada delineam a escolha da broca, como mais importantes podemos citar: a presença ou não de pré-furo, as dimensões do furo a ser usinado e o material a ser usinado.

A presença de pré-furo na peça exige certos cuidados na seleção da broca, pois em casos de furos oriundos do processo de fundição, algumas brocas tendem a acompanhar o posicionamento do furo fundido, que sabe-se não é preciso.

As dimensões de um furo, tanto de diâmetro quanto de comprimento apontam o tipo de broca (ou brocas, dependendo das dimensões) a ser(em) utilizada(s). Por exemplo, sabe-se que furo com grandes profundidades são usinados com brocas canhão.

A composição química e a dureza do material a ser usinado são de fundamental importância para definir o tipo de broca a ser utilizada, bem como o melhor revestimento para a mesma.

#### **2.1.5.3 – Qualidade do furo usinado**

A qualidade do furo é definida pela aplicação que o mesmo terá. Como diversas variáveis envolvem o processo de furação, o custo da operação é determinado pela complexidade e qualidade requerida no furo. A escolha da broca deve levar em conta a qualidade do furo, bem como o seu custo.

Como em todo processo de usinagem, durante a furação surgem desvios de fabricação nas peças, acarretando erros dimensionais e geométricos no produto.

Os desvios dimensionais expressam a diferença entre a medida real e a medida nominal do furo. Os desvios geométricos apresentam-se como desvios de forma e de posição. Os desvios possuem índices indicadores de qualidade, que são abordados nas seções seguintes. A faixa de valores admissíveis para os desvios são denominadas tolerâncias. Assim como ocorre com os desvios, as tolerâncias são classificadas em tolerâncias dimensionais e tolerâncias de forma.

### 2.1.5.3.1 – Tolerâncias Dimensionais

As tolerâncias dimensionais especificam faixas de valores admissíveis dos desvios das dimensões de uma peça em relação aos valores das medidas nominais. O quanto a dimensão real difere da nominal depende de diversos fatores, tais como: o processo de fabricação, os parâmetros adotados, as condições da máquina e as dimensões da peça. As normas ABNT NB-86, ISO R-286 e DIN 7182 apresentam conceitos relacionados aos desvios dimensionais.

Desvios dimensionais são aqueles em relação à medida nominal de uma peça indicada no desenho. Estes desvios não conduzem necessariamente ao fato de que a peça não será utilizável, ela pode ser corrigida através de um trabalho posterior. (NOVASKI, 1996)

### 2.1.5.3.2 - Medidas

- ⇒ *Medida nominal (N)*: medida que indica a dimensão, à qual se referem as diferenças.
- ⇒ *Medida real (I)*: medida determinada pela medição. A medida real está sempre sujeita a erros procedentes do processo de medição.
- ⇒ *Medida de ajuste*: é a medida nominal acompanhada de símbolos padronizados pelas normas ISO, DIN ou ABNT e indica um tipo de acabamento pré-determinado.
- ⇒ *Medidas limites*: são as medidas, máximas e mínimas, entre as quais a medida real das peças deve se encontrar.
- ⇒ *Medida máxima (G)*: é a maior entre as medidas limites.
- ⇒ *Medida mínima (K)*: é a menor entre as medidas limites.

### 2.1.5.3.3 - Diferenças ou Afastamentos

- ⇒ *Afastamento (A)*: é a diferença existente entre as dimensões limites e a nominal.
- ⇒ *Afastamento inferior ( $A_i$  ou  $a_i$ )*: é a diferença entre a dimensão mínima e a nominal
- ⇒ *Afastamento superior ( $A_s$  ou  $a_s$ )*: é a diferença entre a dimensão máxima e a nominal.
- ⇒ *Tolerância  $t = D_{máx} - D_{mín}$ ,  $t = A_s - A_i$  (furos) e  $t = d_{máx} - d_{mín}$ ,  $t = a_s - a_i$  (eixos)*: é a variação permissível da dimensão da peça, dada pela diferença entre as dimensões máxima e mínima ou entre afastamento superior e inferior.
- ⇒ *Linha zero*: é a linha que nos desenhos fixa a dimensão nominal e serve de origem aos afastamentos.

#### **2.1.5.3.4 - Tolerância**

O conceito de tolerância é dado como a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de uma grandeza mensurável ou pela diferença dos afastamentos. Desta maneira pode-se definir tolerância de medida como a diferença entre a medida máxima e a medida mínima. Na representação gráfica, a região determinada pelas linhas de medida máxima e mínima é denominada zona de tolerância, que indica a tolerância em grandeza e posição em relação à linha zero.

A posição da zona de tolerância é dada pela menor distância entre uma das linhas limites da zona de tolerância e a linha zero, levando-se em conta o sinal. A posição das zonas de tolerância são normalizadas pelo sistema ISO. As letras maiúsculas representam os furos e as minúsculas representam os eixos.

#### **2.1.5.3.5 – Tolerâncias Geométricas**

As tolerâncias dimensionais não permitem a determinação completa do grau de desvio de uma peça em relação à ideal. O grau de diferença entre a peça fabricada e a ideal, determinada pela qualidade da usinagem, caracteriza a precisão de fabricação. Em muitos casos, o desvio entre a peça fabricada e o ideal pode ser previamente indicado, através das chamadas tolerâncias geométricas, representadas pelos desvios de forma e posição.

A origem dos desvios geométricos são a falta de rigidez da máquina ferramenta, do desgaste da ferramenta, deflexão das guias das máquinas ferramentas, do porta-ferramentas e de um série de outros fatores que exercem influência direta sobre a qualidade final de uma peça usinada.

Para que a qualidade da peça produzida seja assegurada, na fase de projeto, é necessário que, além das tolerâncias dimensionais, as tolerâncias geométricas sejam determinadas. Os máximos erros geométricos são limitados e enquadrados em tolerâncias, de modo que a montagem, resistência e o funcionamento da peça não venham a ser comprometidos. Os desvios geométricos são classificados como desvios de forma e desvios de posição. A norma brasileira que trata dos desvios geométricos é a NBR 6158.

#### **2.1.5.3.6 - Desvios de Forma**

São denominados desvios de forma os desvios de um determinado ponto em relação à sua forma teórica, tais como retas, planos e pontos (NOVASKI, 1994). Podem ser classificados em:

- *Desvios macrogeométricos*: no caso de furos, os desvios mais evidentes são os de retitude, circularidade e de cilindricidade.
- *Desvios microgeométricos (rugosidade)*: na fabricação de peças não é possível produzi-las com superfícies ideais. As superfícies das peças são, microscopicamente consideradas, compostas de mais ou menos grandes desvios, que são designados como rugosidades mesmo quando estas superfícies macroscopicamente aparentem ser totalmente lisas. A totalidade de todos os desvios geométricos de superfície, em relação a superfície ideal, é resumida sob o conceito de desvios de configuração (NOVASKI, 1996).

#### **2.1.5.3.7 - Desvios de Posição**

Os desvios de posição são definidos como o grau de variação entre as superfícies, no que diz respeito ao posicionamento teórico. Estes desvios apresentam-se na forma de desvios de paralelismo, inclinação, alinhamento, perpendicularidade e simetria.

A forma de um elemento é considerada correta quando a distância entre cada um dos seus pontos e uma superfície de forma ideal, em contato com ele for inferior a um valor especificado por uma dada tolerância.

#### **2.1.5.3.8 - Tolerância de Circularidade**

A tolerância de circularidade é determinada por dois círculos concêntricos de raios distintos. A diferença entre os raios das circunferências determina a tolerância de circularidade. O contorno de qualquer seção deverá ficar compreendido entre estes dois círculos.

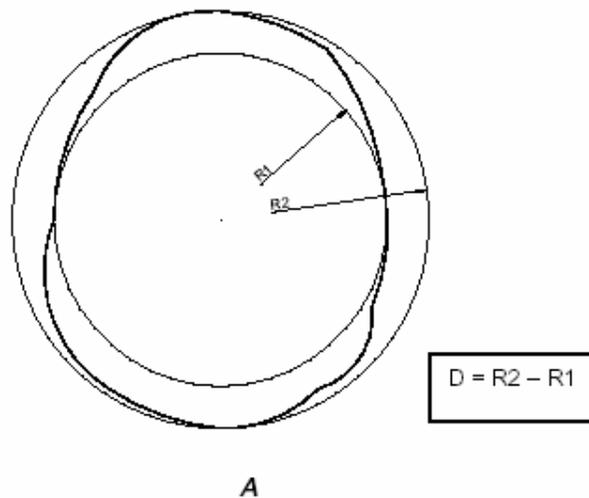


Figura 2.4 – Desvio de circularidade (A) (Santos, 1999)

#### 2.1.5.3.9 - Rugosidade

A rugosidade da superfície dos furos é um fator que torna-se mais importante à medida em que cresce a precisão dos ajustes entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional e de forma e posição são insuficientes para garantir o bom funcionamento do par. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;
- transferência de calor;
- qualidade de superfícies de padrões e componentes ópticos;
- possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação;
- aparência.

#### 2.1.5.3.10 - Sistemas de Medição da Rugosidade

A medida da rugosidade é realizada através de dois sistemas básicos: o sistema da linha

média M ou o sistema da envolvente. O sistema da linha média é o adotado pela ABNT.

No sistema M todos os parâmetros de rugosidade são definidos em relação a uma linha imaginária, denominada linha média, paralela à direção do perfil, no comprimento de amostragem. O posicionamento da linha média é feito de modo que a soma das áreas do perfil acima e abaixo dela seja a mesma.

Os sistemas de medição da rugosidade, baseados no critério da linha média podem ser agrupados em três classes:

- ⇒ Baseados na medida da profundidade da rugosidade
- ⇒ Baseados em medidas horizontais
- ⇒ Baseados em medidas proporcionais

#### 2.1.5.3.11 - Desvio médio aritmético Ra

Dentre os sistemas baseados na profundidade da rugosidade, o parâmetro mais utilizado é o desvio médio aritmético ou rugosidade média Ra, que é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média, para um dado comprimento de amostragem. A expressão matemática que define o Ra é:

$$Ra = 1/L \int_0^L |y| dx = A/L$$

#### 2.1.6 – A Broca Chamdrill

A broca Chamdrill é a broca utilizada nos ensaios deste trabalho. A mesma destaca-se pela sua versatilidade e altas taxas de avanço na usinagem.

Seu sistema de fixação do inserto através da deformação elástica do próprio alojamento (figura 2.5), permite que utilizando-se um só corpo de broca podemos fixar insertos com classes e geometrias diferentes para usinar materiais diversos.

Além disso, os insertos são confeccionados com variação decimal, assim em um mesmo corpo de broca é possível utilizar insertos de diversos diâmetros, aumentando ainda mais a sua versatilidade e obtendo flexibilidade para o processo de usinagem (figura 2.6).

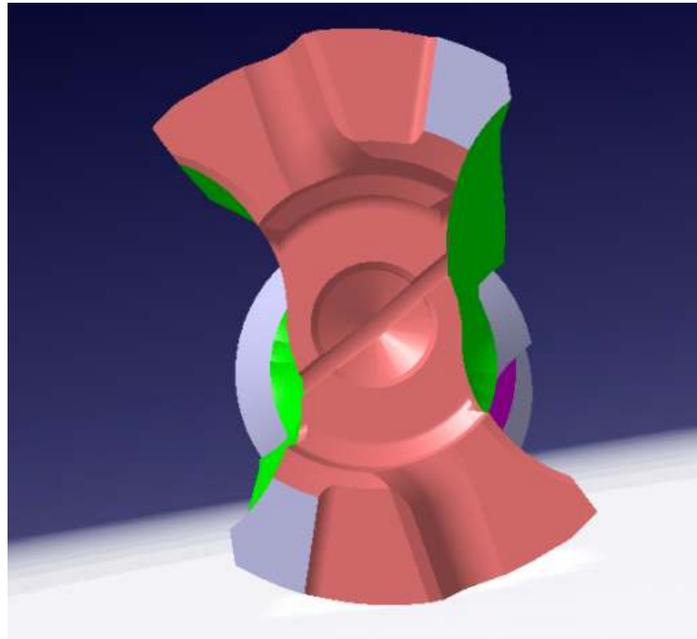


Figura 2.5 – Detalhe do alojamento da broca Chamdrill

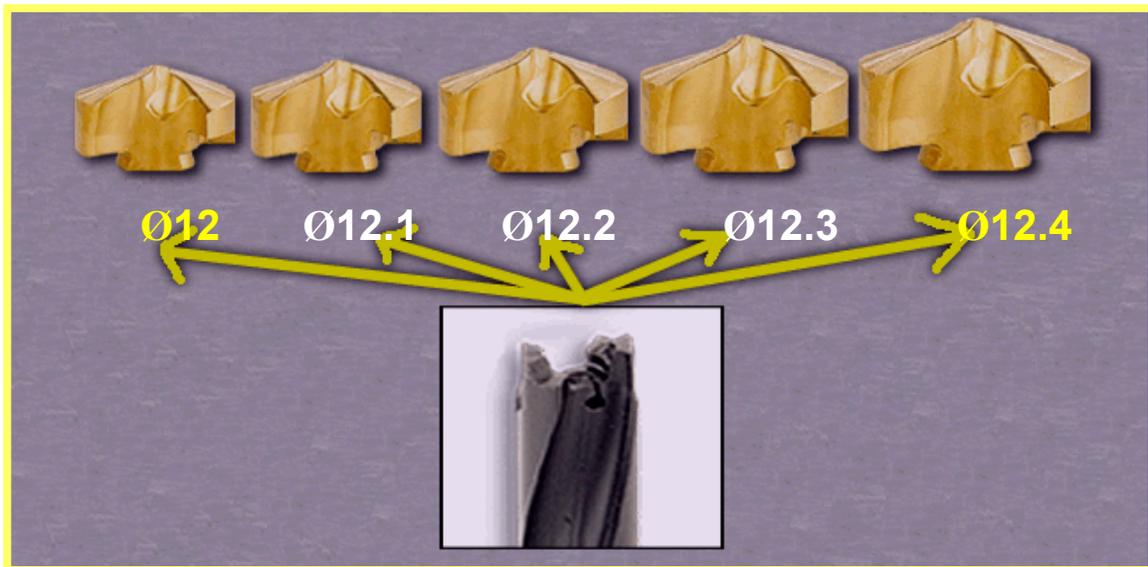


Figura 2.6 – Flexibilidade para montagem de diversos diâmetros em um só corpo

A figura 2.7 ilustra a broca Chamdrill que será empregada nos ensaios práticos:



Figura 2.7 – Ilustração da broca Chamdrill

#### 2.1.6.1 – Material do corpo da ferramenta

Por se tratar de uma ferramenta patenteada e com grande diferencial em relação às suas concorrentes, não é possível obter com o fabricante da ferramenta dados mais detalhados sobre o material e processo para confecção desta, porém os principais dados são apresentados.

O corpo da broca Chamdrill é confeccionado em Aço SAE 4340, e após a sua usinagem submetido ao tratamento térmico de beneficiamento o que lhe confere a dureza de aproximadamente 38 HRC. A última etapa da confecção desta ferramenta é o tratamento superficial que se trata de uma camada de níquel de 0,4mm de espessura depositada sobre o corpo da broca, conferindo a esta uma dureza de 46 HRC.



Figura 2.8 – Foto do Corpo da Broca Chamdrill

### 2.1.6.2 – Material da pastilha

A pastilha utilizada nesta ferramenta é do tipo IDI, e é fabricada a partir de um substrato de metal duro sinterizado, com granulometria dos componentes submicron (diâmetro dos grãos de aproximadamente 0,0005mm). Após o processo de sinterização a pastilha recebe uma camada de TiAlN (Nitreto de Titânio-Alumínio) por processo PVD. Sua granulação submicron associada à cobertura de TiAlN, garante à esta pastilha excelente resistência ao desgaste, além condições de trabalhar em corte interrompido.

Esta pastilha é considerada multi-função, podendo ser utilizada em diversos tipos de materiais, como podemos confirmar pela sua classificação ISO que se dá da seguinte maneira:

P15 – P30

M20 – M30

K20 – K40

S15 – S25

N15 – N25

H20 – H30

A ISO (International Standard Association), órgão americano de padronização internacional, designou cada letra para um tipo de material a ser usinado, que se dá da seguinte maneira:

P = pastilha para usinagem de aços e suas ligas

M = pastilha para usinagem de aços inoxidáveis e aços fundidos

K = pastilha para usinagem de ferros fundidos

S = pastilha para usinagem de ligas de alta resistência

N = pastilha para usinagem de alumínio e suas ligas

H = pastilha para usinagem de materiais endurecidos

O número que acompanha a letra indica a dureza da pastilha, este número vai de 5 até 50 na ordem de 5 unidades. Quanto menor o número significa que mais dura é a pastilha.

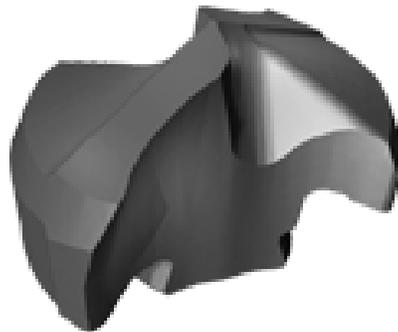


Figura 2.9 – Ilustração da Pastilha da Broca Chamdrill

## 2.2 FLUIDOS DE CORTE

É sabido que os fluidos de corte são largamente empregados na usinagem em geral, com as finalidades de refrigerar e lubrificar o processo. Essa prática foi introduzida por F. W. Taylor em 1890 com a finalidade de resfriar a ferramenta, tendo utilizado inicialmente água, e depois uma solução água e soda. (DINIZ et al, 2000)

Os fluidos de corte são importantes na prevenção da soldagem cavaco-ferramenta; retirada do cavaco da região de corte; proteção contra a corrosão; redução da dilatação; etc. Porém suas principais funções são a de lubrificação e/ou refrigeração do processo de usinagem. (DINIZ et al., 2000)

As funções dos fluidos de corte podem ser divididas em funções refrigerantes e funções lubrificantes.

Para possuir boas funções refrigerantes o fluido de corte deve possuir algumas características como: baixa viscosidade; capacidade de estabelecer um bom contato com a peça; alto calor específico e alta condutividade térmica.

A função lubrificante dos fluidos de corte tem por principal objetivo a redução do coeficiente de atrito entre cavaco / ferramenta / peça, facilitando o fluxo de cavaco, e para tanto deve possuir característica como: resistência à pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar; boas propriedades anti-fricção e anti-soldantes; viscosidade adequada à aplicação.

### 2.2.1 - Classificação dos fluidos de corte

Os diversos tipos de fluidos de corte podem ser classificados da seguinte maneira (MACHADO e DINIZ, 2000):

- Ar
- Aquosos:
  - água
  - emulsões (óleos solúveis)
  - soluções químicas
- Óleos:
  - óleos minerais

- óleos graxos
- óleos compostos
- óleos de extrema pressão
- óleos de múltiplo uso

### **2.2.2 - Restrições à utilização do fluido de corte**

Cada vez mais notamos a preocupação com o desenvolvimento de produtos e processos de usinagem que não necessitem do uso de fluido de corte, tendo este sido tema de diversas pesquisas e publicações. Isto se deve à muitos fatores, sendo os principais:

- danos à saúde humana;
- custos operacionais (uso, armazenamento, descarte);
- problemas ambientais
- custo / dificuldades no descarte
- legislações mais restritivas

#### **2.2.2.1 – Danos à saúde humana**

O contato prolongado com os alguns tipos de fluidos de corte que possuem biocidas, fungicidas, produtos de reações e impurezas, através de respingos, contato direto, inalação de vapores e névoa, podem causar diversos problemas à saúde (MIRANDA, 2003).

#### **2.2.2.2 – Custos operacionais**

Os custos da utilização do fluido de corte, vão além do valor de compra do mesmo no mercado, já que além da sua compra são necessários outros recursos para a sua utilização, tais como: espaço para armazenamento (tanto do fluido novo, como do descartado), mão-de obra específica para a correta utilização; logística.

De acordo com estudos realizados para as indústria alemãs, os custos associados ao uso do fluido de corte emulsionável representam cerca de 16% dos custos de fabricação (Figura 2.11), muito acima inclusive dos custos com ferramentas.

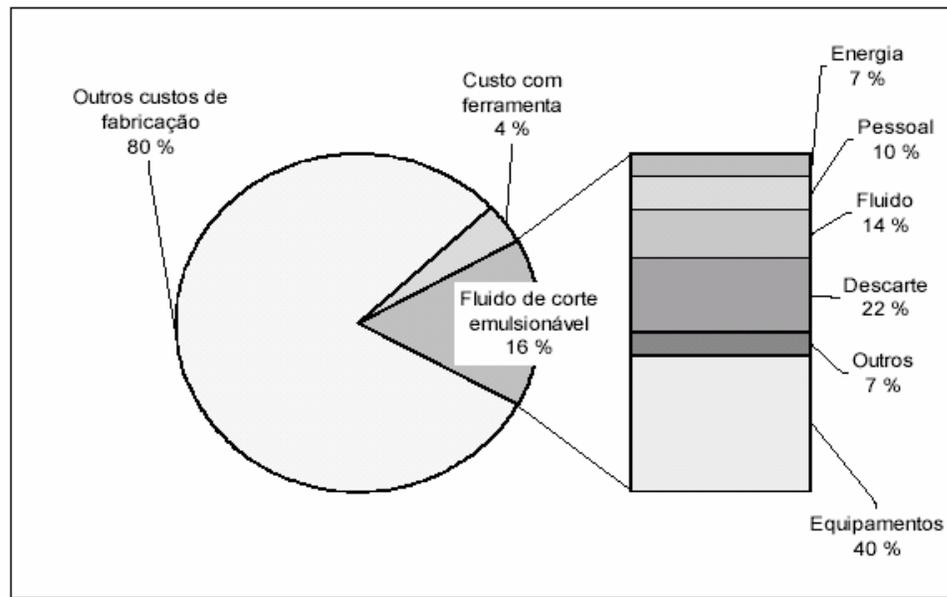


Figura 2.11 – Relação de custos de fabricação associados ao uso de fluido de corte emulsificável (LAHRES et al., 1997)

### 2.2.2..3 – Problemas ambientais

Vistos sob os aspectos ambientais, os fluidos de corte que possuem na sua constituição: biocidas, fungicidas, produtos de reações, impurezas agregadas pelo uso etc., possuem potencial altamente poluidor ao solo, ar e água (KÖNIG e RUMMENHÖLLER, 1998; POPKE et al., 1999; SMITH, 1996; MACHADO e DINIZ, 2000; EL BARADIE, 1996).

### 2.2.2.4 – Descarte do fluido de corte

Como sabemos, o fluido de corte possui vida limitada, e após essa vida deve ser descartado. Com a legislação atual, não é mais permitido o descarte na natureza, o que acarretou custos significativos para esse fim, e conseqüentemente aumento dos custos de produção.

Os tratamentos mais freqüentemente utilizados para os resíduos de fluidos aquosos consistem em métodos químicos, métodos físicos, incineração e/ou combinação de um ou mais desses métodos (GANIER, 1992; DICK e FOLTZ, 1997; EL BARADIE, 1996).

### 2.2.2.5 – Legislação

Como bem sabemos, a Legislação Ambiental em vigor no Brasil têm, entre outros, por objetivo preservar o meio-ambiente do descarte de fluido de corte na natureza. A Lei de Crimes

Ambientais prevê penas de ordem administrativa, civil e criminal para a autoria ou co-autoria em condutas lesivas ao meio ambiente.

### 2.2.3 – Quantidade Mínima de Lubrificante (MQL)

Uma alternativa à utilização de fluido de corte é a utilização de uma quantidade mínima deste, diminuindo o impacto ambiental e utilizando apenas a quantidade necessária para a lubrificação da operação. Por outro lado as operações devem pelo menos alcançar os mesmos tempos de corte, vida de ferramenta e qualidade das peças realizadas com fluido de corte.

A eliminação (ou redução) do fluido de corte também pode trazer outros benefícios, que não o ambiental, para determinados processos, como:

- *Corte Interrompido*: principalmente no fresamento, onde o principal tipo de desgaste são os sulcos de origem térmica, originadas pela flutuação cíclica da temperatura, a falta de fluido de corte diminui o choque térmico na aresta de corte das ferramentas, reduzindo a formação de fissuras (MACHADO e DINIZ, 2000).
- *Usinagem com ferramentas cerâmicas*: o fluido pode promover choques térmicos e eventual fratura das ferramentas.
- *Na usinagem de materiais endurecidos*: a utilização de um fluido de corte pode prejudicar bastante o rendimento do processo, pois fluido de corte atinge toda a região de formação do cavaco, refrigerando também a peça; o efeito de amolecimento oferecido pelo calor gerado é prejudicado, sendo necessária uma maior quantidade de energia para formar o cavaco. O fluido de corte atrapalha este amolecimento, podendo, portanto, ser prejudicial ao processo (MACHADO e DINIZ, 2000).

Por outro lado a ausência (ou diminuição) do fluido de corte trazem conseqüências negativas como:

- *Problemas dimensionais e de forma*: podem surgir nas peças devido à ausência de refrigeração provocada pela falta de fluido de corte.
- *Piora da qualidade de superfície*: a eliminação do fluido de corte tende a piorar a qualidade da superfície resultante do corte, devido às maiores forças de atrito e ao aumento do arrancamento de adesões de partículas de material da peça, que se soltam da ferramenta. Estes problemas podem inviabilizar a execução técnica de determinada peça

(KLOCKE et al., 1998).

- *Diminuição da vida da ferramenta:* a elevação da temperatura acontece pela falta de refrigeração, beneficiando a ocorrência de deformações plásticas, adesões, difusão, oxidação e aumento do atrito peça/ferramenta/cavaco. A consequência destes efeitos é uma redução significativa na vida da ferramenta.

## 2.3 O FERRO FUNDIDO CINZENTO

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, porque além das suas características próprias, quando da introdução de elementos de liga e aplicações de tratamentos térmicos passou a ser empregado em aplicações antes destinadas somente aos aços.

O ferro fundido é normalmente definido como ligas Fe-C cujo teor de carbono está acima de 2,0% e o teor de silício entre 1 e 3%. O elevado teor de carbono dessas ligas e a presença sempre obrigatória do elemento silício torna necessário considerá-las como ligas, ternárias ***Fe-C-Si***,

A escolha do ferro fundido para objeto de estudo deste trabalho se deve ao fato, de que este é um dos materiais mais empregados na indústria metal-mecânica, principalmente no setor automotivo estando presente desde componentes de freio até o bloco do motor.

### 2.3.1 – Classificação dos ferros fundidos

A classificação genérica dos ferros fundidos abrange os seguintes tipos de liga (CHIAVERINI, 1979):

- ⇒ *Ferro Fundido Cinzento*: São ligas cuja fratura tem uma coloração escura, daí o seu nome. É caracterizado por apresentar como elementos de ligas fundamentais o carbono e o silício. O ferro fundido cinzento é quebradiço, rompendo-se por fratura frágil, com muito pequena deformação permanente independente da temperatura, devido à presença de grafita, é justamente isto que facilita a fratura e faz com que a resistência à tração e a ductibilidade deste material sejam bastante baixas.
- ⇒ *Ferro Fundido Branco*: São ligas cuja fratura tem uma coloração clara, daí o seu nome. Esses materiais também apresentam como ligas fundamentais o carbono e o silício, mas devido às condições de fabricação e menor teor de silício apresenta o carbono combinado na forma  $Fe_3C$ . Os ferros fundidos brancos têm elevada dureza e resistência ao desgaste, o que os torna mais difíceis de usar.
- ⇒ *Ferro Fundido Mesclado*: São ligas cuja fratura tem uma coloração mista entre branca e cinzenta, daí os eu nome. É formado por uma mescla de proporções variadas de ferro

fundido cinzento e ferro fundido branco.

- ⇒ *Ferro Fundido Maleável*: É obtido a partir do ferro fundido branco, mediante tratamento térmico de maleabilização, a partir deste processo adquire maleabilidade, daí o seu nome. A resistência à corrosão e limites de temperatura do ferro fundido maleável são equivalentes ao ferro fundido cinzento, porém com melhores qualidades mecânicas, mais maleável e e com limites de resistência à tração mais elevados.
- ⇒ *Ferro Fundido Nodular*: também conhecido como Ferro fundido dúctil ou Ferro fundido de grafita esferoidal, por apresentar carbono livre na forma de grafita esferoidal. Esses ferros fundidos apresentam níveis bastante elevados de ductilidade, e uma variedade maior de de propriedades mecânicas de resistência.
- ⇒ *Ferro Fundido Vermicular*: Também conhecido com CGI (Compacted Graphite Iron), este ferro fundido é considerado um intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, aliando as características de ambos. Sua composição é muito parecida com a do ferro fundido cinzento, sendo a principal diferença a presença de magnésio, que deve ser mantido em uma margem muito estreita (0,010 à 0,012%). A presença na quantidade controlada de magnésio formam estrias grossas ou “vermes” (daí o nome vermicular). Pelo fato de precisar manter o magnésio dentro de uma margem percentual tão estreita, este processo só passou a ser produzido em escala industrial a partir do início da década de 90.

Dentre os tipos de ferro fundido, o ferro fundido cinzento é o mais utilizado devido às suas propriedades, tais como (CHIAVERINI, 1979):

- ⇒ Fácil fusão e moldagem
- ⇒ Boa resistência mecânica
- ⇒ Excelente usinabilidade
- ⇒ Boa resistência ao desgaste
- ⇒ Boa capacidade de amortecimento

Assim como em todas as demais ligas metálicas, o ferro fundido cinzento tem uma correlação íntima entre suas propriedades e a sua estrutura. Dessa maneira pode-se estimar com razoável precisão as propriedades deste material, em função de sua composição química,

principalmente teores de carbono grafitico e silício e da forma como a grafita se apresenta.

Os ferrosos fundidos cinzentos tem uma faixa de composição química muito ampla:

⇒ C - 2,50% à 4,00%

⇒ Si - 1,20% à 3,00%

⇒ Mn - 0,30% à 1,00%

⇒ P - 0,10% à 1,00%

⇒ S - 0,05% à 0,25%

### **2.3.2 – Classificação dos ferros fundidos cinzentos**

A classificação adotada pela ABNT representa o ferro fundido cinzento pelas iniciais FC seguido de dois algarismos que representam o limite mínimo de resistência à tração. A tabela 2.2 mostra esta classificação, relacionada às suas principais propriedades mecânicas.

Tabela 2.2 - Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ABNT

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite mínimo de resistência à tração	
	Estado bruto de fusão	Usinada	Kgf/mm <sup>2</sup>	MPa
FC10	30	20	10	100
	13	8	23	230
FC15	20	12,5	18	180
	30	20	15	150
	45	32	11	110
FC20	13	8	28	270
	20	12,5	23	230
	30	20	20	200
	45	32	16	160
FC25	13	8	33	320
	20	12,5	28	270
	30	20	25	250
	45	32	21	210
FC30	20	12,5	33	320
	30	20	30	290
	45	32	26	260
FC35	20	12,5	38	370
	30	20	35	340
	45	32	31	300
FC40	30	20	40	390
	45	32	36	360

A ASTM International, entidade americana que fornece normas para pesquisa e desenvolvimento, testes de produto e sistemas de qualidade em todo o mundo, classifica os ferros fundidos de acordo com a composição química, como mostra a tabela 2.3

Tabela 2.3 - Classificação dos ferros fundidos cinzentos de acordo com a ASTM

Classe	Composição Química (%)				
	C	Si	Mn	P	S
20	3,10 - 3,80	2,20 - 2,60	0,50 - 0,80	0,20 - 0,80	0,08 - 0,13
25	3,00 - 3,50	1,90 - 2,40	0,50 - 0,80	0,15 - 0,50	0,08 - 0,13
30	2,90 - 3,40	1,70 - 2,30	0,45 - 0,80	0,15 - 0,30	0,08 - 0,12
35	2,80 - 3,30	1,60 - 2,20	0,45 - 0,70	0,10 - 0,30	0,06 - 0,12
40	2,75 - 3,20	1,50 - 2,20	0,45 - 0,70	0,07 - 0,25	0,05 - 0,12
50	2,55 - 3,10	1,40 - 2,10	0,50 - 0,80	0,07 - 0,20	0,06 - 0,12
60	2,50 - 3,00	1,20 - 2,20	0,50 - 1,00	0,05 - 0,20	0,05 - 0,12

### 2.3.3 - A Usinabilidade do ferro fundido cinzento

A usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por um valor numérico um conjunto de propriedades de usinagem do metal, estas propriedades são aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem. A usinabilidade é muito destacada no meio metal-mecânico porque interessa tanto aos fabricantes de metais quanto de ferramentas de corte, pois esse fator influencia diretamente na produtividade de uma empresa (FERRARESI, 2003).

Vários critérios são empregados nos ensaios de usinabilidade, sendo os mais comuns (FERRARESI, 2003):

- ⇒ Critérios baseados na vida da ferramenta
- ⇒ Critérios baseados na força de usinagem
- ⇒ Critério baseado no acabamento superficial
- ⇒ Critério baseado na produtividade
- ⇒ Critério baseado na análise dimensional
- ⇒ Critério baseado na temperatura de corte
- ⇒ Critério baseado nas características do cavaco

O ferro fundido cinzento é considerado um material de boa usinabilidade, segundo quase todos os critérios, além de baixos custos do material e fundição. As forças e as potências de corte requeridas são relativamente baixas, a taxa de remoção de material é considerada alta e a taxa de desgaste da ferramenta é considerada baixa. O fato de o ferro fundido cinzento apresentar boas

características de usinabilidade não exige que no processo de fundição sejam tomados cuidados especiais com o objetivo de se obter um material de usinagem ainda mais fácil (SANTOS, 1999).

Diferentemente dos aços não é a dureza o principal indicativo da usinabilidade do material, mas sim a microestrutura é que exerce grande influência na usinabilidade.

### 2.3.3.1 - Ferramentas para usinagem do ferro fundido cinzento

De tempos em tempos, os fundidos podem passar por problemas de usinabilidade. Algumas vezes, estes problemas são relacionados com a qualidade metalúrgica dos fundidos produzidos. Outras vezes, entretanto, a fundição é acusada, mas na realidade, os problemas não são relacionados aos fundidos. Ao invés disto, os problemas aparecem na usinagem (GOODRICH, 2003).

Verificamos que com o passar do tempo as ferramentas para usinagem do ferro fundido vem sofrendo modificações a fim de obter um melhor desempenho, seja em maiores dados de corte ou em tempo de vida. Isto é possível graças ao desenvolvimento e pesquisa dos fabricantes de ferramentas ao longo dos anos, enquanto a composição do ferro fundido cinzento permanecia inalterada. Podemos ver na Tabela 2.4 o progresso das ferramentas e dos dados de corte obtidos.

Tabela 2.4 – Evolução das Ferramentas

	$V_c$	f
Aço Rápido	40	0.15
Primeiras classes de metal duro	250	0.25
Evolução das classes de metal duro	400 ~ 600	0.40
Cerâmica	800 ~ 1000	0.50

É importante também destacar a evolução do CBN (Nitreto Cúbico de Boro) na usinagem de ferro fundido, visto que os dados de corte deste se aproximam dos aplicados à cerâmica, porém com uma vida muito superior. Seu maior empecilho para utilização em larga escala se deve ao seu preço elevado (aproximadamente 5 vezes superior à cerâmica) e como as pastilhas tem apenas uma pequena ponta de CBN soldada, inviabiliza a confecção de pastilhas com várias

arestas de corte, elevando assim o “preço por aresta” de uma ferramenta desta à até 40 vezes o valor de uma pastilha de cerâmica.

Uma aplicação que vem se mostrando cada vez mais economicamente viável é a utilização de pastilhas de cerâmica e CBN em uma única fresa, essa combinação se dá utilizando a maior parte das pastilhas (cerca de 80 à 90%) de cerâmica, trabalhando como pré-acabamento, e somente 2 ou 3 pastilhas de CBN trabalhando como “alisadores” fazendo o acabamento do produto, desta maneira é possível trabalhar mais tempo com uma fresa sem necessidade de interromper a produção para virar arestas ou trocar as pastilhas.

### 3 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste trabalho é definir da maneira mais precisa possível a vida de uma broca Chamdrill de diâmetro 12,3mm na usinagem do ferro fundido cinzento GG 25, através do monitoramento do comportamento das variáveis: torque, força de avanço e potência requeridas durante a usinagem em função do avanço do desgaste frontal, determinando assim curvas que poderão ser monitoradas posteriormente, permitindo aos operadores de máquina que acompanhem a evolução destas durante a produção e façam a troca do inserto da broca no momento correto, reduzindo assim os prejuízos com quebra de brocas ou troca de pastilhas antes do fim da sua vida.

A metodologia adotada neste trabalho foi a Pesquisa ex-post facto, ou “ a partir do fato passado”. Isso significa que nesta pesquisa os resultados foram apresentados após as ocorrências dos ensaios (fatos). O propósito básico desta modalidade de pesquisa é verificar a existência das relações entre as variáveis intrínsecas ou resultantes do processo (GIL, 2002).

A escolha do processo de furação se deve ao fato de que este é seguramente o processo de usinagem com a menor quantidade de pesquisas dentre os 3 principais processos (fresamento, torneamento e furação). Com o recente avanço das máquinas que se utilizam de brocas para geração de furos, bem como de novos materiais para as ferramentas e revestimentos, faz-se necessário intensificar a quantidade de pesquisas deste.

A broca Chamdrill é um exemplo de nova tecnologia desenvolvida a partir da modernização do parque fabril nacional. Esta ferramenta tem características diferenciadas, como foi apresentado no capítulo 2.1.5.

É muito importante destacar a importância do ferro fundido na indústria metal-mecânica, pois segundo a ABIFA (Associação Brasileira de Fundição) de janeiro à junho deste ano foram produzidas 1.289.907 toneladas de ferro fundido, sendo uma média de 12.403 toneladas/dia, apesar de termos fundições em todas as regiões do Brasil, a maioria se concentra nas regiões sul e sudeste. Se considerarmos que apenas cerca de 20% de todo o material produzido foi exportada, chegamos a conclusão que este material está entre os mais utilizados na indústria. A importância deste segmento da indústria também pode ser medido pela geração de empregos no país, que no

final de 2005 girava em torno de 58.000 empregados.

#### **4 MÉTODO**

#### **4.1 – Planejamento Experimental**

Este trabalho apresenta dados que poderão ser empregados no dia-a-dia da indústria, e por este motivo foi estudada uma aplicação comum ao tipo de ferramenta empregado, para que o resultado deste possa ser utilizado posteriormente.

Assim sendo, foi utilizado o diâmetro de broca mais vendido pelo fabricante da ferramenta que segundo o departamento de logística da mesma é o diâmetro de 12,3mm, sendo responsável pelo resultado de aproximadamente 16% das vendas deste produto.

Desta maneira os ensaios apresentarão um tipo de usinagem muito comum no segmento industrial que consome este tipo de ferramenta, que é a usinagem de diâmetros pequenos (inferiores à 16mm) com profundidades de até  $1,5xD$ , onde não é necessária a utilização de fluido de corte, como furação de chapas de aço e furação de discos de freio de ferro fundido, entre outras.

Para se atingir os objetivos propostos neste trabalho, foram realizados primeiramente ensaios denominados pré-testes, com o objetivo de determinar os dados de corte a serem utilizados nos ensaios.

Após a definição dos dados de corte para os ensaios, os mesmos foram realizados, sendo que para a realização dos mesmos foi necessário produzir os desgastes nas pastilhas estudadas.

##### **4.1.1 – Definição dos dados de corte para os ensaios**

Conforme indicação do fornecedor, esta ferramenta tem como dados de corte médios indicados, uma velocidade de corte ( $v_c$ ) de 72m/min e um avanço ( $f$ ) de 0,18mm/rotação para utilização sem refrigeração. Para definição dos dados de corte dos ensaios, foram realizados pré-ensaios utilizando combinações dos dados de corte indicados com os mesmos acrescidos e decrescidos em 20%, uma percentagem considerada satisfatória para observar as mudanças no comportamento da usinagem. Também foi ensaiada a velocidade de corte máxima informada pelo fabricante da ferramenta, a saber:  $v_c=150\text{m/min}$ .

Os critérios adotados para escolha dos dados de corte foram: potência consumida, acabamento superficial e tipo do cavaco produzido, sendo que os resultados se encontram na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Resultado dos pré-ensaios

$v_c$ (m/min)	f (mm/rot)	Potência (kW)	Acabamento (Ra)	Tipo do Cavaco
58	0.14	3,06	3,0	vírgula
	0.18	4,14	3,2	vírgula
	0.22	4,50	2,9	vírgula
72	0.14	4,14	2,8	vírgula
	0.18	4,50	3,1	vírgula
	0.22	5,40	3,2	vírgula
86	0.14	3,96	3,2	vírgula
	0.18	4,68	3,0	vírgula
	0.22	5,40	3,1	vírgula
150	0.14	4,32	2,7	vírgula
	0.18	4,86	3,0	vírgula
	0.22	5,40	3,2	vírgula

Após a realização dos testes, foi possível verificar que o comportamento da broca nova é praticamente o mesmo em todos os ensaios realizados, portanto como não há variações drásticas serão utilizados para os ensaios seguintes os dados de corte médios indicados pelo fornecedor da ferramenta, a saber:

Velocidade de corte ( $v_c$ ) = 72m/min

Avanço por rotação (f) = 0,18mm/rot

#### 4.1.2 – Preparação das pastilhas para os ensaios

O desgaste máximo admissível para esta ferramenta é o valor de desgaste frontal (VB) de 0,2mm; uma vez que a partir deste valor o furo começa a apresentar o fenômeno conhecido como quebra de borda, muito comum em ferro fundido.

Para tanto foram preparadas pastilhas com os valores de desgaste frontal VB = 0,05; VB = 0,10; VB = 0,15 e VB = 0,20, sendo 2 amostras de cada. Para a obtenção dessas pastilhas foi necessário usinar aproximadamente 9.800 furos.

Para conseguir o resultado esperado foram usinados 2 blocos do mesmo material estudado (Ferro fundido cinzento GG25) com dimensões de 300x300x300mm, nas mesmas condições dos ensaios práticos, ou seja mesmos parâmetros de corte, profundidade do furo e sem fluido de corte. Nas figuras 4.1 à 4.5, podemos observar as etapas que foram repetidas sucessivas vezes para preparação das pastilhas.



Figura 4.1 – Furação do bloco de ferro fundido para desgaste da pastilha

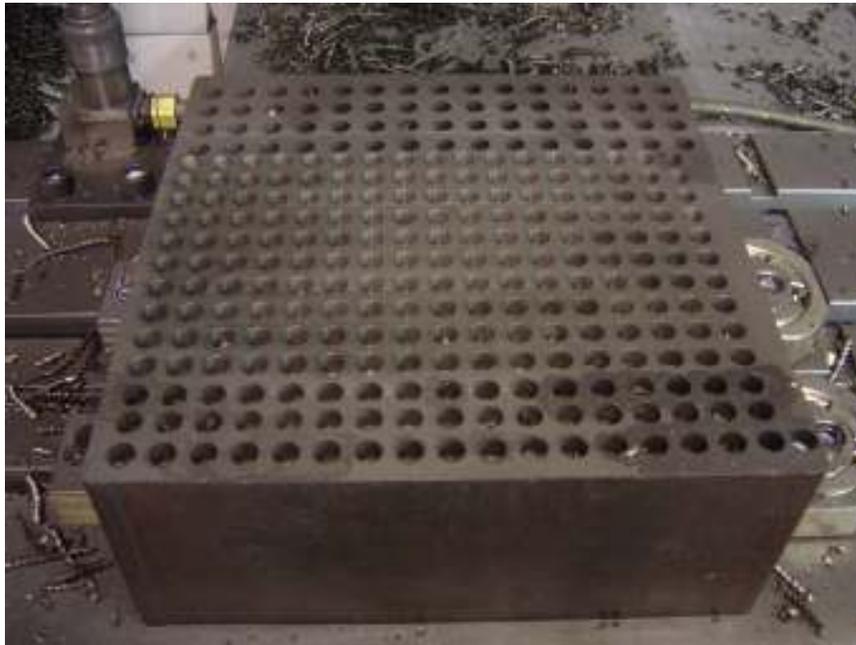


Figura 4.2 – Bloco de ferro fundido após uma bateria de furação



Figura 4.3 – Início do fresamento do bloco para uma nova bateria de furação

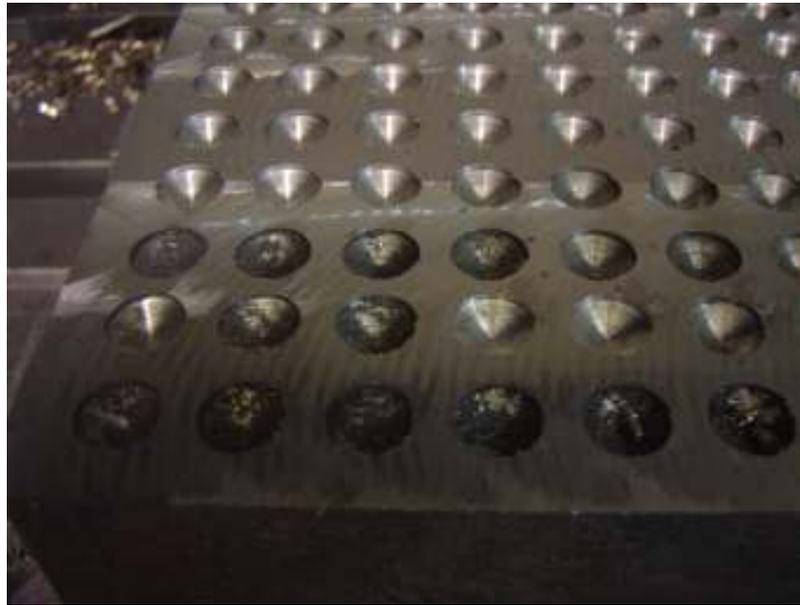


Figura 4.4 – Bloco fresado uma etapa anterior ao faceamento final

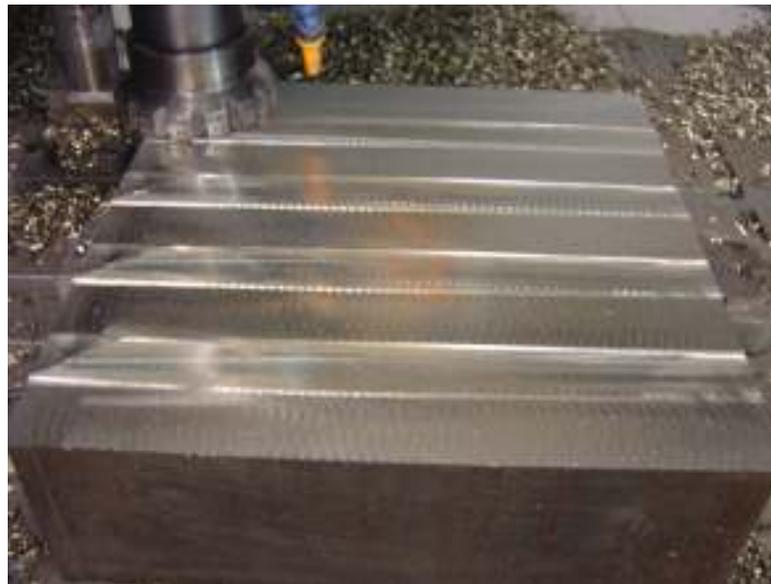


Figura 4.5 – Bloco totalmente fresado para uma nova bateria de furação

#### 4.1.3 – Metodologia dos ensaios

O método utilizado para os ensaios, foi baseado em estudos realizados por pesquisadores da Unicamp, que conforme Button (2005, p. 4) “*não contam nem com um tempo disponível elevado, nem com a possibilidade material da realização de um número infinito de ensaios*”. Assim através da realização de diversos experimentos os mesmos definiram, para ensaios de

usinagem, o método de realizar o ensaio inicial e sua réplica, sendo a diferença entre eles inferior à 20%, o resultado é válido.

Foram realizados 10 ensaios para cada valor de desgaste frontal, variando de  $VB = 0$  à  $VB = 0,20\text{mm}$  na razão de  $0,05\text{mm}$ ; sendo 5 com a primeira pastilha e 5 com a outra (que é denominada réplica), para validação da metodologia adotada.

Através da observação do comportamento das curvas das variáveis estudadas foi possível determinar o intervalo a ser estudado, sendo este entre os valores  $0,8$  e  $2,60$  segundos na escala de tempo (s).

#### 4.2 – Codificação dos ensaios

A fim de facilitar a identificação dos ensaios, foi elaborada uma codificação simples de identificação, sendo:

Codificação em função do desgaste frontal  $VB$  para identificar os ensaios realizados com as pastilhas com desgaste  $0$  à  $0,2\text{mm}$  na razão de  $0,05\text{mm}$ , sendo:

$VB = 0,00$  – Ensaios das pastilhas novas

$VB = 0,05$  – Ensaios das pastilhas com  $VB = 0,05\text{mm}$

$VB = 0,10$  – Ensaios das pastilhas com  $VB = 0,10\text{mm}$

$VB = 0,15$  – Ensaios das pastilhas com  $VB = 0,15\text{mm}$

$VB = 0,20$  – Ensaios das pastilhas com  $VB = 0,20\text{mm}$

A codificação acima exposta representa a média de todos os ensaios, para apresentação de gráficos de um ensaio específico, serão acrescentados após a codificação parênteses para identificar o ensaio, da seguinte maneira:

(X) – parênteses com um número, indica a ordem de seqüência do ensaio dentro do mesmo valor de desgaste frontal.

(RX) – parênteses com um número precedido da letra R, indica a ordem de seqüência da réplica do ensaio dentro do mesmo valor de desgaste frontal.

Exemplificando a codificação acima:

$VB = 0,15(3)$  – Terceiro ensaio do desgaste frontal de valor  $0,15\text{mm}$

$VB = 0,15(R3)$  – Réplica do terceiro ensaio do desgaste frontal de valor  $0,15\text{mm}$

### 4.3 – Material dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados a partir de “tarugos” de ferro fundido cinzento GG25, suas características foram informadas através de laudos emitidos pelo fornecedor; como composição química na tabela 4.2, dureza Brinell na tabela 4.3 e micrografias nas figuras 4.6 e 4.7

Tabela 4.2 – Composição química dos corpos de prova

<b>Análise</b>	<b>Norma (%)</b>	<b>Resultados (%)</b>
Carbono	2,5 ~ 4,0	3,42
Silício	1,2 ~3,0	1,86
Manganês	0,30~1,00	0,63
Fósforo	0,1 ~1,00	0,07
Enxofre	0,02 ~0,05	0,02
Estanho		0,08
Cromo		0,08

Tabela 4.3 – Dureza Brinell dos corpos de prova

<b>Dureza Brinell (HB 5/750)</b>
<b>Resultado</b>
<b>225</b>



Figura 4.6 – Micrografia dos CP I



Figura 4.7 – Micrografia dos CP II

Na figura 4.8 é possível visualizar o “tarugo” de ferro fundido antes da preparação dos corpos de prova, e na figura 4.9 o “tarugo” após o primeiro desbaste. Na figura 4.10 ilustra-se o “tarugo” montado para torneamento e corte das amostras e na figura 4.11 o corpo de prova (CP) pronto. Finalmente a figura 4.12 mostra o corpo de prova furado após o ensaio.



Figura 4.8 – Tarugo fundido



Figura 4.9 – Primeiro desbaste do tarugo

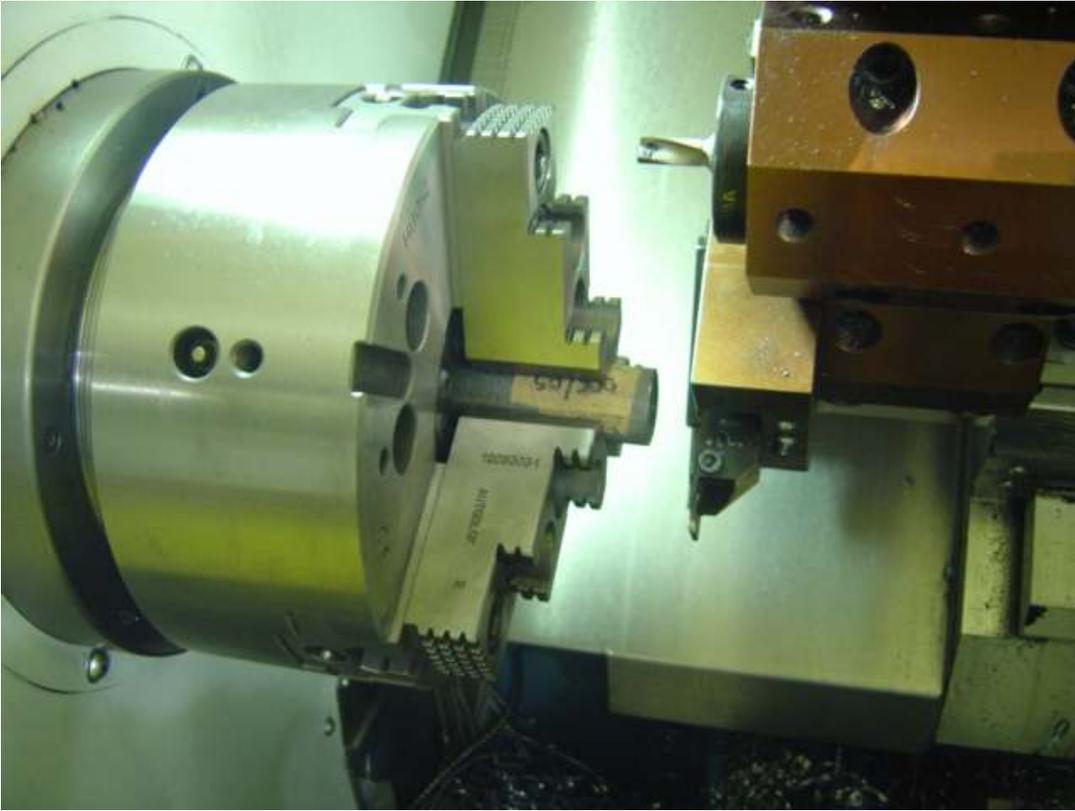


Figura 4.10 – Preparação da máquina para usinagem das amostras

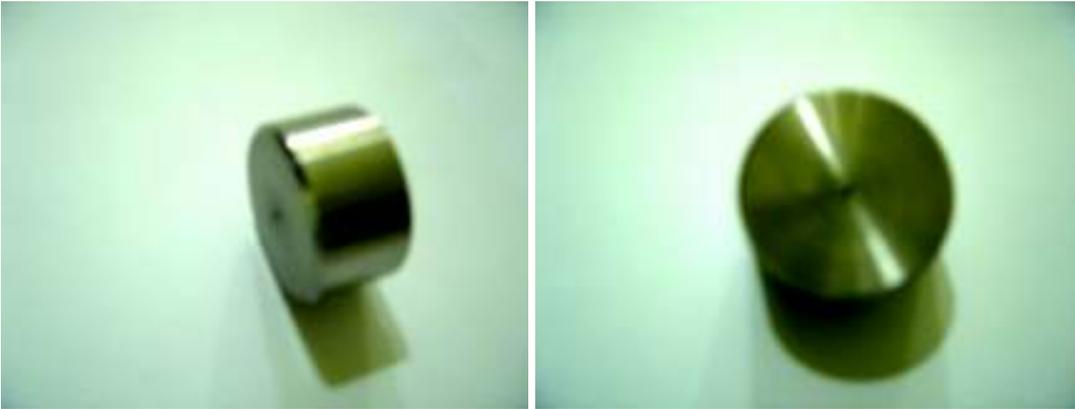


Figura 4.11 – Corpos de Prova para ensaios



Figura 4.12 – Corpo de Prova furado após ensaio

#### 4.4 - Ferramenta

A broca selecionada para este trabalho é uma broca com pastilha intercambiável, diâmetro nominal 12,3 m<sub>7</sub>, tipo Chamdrill versão direita, com fixação cilíndrica diâmetro 16 h<sub>6</sub>, a pastilha tem cobertura de TiAlN por processo PVD e classificação para ferro fundido K20-K40. Por se tratar de um desenvolvimento exclusivo do fornecedor a mesma não segue nenhuma Norma, mas na Figura 4.13 estão destacadas suas principais características.

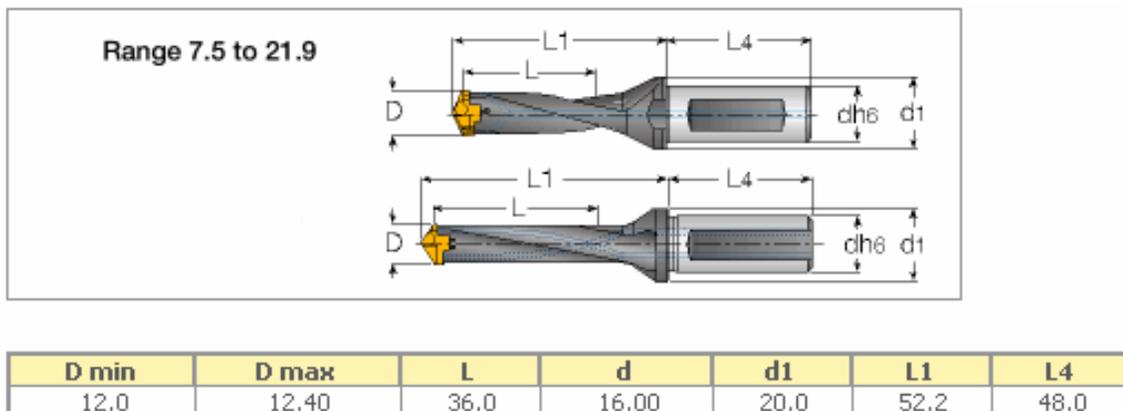


Figura 4.13 – Principais características da Broca Chamdrill

O catálogo indica a utilização desta broca em ferro fundido cinzento com dureza até 260 HB e profundidade de até 1,5xD quando utilizada sem fluido de corte.

Com relação à dados de corte, esta ferramenta é altamente produtiva, utilizando os seguintes dados de corte médios para usinagem de Ferro fundido cinzento sem refrigeração:

$$v_c = 60\sim 80\text{m/min}$$

$$f = 0,15\sim 0,20\text{mm/rotação}$$

#### **4.5 - Equipamentos e Instrumentos**

A seguir serão apresentados os equipamentos e instrumentos utilizados para possibilitar a realização deste trabalho, bem como lhe dar o respaldo de confiabilidade.

Inicialmente, estão apresentados os equipamentos utilizados nos pré-ensaios, onde foram definidos os parâmetros de corte utilizados durante todos os experimentos.

Os parâmetros estudados e monitorados durante os experimentos foram divididos em parâmetros intrínsecos ao processo e parâmetros resultantes do processo, e denominados o primeiro como Grandezas diretas e o segundo Grandezas indiretas.

As Grandezas diretas foram monitoradas no momento da usinagem, através de um sistema de aquisição de dados, e divididas como:

- Parâmetros mecânicos
  - ⇒ Força de avanço
  - ⇒ Momento torsor
- Parâmetros elétricos
  - ⇒ Tensão
  - ⇒ Corrente

As Grandezas indiretas foram consideradas leituras resultantes por terem sido realizadas no produto usinado, os parâmetros aqui analisados foram:

- Diâmetro efetivo
- Circularidade
- Rugosidade

##### **4.5.1 – Equipamentos utilizados para pré-ensaios e preparação das amostras**

Para preparação dos corpos de prova a partir de “tarugos”, bem como nos experimentos para definição dos parâmetros de corte utilizados nos experimentos (pré-ensaios), foram utilizadas as seguintes máquinas do Centro Tecnológico de Usinagem da Iscar do Brasil:

- Torno CNC Romi, modelo Galaxy 30, com rotação máxima de 3.000 rpm e potência de 18,5 kW.
- Centro de Usinagem Vertical CNC Okuma, modelo MA56VB, com rotação máxima de 12.000 rpm e potência de 18 kW em regime constante e 22,5 kW em regime de pico por no máximo 10 minutos.

#### **4.5.2 – Máquina utilizada nos ensaios**

- Torno mecânico Romi, modelo P400, com rotação máxima de 2.900 rpm e potência de 7,5 CV.

#### **4.5.3 – Sistema para Aquisição de Dados**

O sistema de aquisição de dados utilizados foi desenvolvido pelos docentes e pesquisadores do Laboratório de Usinagem da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, com a preocupação de que o sistema fosse compatível com as necessidades das pesquisas realizadas, além de baixo custo.

As Figuras 4.14 e 4.15, detalham a bancada de aquisição de dados desenvolvida. Esta bancada tem capacidade de efetuar as leituras diretas, em tempo real, durante o processo de furação. Ou seja, são obtidas as informações de tensão, corrente, força de avanço e momento torsor.

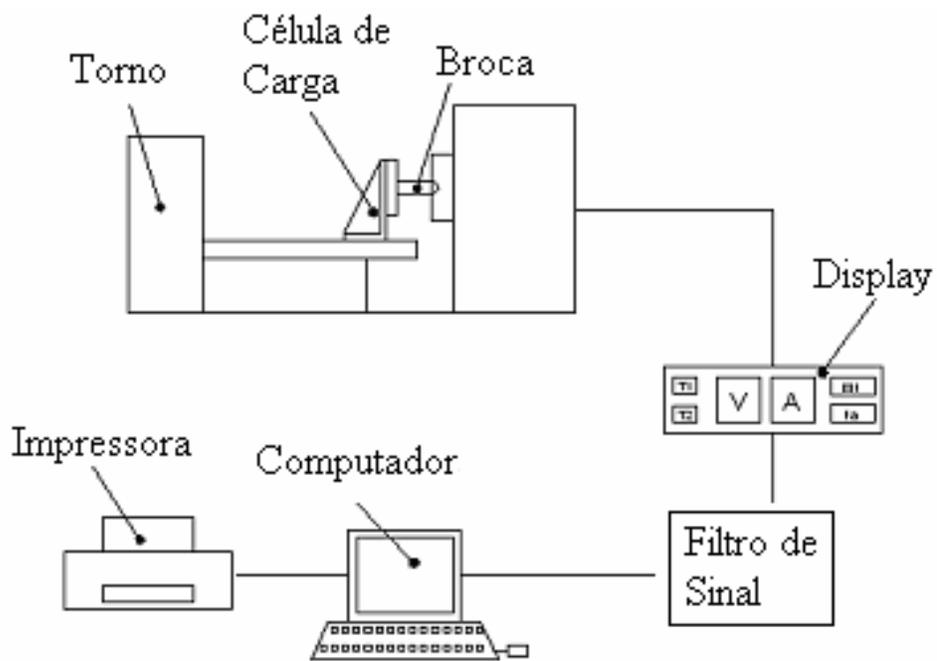


Figura 4.14 – Esquema de ligação dos equipamentos (CAPUANO, 2004)

Tensão

Corrente

Força de avanço /  
Momento torsor

Figura 4.15 – Bancada de aquisição de dados

#### 4.5.4 - Placa de aquisição de dados

A placa utilizada para aquisição de dados é de fabricação nacional e seu modelo é AD8Bv2 (Figura 4.16) deve ser ligada internamente no microcomputador em *slot* padrão ISA. As operações de escrita e leitura são feitas por endereçamento de I/O.

A placa dispõe de 8 entradas analógicas, 8 entradas digitais, 8 saídas digitais. As entradas analógicas, possibilitam sinais de 0 a 5,12 V e estão sendo utilizadas no presente trabalho. Quanto ao intervalo de aquisição dos sinais, esta placa trabalha a partir 100 ms.

Assim sendo, faz-se necessário que todo sistema de geração de sinais seja transformado para uma faixa de tensão de 0 a 5,12 V antes de sua entrada na placa.

O fabricante da placa fornece também um software que capta os sinais, e os exibe em tela na forma de gráfico (Figura 4.16), além de gerar um arquivo em extensão *grf* e outro em extensão *xls*, ou seja, utilizável por planilhas eletrônicas *Excel Microsoft*®.

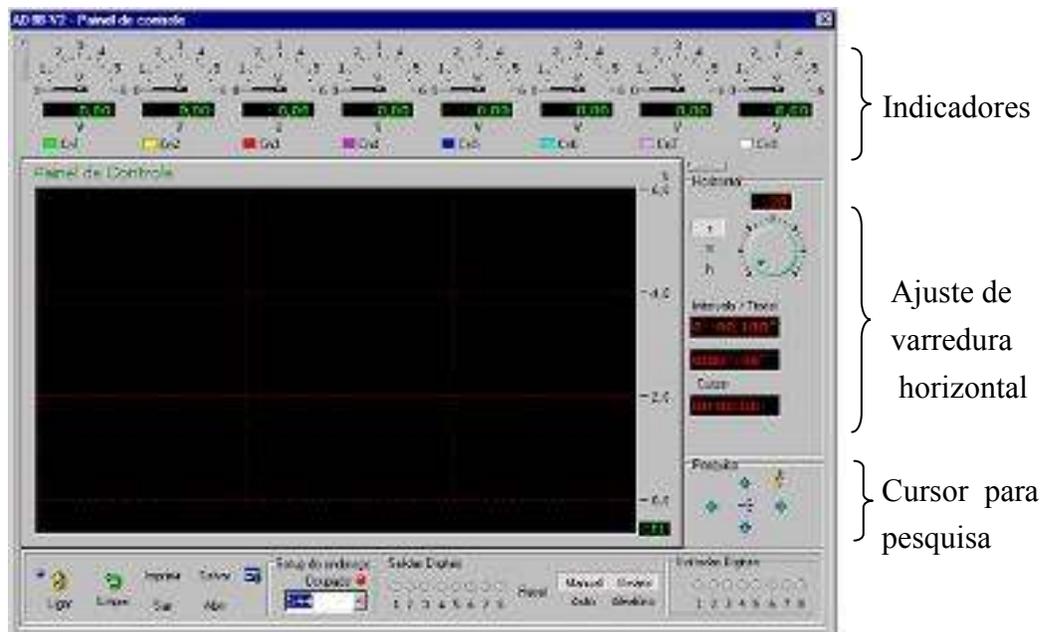


Figura 4.16 – Tela de plotagem AD8Bv2 (CAPUANO, 2004)

Os sinais colhidos de 0 à 5,12 V são transformados para a escala da grandeza conforme escala de equivalência previamente informada para cada canal. Assim, as curvas características terão escala própria.

O software permite o ajuste da varredura horizontal. Assim, pode-se estabelecer com qual intervalo de leituras os dados são adquiridos.

Para minimizar os ruídos oriundos dos sistemas geradores de sinal montou-se um filtro elétrico. Este filtro também tem a função de fusível: caso, por algum motivo, haja um sinal superior a 5V, o circuito impedirá sua passagem para a placa.

#### 4.5.5 Dados de alimentação da máquina

Para a coleta dos dados de tensão de alimentação da máquina, existe um sistema transformador e retificador, capaz de ler tensões AC de 0 a 250V e emitir um sinal em DC de 0 a 5V, respectivamente.

Para a medição da corrente existe um sistema semelhante ao da tensão. A escala de leitura é de 0 a 30 A e o sinal de saída é de 0 a 5V, respectivamente.

#### 4.5.6 Força de avanço e momento torsor

Existem dois esforços principais no processo de furação: Momento torsor ( $M_t$ ) ou Torque e Força de avanço ( $F_a$ ).

Para efetuar as medições destes esforços, fez-se uso de uma célula de carga dotada de extensômetros elétricos arranjados fisicamente em ponte completa para a medição dos dois esforços.

Esta célula, (Figuras 4.17 e 4.18), teve projeto e fabricação exclusiva do Laboratório de Usinagem da FATEC, e é capaz de medir os dois esforços simultaneamente, possuindo as seguintes dimensões e capacidade de carga (Tabela 4.4):

Diâmetro: 250mm

Altura: 45mm

Tabela 4.4 Característica da célula de carga

	<b>Torque</b>	<b>Força de avanço</b>
<b>Capacidade</b>	20kgf.m	5.000kgf
<b>Resolução</b>	0,01kgf.m	0,1kgf
<b>Característica elétrica [mV/V]</b>	0,93	2,42
<b>Precisão</b>	desvio menor que 0,9%	desvio menor que 0,5%

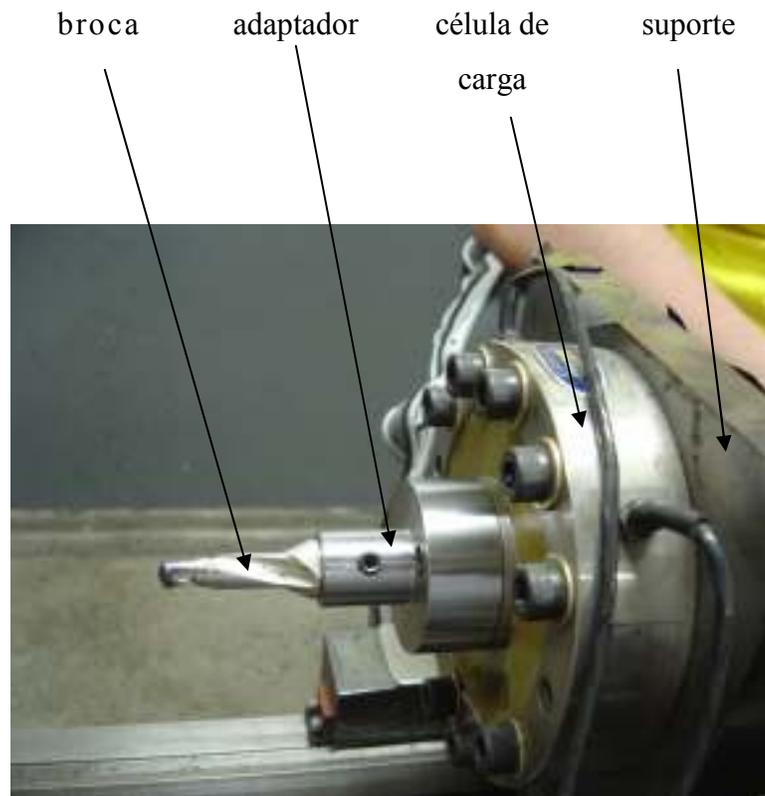


Figura 4.17 – Foto da célula de carga



Figura 4.18 – Detalhe interno da célula de carga (CAPUANO, 2004)

Para a leitura dos esforços, e envio ao sistema de aquisição de dados, foi adquirido da

empresa CRM Ltda., um sistema eletrônico para leitura de carga dinâmica com “display” e saída de até 5V DC, o qual conecta-se ao sistema de aquisição de dados proposto.

#### 4.5.7 - Calibração da Célula de carga

A célula de carga, é calibrada a partir de um dispositivo para compressão (força de avanço) e torque, de forma simultânea, já que ele funciona fornecendo esses sinais conjuntamente.

Para essa calibração, o Laboratório de Usinagem da FATEC desenvolveu um dispositivo próprio, composto de um braço devidamente balanceado, onde se aplica uma carga conhecida para gerar um torque e simultaneamente aplicar uma carga de compressão pré determinada (Figura 4.19).

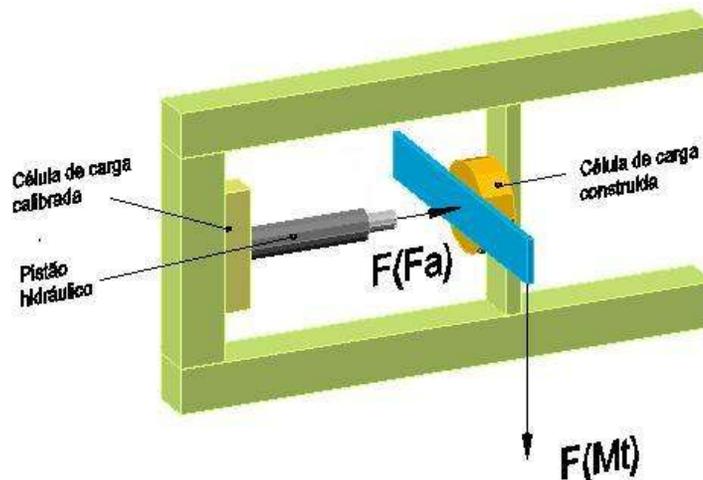


Figura 4.19 – Calibração da célula de carga (CAPUANO, 2004)

Assim, a calibração do torque e da força de avanço é simultânea, simulando o que ocorre no ensaio, onde uma carga interferirá na outra no dinamômetro.

#### 4.5.8 – Aquisição dos valores das Grandezas indiretas

A rugosidade superfície usinada foi obtida através de um rugosímetro portátil modelo Surfrest SJ-201P da marca Mitutoyo (Figura 4.20).



Figura 4.20 – Foto do Rugosímetro portátil SurfTest SJ-201P

As principais características de leitura deste aparelho são apresentadas abaixo na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Características de leitura do Rugosímetro SJ-201P

Unidade de Leitura	
Perfis analisados	Perfil primário (P), Perfil fé rugosidade (R), DIN 4776
Parâmetros de avaliação	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr, A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Rvk, Mr 1, Mr 2, Vo
Análises gráficas	-
Padrão de rugosidade	DIN, ISO, ANSI, JIS
Comprimento de (L) medição	0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm
Comprimento de Cut-off	$\Lambda_c$ : 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5mm $\Lambda_s$ : 2,5 $\mu\text{m}$ ; 8 $\mu\text{m}$

A aquisição dos valores referentes ao diâmetro efetivo e à circularidade obtidos após a usinagem foram efetuadas em uma Máquina de Medir Coordenadas, modelo Crysta-Plus M7106, sendo a capacidade de medição desta máquina nos seguintes eixos: X=700mm, Y=1.000mm e Z=600mm. A figura 4.21 ilustra a máquina utilizada.



Figura 4.21 – Foto da Máquina de Medir Coordenadas Crysta-Plus M7106

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos nos ensaios de furação, tanto das grandezas diretas como das indiretas.

Conforme exposto no sub-capítulo 4.2 que trata da codificação dos ensaios, os ensaios foram divididos em 5 valores de desgaste frontal ( $VB = 0$ ;  $VB = 0,05$ ;  $VB = 0,10$ ;  $VB = 0,15$  e  $VB = 0,20$ ). Para cada um desses valores foram realizados 5 ensaios, totalizando 25. Após a realização destes foram realizadas réplicas de todos os ensaios com pastilhas diferentes das anteriores, porém com o mesmo desgaste frontal, o que totalizaram mais 25 ensaios.

Sendo assim, os resultados apresentados neste capítulo referem-se à 10 ensaios para cada medida de desgaste frontal (considerando-se ensaio e réplica), totalizando 50 ensaios.

Tanto para a tabela referente aos dados oriundos da leitura direta bem como os de leitura indireta foi utilizado o critério de desgaste frontal comum para agrupamento dos resultados.

A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos (conclusivos) para as grandezas diretas para os ensaios realizados com a primeira pastilha de cada valor de desgaste frontal, enquanto a tabela 5.2 apresenta os mesmos resultados, porém com os ensaios realizados com a segunda pastilha de cada valor de desgaste frontal (réplica). Os valores apresentados são a média dos 5 ensaios realizados com cada pastilha.

A primeira coluna indica a qual teste se refere a linha que contém os dados de desgaste frontal ( $VB$ ), tensão média ( $V_m$ ), corrente média ( $I_m$ ), força de avanço média ( $Fa_m$ ) e Momento torsor médio ( $Mt_m$ ), respectivamente.

Tabela 5.1 – Resultados agrupados para grandezas diretas (1ª pastilha)

Código de Teste	VB (mm)	$V_m$ (V)	$I_m$ (A)	$P_m$ (W)	$Fa_m$ (kgf)	$Mt_m$ (kgfm)
VB = 0,00	0.00	222.64	12.06	2685.83	145.85	0.99
VB = 0,05	0.05	221.99	12.20	2709.33	170.00	1.15
VB = 0,10	0.10	222.76	12.09	2693.46	301.27	1.36
VB = 0,15	0.15	222.86	12.41	2766.63	408.18	1.72
VB = 0,20	0.20	229.90	12.18	2800.69	536.18	2.08

Tabela 5.2 – Resultados agrupados para grandezas diretas (2ª pastilha – Réplica)

Código de Teste	VB (mm)	V_m (V)	I_m (A)	P_m (W)	Fa_m (kgf)	Mt_m (kgfm)
VB = 0,00	0.00	225.54	12.20	2751.89	144.46	1.03
VB = 0,05	0.05	225.47	12.47	2811.32	177.27	1.16
VB = 0,10	0.10	224.63	12.14	2727.30	306.18	1.36
VB = 0,15	0.15	228.30	12.50	2853.29	408.91	1.72
VB = 0,20	0.20	230.07	12.24	2816.96	542.36	2.09

Na figura 5.1 ilustram-se, como exemplo, os resultados obtidos em cada ensaio realizado. No Anexo II é possível visualizar a maneira de obtenção dos resultados.

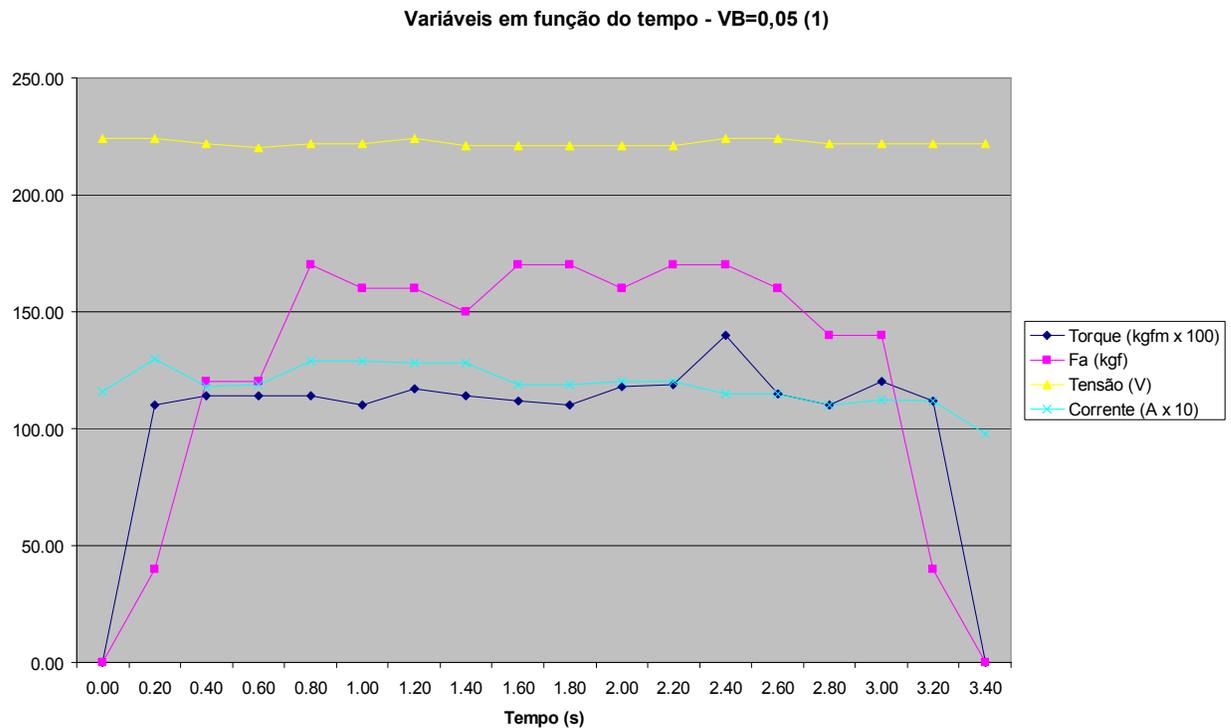


Figura 5.1 – Gráfico do ensaio VB = 0,05 (1)

As figuras de 5.2 a 5.10 exemplificam o comportamento das grandezas diretas em função do tempo ao longo do processo de furação e também ilustram a evolução do desgaste da ferramenta.

**Variáveis em função do tempo - VB=0**

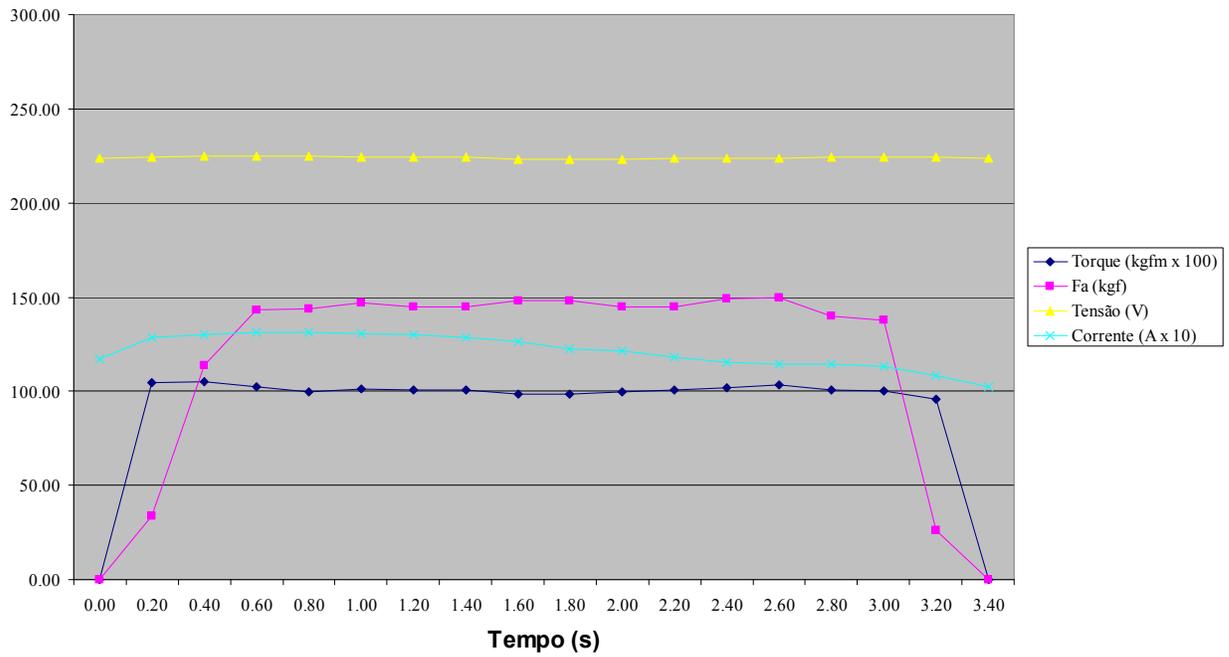


Figura 5.2 – Gráfico geral do ensaio VB = 0

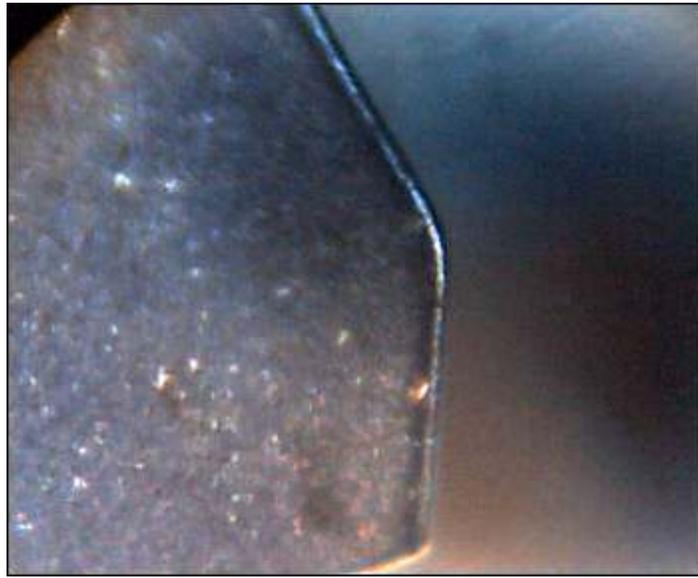


Figura 5.3 – Foto do desgaste VB = 0,05 (200x)

#### Variáveis em função do tempo - VB=0,05

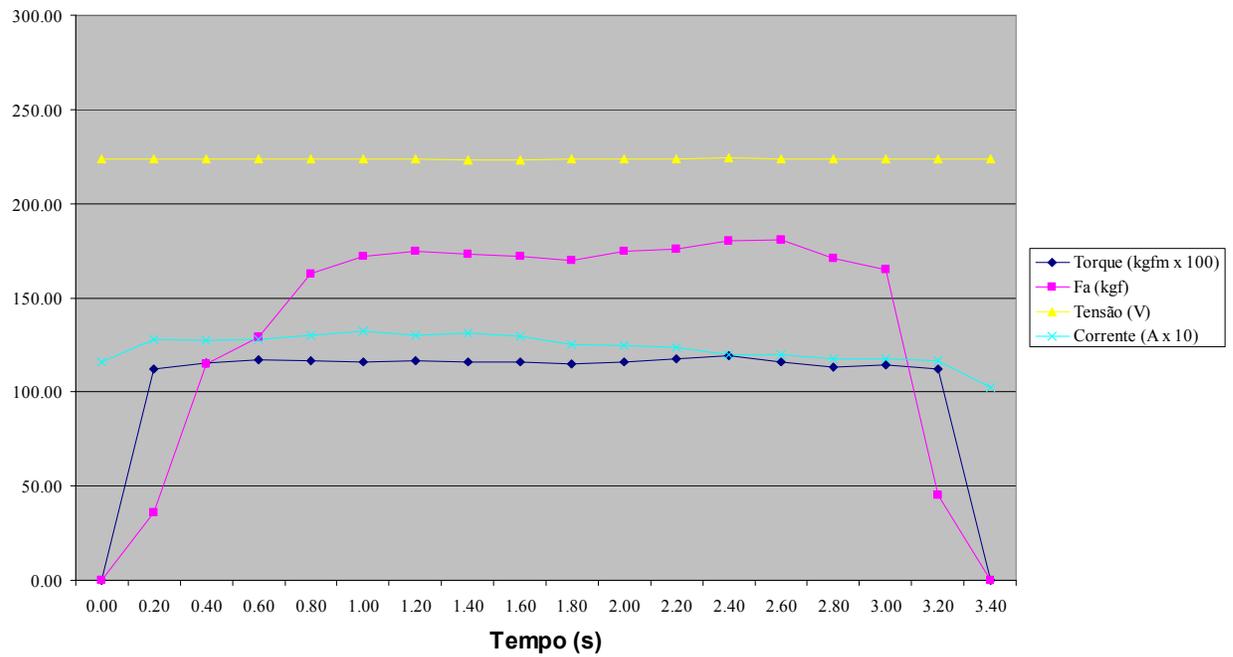


Figura 5.4 - Gráfico geral do ensaio VB = 0,05

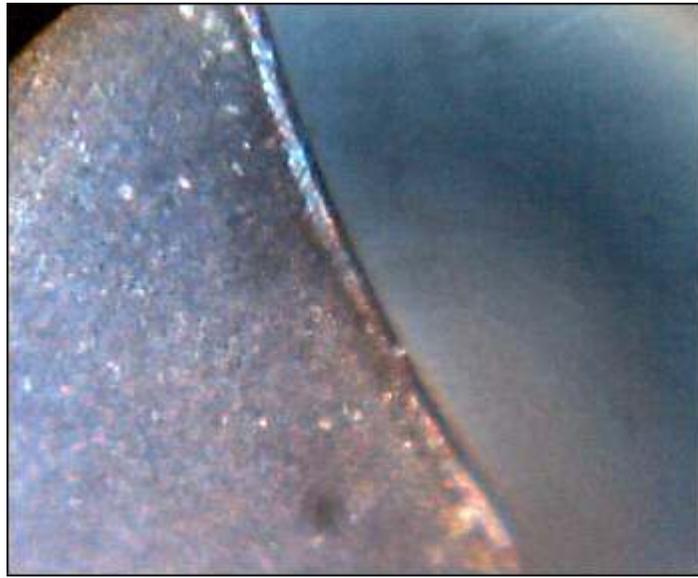


Figura 5.5 – Foto do desgaste VB = 0,10 (200x)

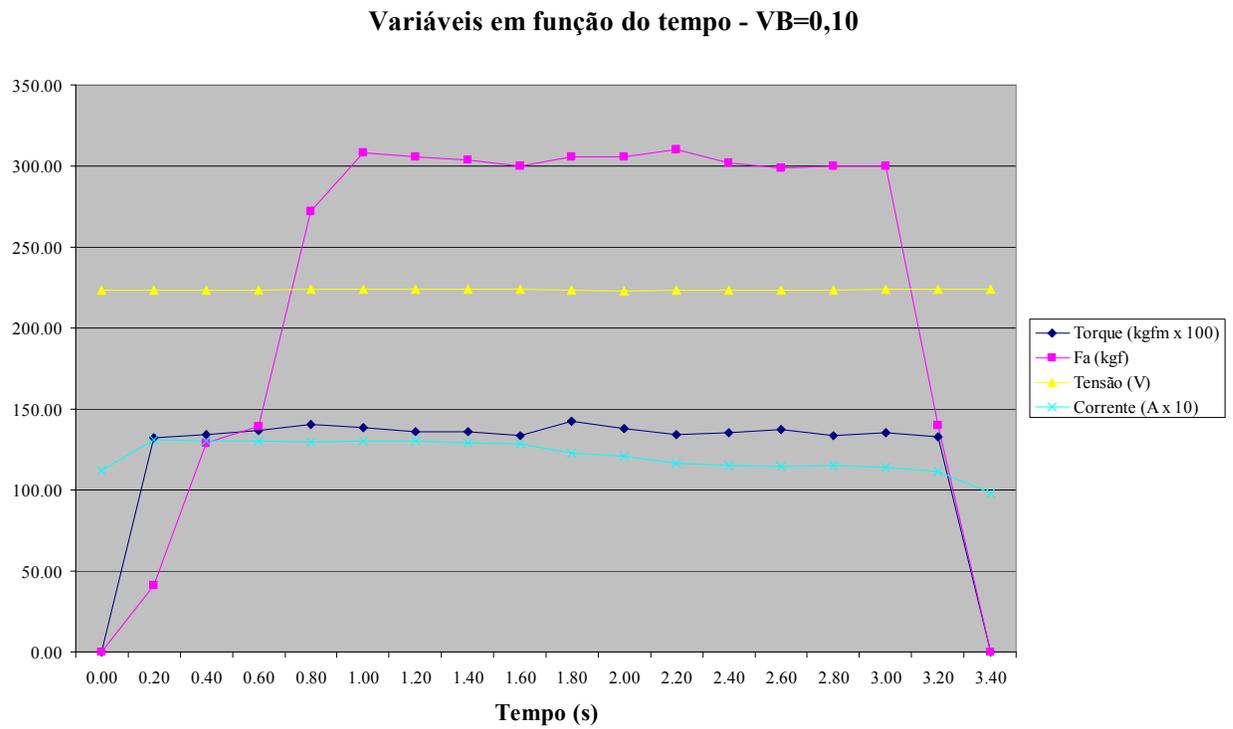


Figura 5.6 – Gráfico geral do ensaio VB = 0,10

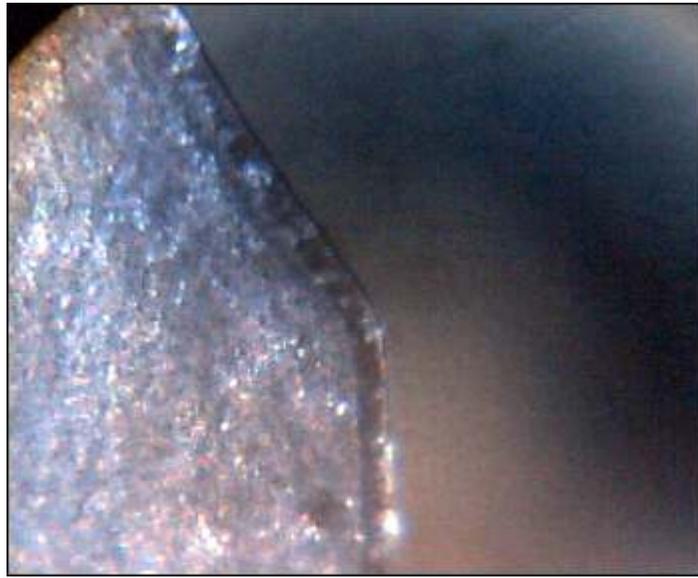


Figura 5.7 – Foto do desgaste VB = 0,15 (200x)

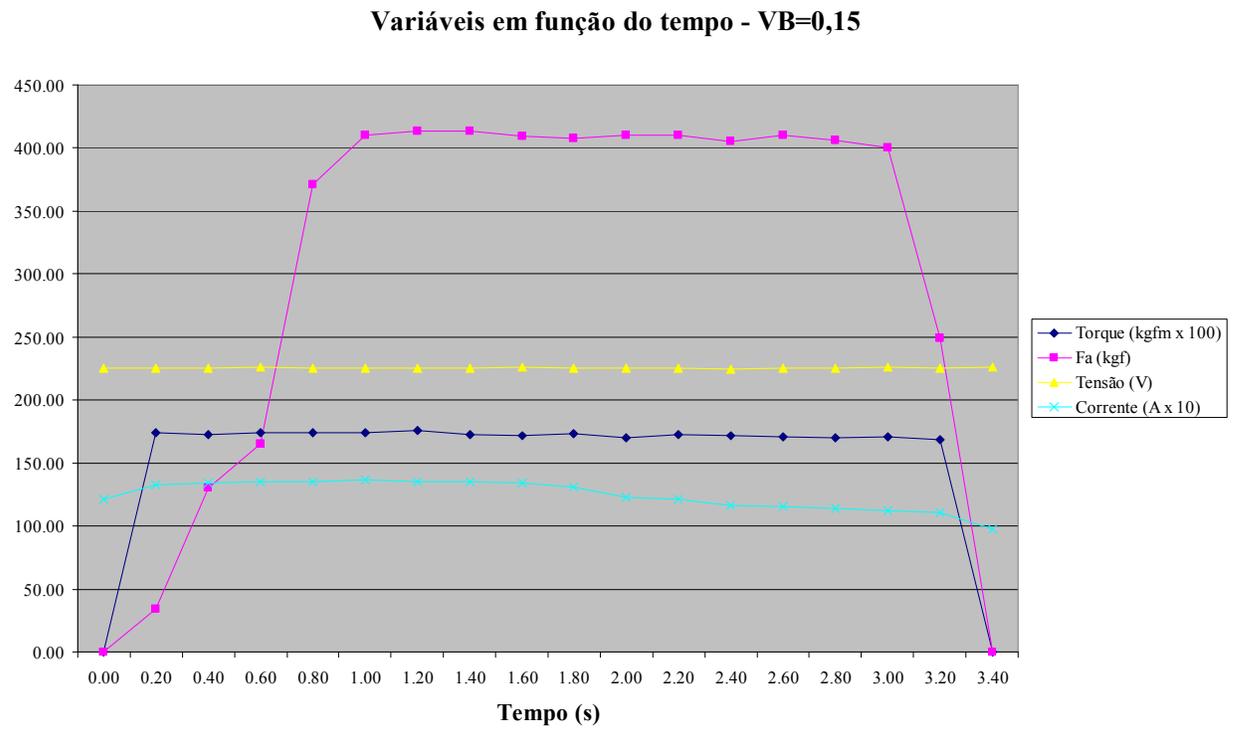


Figura 5.8 – Gráfico geral do ensaio VB = 0,15

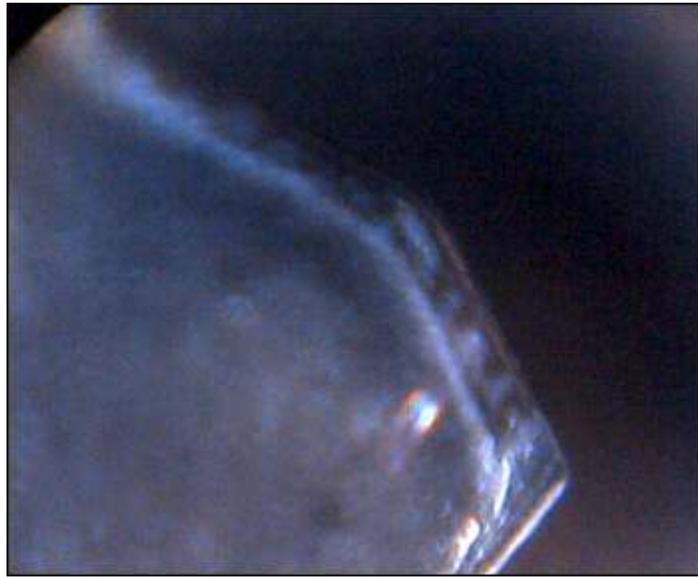


Figura 5.9 – Foto do desgaste VB = 0,20 (200x)

Variáveis em função do tempo - VB=0,20

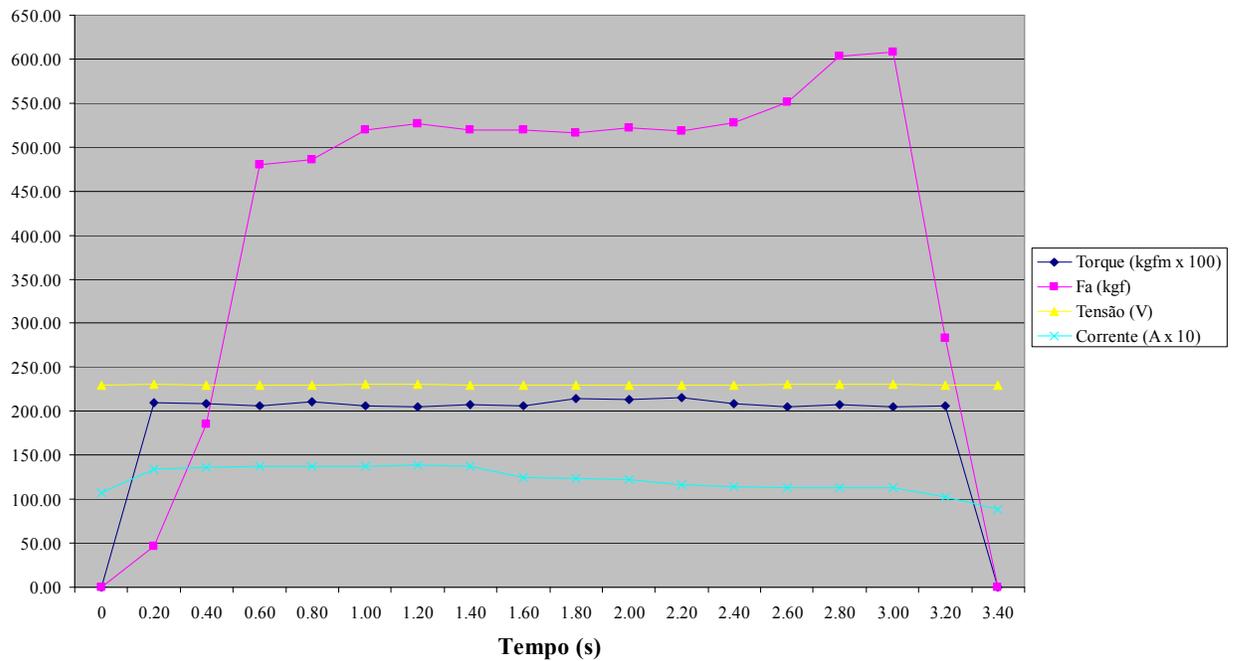


Figura 5.10 – Gráfico geral do ensaio VB = 0,20

Examinando a seqüência de figuras observa-se que a tensão mantém-se praticamente

constante ao longo de todo o período de ensaio. Já a corrente, apresenta claramente o instante em que inicia-se o processo de furação, dado o incremento em sua grandeza, a partir daí exibe certa estabilidade, com uma pequena queda na metade do furo, até a finalização do mesmo, quando atinge um valor inferior, porém próximo ao verificado na situação inicial.

Assim como a corrente, a força de avanço e o momento torsor revelam o mesmo comportamento no instante inicial da furação, indicando o início do processo de furação.

A força de avanço, bem como o momento torsor apresentam uma oscilação em torno de um valor médio, com tendência de declínio que se acentua próximo ao término da execução do furo, à exceção do ensaio  $VB = 0,20$ , onde temos um pico na força de avanço no final do furo, antes de iniciar o declínio. Esse pico se justifica pelo fato de que com esse valor de desgaste frontal, ao término do furo ocorre a quebra abrupta da borda do material, que se reflete no gráfico.

Quanto à potência (através do monitoramento da variação da corrente), é possível observar através da Figura 5.11 que quando relacionadas com o VB, sofrem alterações relativamente pequenas, não podendo ser monitoradas satisfatoriamente.

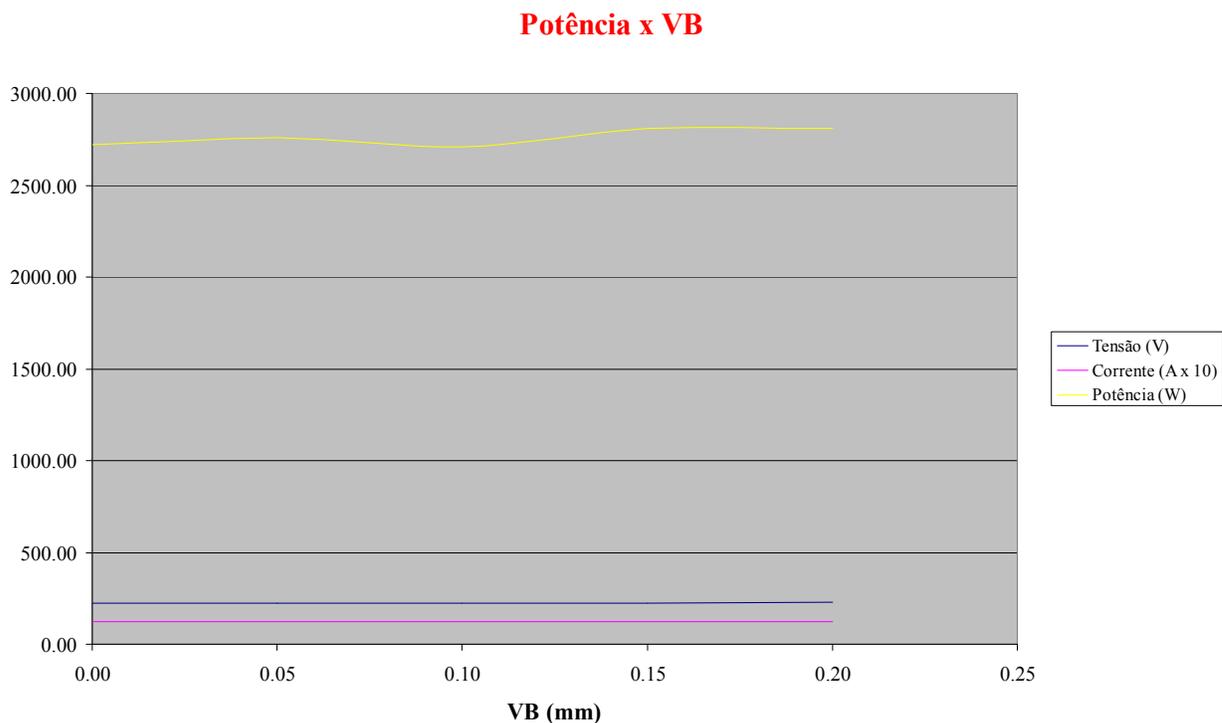


Figura 5.11 Potência em função do VB

Observa-se nas Figuras 5.12 e 5.13 apresentadas a seguir que tanto o momento torsor quanto a força de avanço aumentam conforme o aumento do desgaste frontal (VB) da ferramenta, porém com comportamentos diferentes, já que no momento torsor há uma grande variação entre os valores de VB 0,10 à 0,20; também é possível notar na figura 5.12 que entre os valores de VB 0,00 à 0,05 a variação de valores é pequena, porém o gráfico se mantém sempre em ascensão.

Já na figura 5.13 observa-se que as maiores variações de valores da força de avanço estão entre os valores de VB 0,05 à 0,20; bem como que o gráfico se mantém praticamente estável entre os valores de VB 0,00 à 0,05, diferentemente do resultado obtido com o momento torsor.

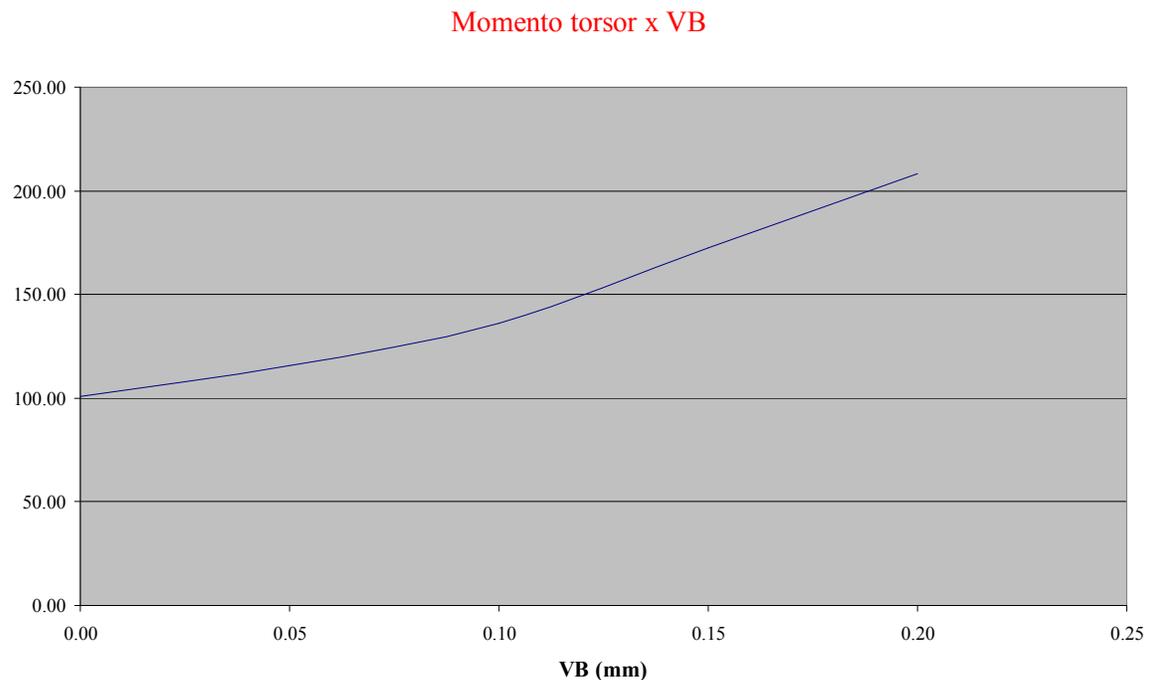


Figura 5.12 – Comportamento do momento torsor em função do VB

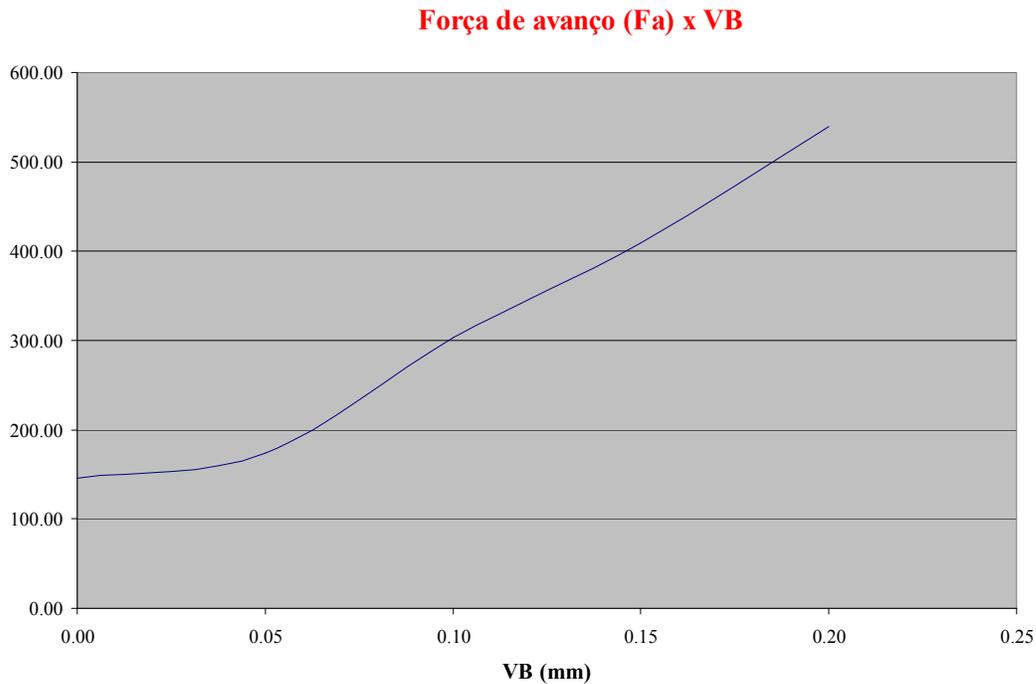


Figura 5.13 – Comportamento da força de avanço em função do VB

Na tabela 5.3 temos os valores de leitura das medidas indiretas, sendo que as colunas apresentam respectivamente o código do teste realizado e as grandezas: desgaste frontal (VB), rugosidade média (Ra), erro de circularidade e dimensão efetiva.

Tabela 5.3 – Medidas Indiretas

Código de Teste	VB (mm)	Rugosidade Média Ra (mm)	Erro de Circularidade (mm)	Dimensão Efetiva (mm)
0,00 (1)	0,00	2.18	0.005	12.330
0,00 (2)	0,00	2.16	0.005	12.328
0,00 (3)	0,00	2.16	0.006	12.314
0,00 (4)	0,00	2.09	0.016	12.309
0,00 (5)	0,00	2.08	0.014	12.328
0,00 (R1)	0,00	2.04	0.008	12.312
0,00 (R2)	0,00	2.08	0.007	12.314
0,00 (R3)	0,00	2.12	0.012	12.322
0,00 (R4)	0,00	2.02	0.014	12.311

Código de Teste	VB (mm)	Rugosidade Média Ra (mm)	Erro de Circularidade (mm)	Dimensão Efetiva (mm)
0,00 (R5)	0.00	2.07	0.009	12.317
0,05 (1)	0.05	1.28	0.011	12.321
0,05 (2)	0.05	2.47	0.014	12.313
0,05 (3)	0.05	2.98	0.026	12.303
0,05 (4)	0.05	2.26	0.011	12.315
0,05 (5)	0.05	2.50	0.009	12.337
0,05 (R1)	0.05	2.42	0.014	12.317
0,05 (R2)	0.05	2.31	0.012	12.314
0,05 (R3)	0.05	2.28	0.018	12.321
0,05 (R4)	0.05	2.27	0.017	12.330
0,05 (R5)	0.05	2.31	0.012	12.327
0,10 (1)	0.10	2.47	0.006	12.308
0,10 (2)	0.10	1.91	0.013	12.326
0,10 (3)	0.10	2.28	0.011	12.311
0,10 (4)	0.10	2.73	0.022	12.345
0,10 (5)	0.10	2.68	0.019	12.310
0,10 (R1)	0.10	2.44	0.012	12.317
0,10 (R2)	0.10	2.33	0.011	12.330
0,10 (R3)	0.10	2.34	0.018	12.319
0,10 (R4)	0.10	2.34	0.021	12.327
0,10 (R5)	0.10	2.37	0.013	12.324
0,15 (1)	0.15	2.24	0.015	12.352
0,15 (2)	0.15	3.29	0.019	12.341
0,15 (3)	0.15	2.44	0.009	12.342
0,15 (4)	0.15	2.98	0.018	12.337
0,15 (5)	0.15	2.60	0.019	12.344
0,15 (R1)	0.15	2.74	0.016	12.347
0,15 (R2)	0.15	2.98	0.020	12.352
0,15 (R3)	0.15	2.71	0.014	12.341
0,15 (R4)	0.15	2.82	0.018	12.339
0,15 (R5)	0.15	2.71	0.019	12.346
0,20 (1)	0.20	3.02	0.021	12.371
0,20 (2)	0.20	2.98	0.014	12.357

Código de Teste	VB (mm)	Rugosidade Média Ra (mm)	Erro de Circularidade (mm)	Dimensão Efetiva (mm)
0,20 (3)	0.20	3.02	0.019	12.365
0,20 (4)	0.20	2.44	0.015	12.355
0,20 (5)	0.20	2.72	0.017	12.347
0,20 (R1)	0.20	2.96	0.018	12.364
0,20 (R2)	0.20	3.02	0.024	12.359
0,20 (R3)	0.20	3.12	0.017	12.367
0,20 (R4)	0.20	3.01	0.021	12.359
0,20 (R5)	0.20	2.94	0.016	12.362

Para ilustrar melhor os dados da tabela 5.3, seguem os gráficos, demonstrando as variações de grandeza em função do desgaste frontal VB da pastilha.

A figura 5.14, ilustra a variação do diâmetro efetivo em função do VB, onde nota-se que o mesmo aumenta a medida que o desgaste frontal VB também aumenta, o que a princípio não parece coerente, uma vez que o aumento do VB implica na redução do diâmetro da broca e conseqüentemente do furo usinado. Isso se explica pelo fato de que com o aumento do desgaste frontal da pastilha aumenta a dificuldade de penetração da broca no material, bem como os esforços de corte. O fato dessa broca ter o corpo de aço, resulta em maior flexibilidade, o que acarreta na tendência dessa broca fletir com esse esforço, ocasionando uma excentricidade na ponta da ferramenta que se refletirá no aumento do diâmetro do furo usinado.

Observa-se também que não há grandes erros de dispersão em todos os pontos ensaiados.

### Dimensão Efetiva x Desgaste frontal

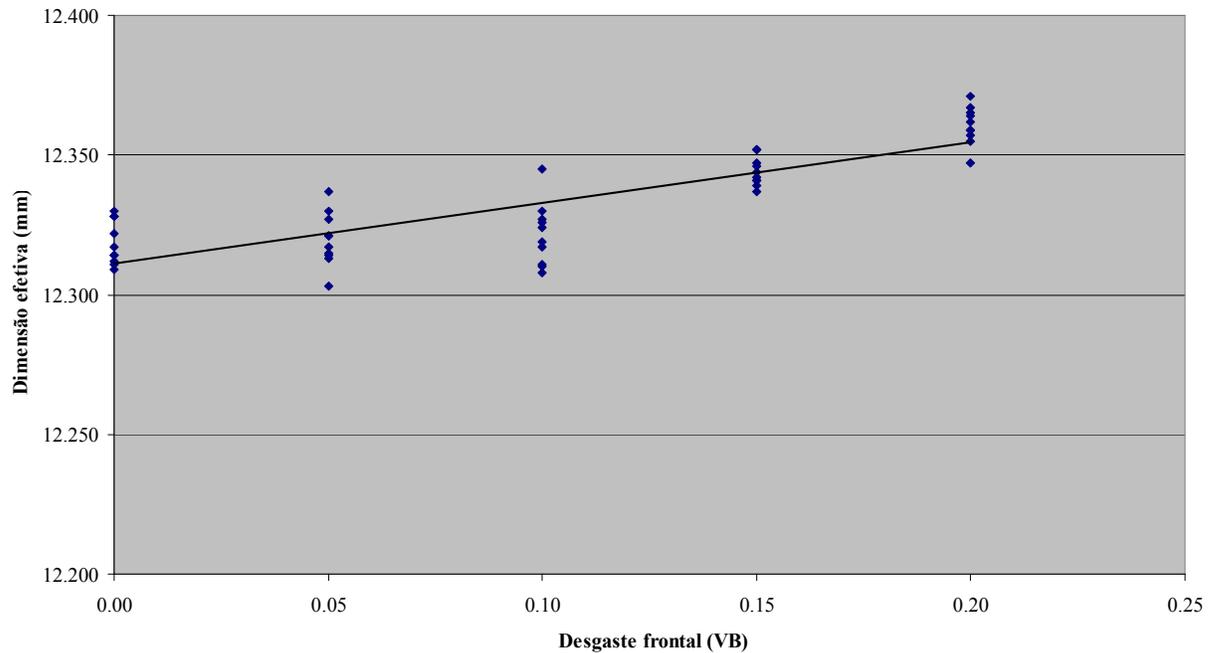


Figura 5.14 – Diâmetro efetivo em função do desgaste frontal

A figura 5.15 relaciona o erro de circularidade ao desgaste frontal para verificar a tendência do processo. É possível notar a ascensão da grandeza na mesma proporção do aumento do desgaste frontal da pastilha, o que era esperado uma vez que o desgaste provoca avarias na broca, e associado à tendência da flexão do corpo da broca na mesma proporção resulta em uma piora da circularidade do diâmetro usinado.

Esta grandeza foi a que apresentou a maior dispersão durante os ensaios.

### Erro de Circularidade x Desgaste frontal

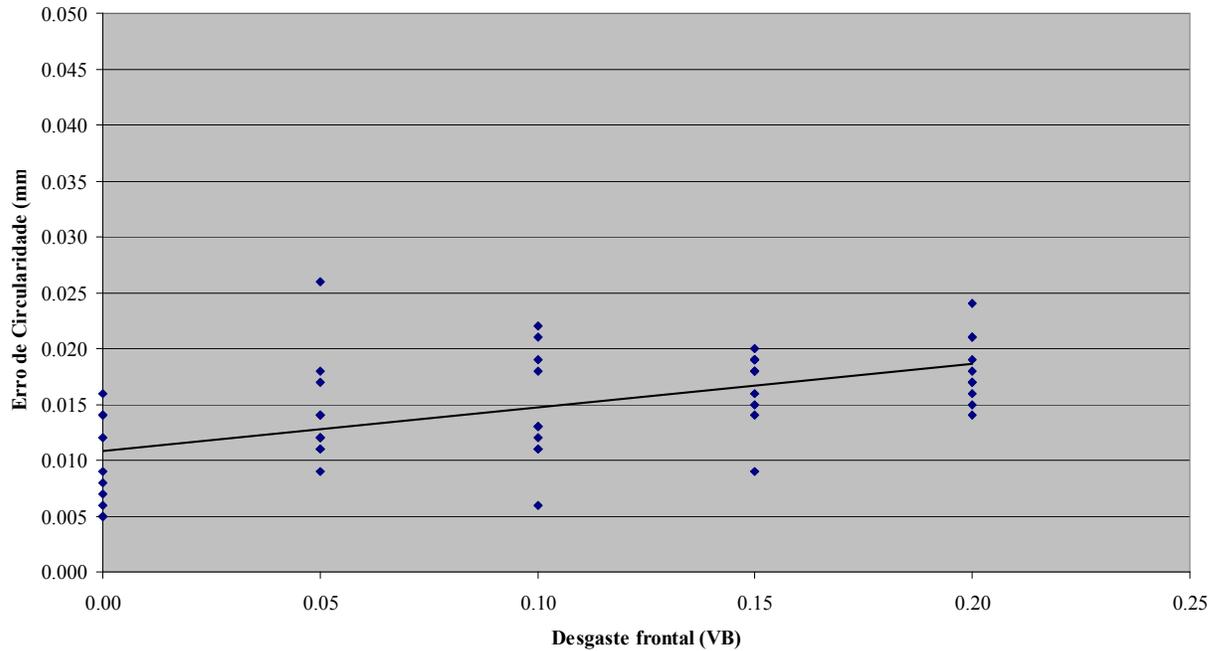


Figura 5.15 – Erro de circularidade em função do desgaste frontal

Na figura 5.16 estão as menores dispersões das grandezas observadas, também observa-se a tendência da rugosidade dos furos em função do aumento do desgaste frontal, sendo que essa aumenta enquanto o desgaste frontal da pastilha aumenta. O resultado encontrado vai de encontro ao que era esperado, uma vez que o aumento do desgaste implica no desgaste do flanco da ferramenta, responsável diretamente pelo acabamento superficial do diâmetro usinado, esse desgaste pode ser visto na figura 5.16.

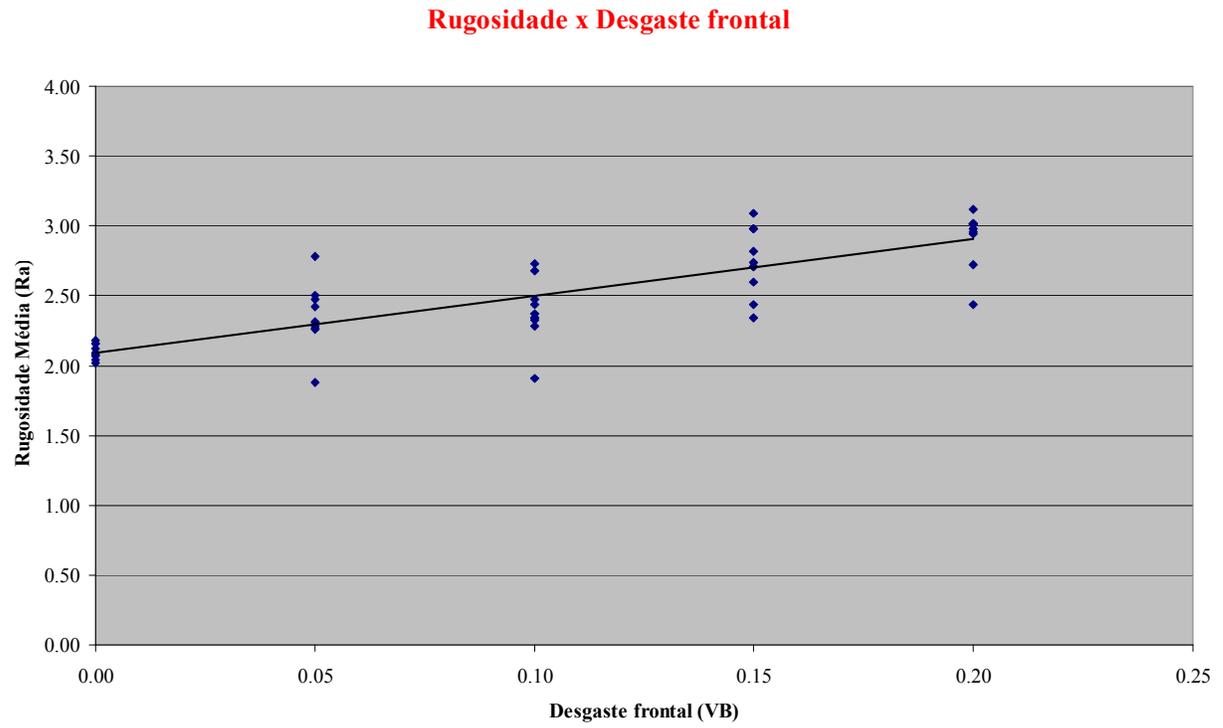


Figura 5.16 – Rugosidade média em função do desgaste frontal

## 6 DISCUSSÃO

Na tabela 6.1, temos os resultados conclusivos das grandezas diretas mostradas em forma de gráficos anteriormente.

Tabela 6.1 – Resultados conclusivos das grandezas diretas

Código de Teste	VB (mm)	Mt_m (kgfm)	Fa_m (kgf)	Tensão (V)	Corrente (I)
0,00 (1)	0.00	0.94	145.38	222.39	11.86
0,00 (2)	0.00	0.95	146.15	223.06	12.02
0,00 (3)	0.00	1.06	145.38	222.67	11.92
0,00 (4)	0.00	1.00	143.08	222.67	12.19
0,00 (5)	0.00	1.01	149.23	222.44	12.32
0,00 (R1)	0.00	0.97	141.54	224.56	12.02
0,00 (R2)	0.00	1.00	128.46	225.56	12.38
0,00 (R3)	0.00	1.07	149.23	226.33	12.19
0,00 (R4)	0.00	1.03	150.77	225.44	12.07
0,00 (R5)	0.00	1.07	152.31	225.83	12.34
0,05 (1)	0.05	1.16	156.92	222.17	11.87
0,05 (2)	0.05	1.16	166.15	221.61	11.79
0,05 (3)	0.05	1.14	166.92	222.28	12.77
0,05 (4)	0.05	1.15	166.15	221.61	12.23
0,05 (5)	0.05	1.15	174.62	222.28	12.36
0,05 (R1)	0.05	1.16	173.85	225.39	12.31
0,05 (R2)	0.05	1.14	169.23	226.61	12.34
0,05 (R3)	0.05	1.15	163.85	225.06	12.33
0,05 (R4)	0.05	1.17	179.23	225.06	12.52
0,05 (R5)	0.05	1.18	176.92	225.22	12.84
0,10 (1)	0.10	1.34	290.00	222.72	12.28
0,10 (2)	0.10	1.36	286.92	223.17	12.08
0,10 (3)	0.10	1.38	279.23	222.67	11.93

Código de Teste	VB (mm)	Mt_m (kgfm)	Fa_m (kgf)	Tensão (V)	Corrente (I)
0,10 (4)	0.10	1.45	296.15	222.28	12.26
0,10 (5)	0.10	1.27	280.00	222.94	11.90
0,10 (R1)	0.10	1.38	294.62	225.11	12.04
0,10 (R2)	0.10	1.39	290.00	222.67	12.09
0,10 (R3)	0.10	1.37	290.00	225.39	12.41
0,10 (R4)	0.10	1.27	281.54	225.00	11.94
0,10 (R5)	0.10	1.38	297.69	225.00	12.23
0,15 (1)	0.15	1.74	381.54	222.94	12.49
0,15 (2)	0.15	1.72	392.31	223.00	12.42
0,15 (3)	0.15	1.72	383.08	222.17	12.17
0,15 (4)	0.15	1.71	376.92	223.39	12.54
0,15 (5)	0.15	1.72	389.23	222.78	12.46
0,15 (R1)	0.15	1.73	391.54	228.89	12.45
0,15 (R2)	0.15	1.71	383.85	227.94	12.61
0,15 (R3)	0.15	1.71	378.46	228.00	12.53
0,15 (R4)	0.15	1.75	403.08	228.28	12.47
0,15 (R5)	0.15	1.73	389.23	228.39	12.43
0,20 (1)	0.20	2.09	527.69	229.72	12.03
0,20 (2)	0.20	2.07	523.08	229.67	12.36
0,20 (3)	0.20	2.07	529.23	229.78	12.28
0,20 (4)	0.20	2.09	521.54	230.17	12.13
0,20 (5)	0.20	2.06	533.08	230.17	12.12
0,20 (R1)	0.20	2.06	532.31	230.33	11.84
0,20 (R2)	0.20	2.09	529.23	230.00	12.39
0,20 (R3)	0.20	2.08	526.92	229.89	12.21
0,20 (R4)	0.20	2.08	537.69	229.67	12.28
0,20 (R5)	0.20	2.14	545.38	230.44	12.50

Nota-se uma variação muito pequena na potência consumida durante os ensaios, isso demonstra que no caso estudado, esses dados não podem ser considerados como parâmetros para definição do fim da vida da ferramenta, já que da maneira como foi medida as mesmas não

apresentaram variações sensíveis para monitoramento. Por outro lado, referente à tensão, essa característica foi um ponto positivo uma vez que a rotação do motor desta máquina operatriz está diretamente relacionada com a tensão de alimentação e a uniformidade do ensaio e garantiu melhor confiabilidade no processo.

De acordo com as figuras 5.12 e 5.13 a força de avanço e o momento tórsor, neste caso de estudo podem ser consideradas grandezas indicativas do fim da vida da ferramenta, já que os mesmos apresentam uma variação ascendente à medida que aumenta o valor do desgaste frontal.

A figura 6.1 apresenta o gráfico com as grandezas diretas para efeito comparativo entre as mesmas.

### Grandezas diretas x Avanço do desgaste (VB)

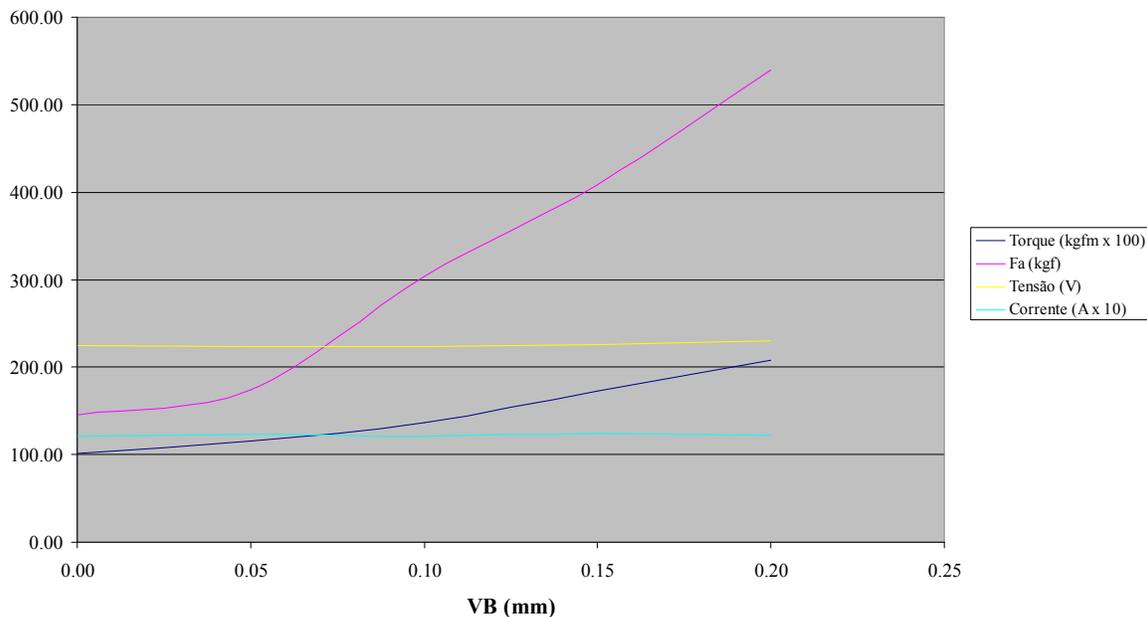


Figura 6.1 – Grandezas diretas em função do desgaste frontal

A figura 6.1 vem a corroborar com as afirmações anteriores, com relação aos parâmetros que podem ou não serem utilizados para avaliar o avanço do desgaste neste objeto de estudo.

O momento tórsor apresenta uma ascendência acentuada quando se aproxima do fim da vida da ferramenta, isso se deve à maior resistência encontrada pela ferramenta para cortar o material, devido ao desgaste pronunciado e ao arredondamento da aresta de corte que requer maior esforço da ferramenta para usinar.

A figura 6.2 demonstra o comportamento das grandezas indiretas em função do desgaste frontal.

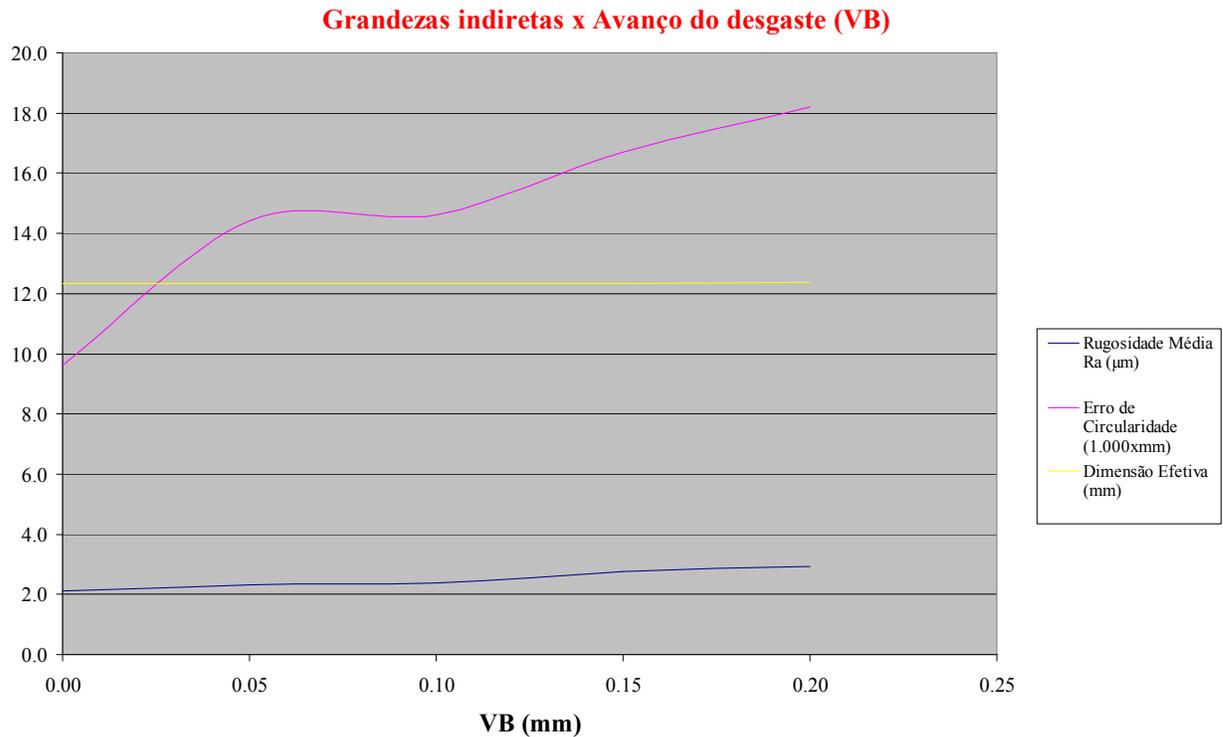


Figura 6.2 – Grandezas indiretas em função do desgaste frontal

Analisando-se a figura 6.2, observa-se que embora aumente na mesma proporção do desgaste frontal, a dimensão efetiva sofre pouca influência do desgaste frontal. O erro de circularidade apresenta variações mais significativas, porém insuficiente para ser utilizado para acompanhamento. Sendo assim podemos considerar apenas a rugosidade dentre as grandezas indiretas, como parâmetro indicativo do final da vida da ferramenta.

Pôde-se observar durante os ensaios que no final da vida da ferramenta a usinagem apresentou o fenômeno conhecido como quebra de borda, o fenômeno acontece a partir do valor de desgaste frontal  $VB = 0,20$ ; sendo inclusive o motivo da troca da pastilha nas operações de usinagem de ferro fundido no dia-a-dia das indústrias. Na figura 6.3 vemos esse fenômeno de maneira exagerada já que este ensaio foi realizado com uma pastilha com desgaste frontal de valor  $0,30\text{mm}$ .

Esse fenômeno ocorre porque devido ao desgaste da pastilha o esforço de corte é muito

grande, a ferramenta deixa de cortar o material e passa a arrancá-lo, sendo assim no final do furo há uma área muito pequena de material a ser usinada, e a mesma não oferece resistência à broca que arranca o material ao invés de cortá-lo.



Figura 6.3 – Foto do corpo de prova com quebra de borda

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 – Conclusões

Em função dos resultados obtidos nos ensaios, pode-se concluir que:

- ⇒ O monitoramento da potência, como parâmetro indicativo do avanço do desgaste não é adequado neste caso, devido à variação muito exígua entre a pastilha nova e a com o máximo desgaste frontal estudado.
- ⇒ O monitoramento do momento torsor e da força de avanço indicaram que estas grandezas são relevantes para o diagnóstico do fim de vida da ferramenta, pois suas curvas de variações em função do desgaste frontal são bastante acentuadas.
- ⇒ Os comportamento das grandezas indiretas monitoradas (rugosidade, dimensão efetiva e circularidade), em função do avanço do desgaste frontal da pastilha, mostraram-se compatíveis com as premissas.
- ⇒ O valor médio de rugosidade ( $R_a$ ) obtido nos ensaios foi da ordem de 2,49; que viabiliza a utilização do processo de furação, com essa ferramenta, sem a utilização de fluido de corte em muitas aplicações.
- ⇒ Entre as grandezas indiretas monitoradas, a rugosidade é o parâmetro indicativo mais confiável do fim de vida da ferramenta, devido à variação muito exígua entre a pastilha nova e a com o máximo desgaste frontal estudado das outras grandezas.
- ⇒ O valor de desgaste frontal utilizado na indústria para aplicações semelhantes à essa ( $VB = 0,20\text{mm}$ ), se deve ao fato de que a partir deste valor o ferro fundido cinzento apresenta o fenômeno da quebra de borda na extremidade do furo, pois a pastilha ainda reúne condições para usinar por mais tempo.

### **7.1 – Sugestões para Trabalhos futuros**

- ⇒ Realização de ensaios de furação com Broca Chamdrill utilizando-se fluido de corte para verificar o comportamento da ferramenta.
- ⇒ Comparação da variação dos esforços de corte da Broca Chamdrill com uma broca de metal duro, para verificação da influência da flexão do corpo da broca nos resultados obtidos.
- ⇒ Estudar o fenômeno da quebra de borda, suas causas, efeitos e maneiras de minimizar o mesmo.

## Referências

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS – *Metals Handbook*, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO, ABIFA – *Boletim de junho*, 2006

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6176*: Brocas helicoidais. Terminologia. Rio de Janeiro, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6173*: Terminologia de Tolerâncias e Ajustes. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6158*: Sistema de Tolerâncias e Ajustes, Rio de Janeiro, 1995.

BALZERS – *Guia de Revestimentos de Ferramentas*, 2006. 12 p.

BUTTON, S. T. – *Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UNICAMP, 2005. 79 p.

CAPUANO, M. N. – *Avaliação e Monitoração do Desgaste de Ferramentas no Processo de Furação*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2004, 148p. Tese de Doutorado.

CHIAVERINI, V. – *Aços e Ferros Fundidos*. Associação Brasileira de Metais, 4-ed., 1979. 504 p.

CSELE, T.; BARIMANI, A. – Today's Applications and Future Developments of Coatings for Drills and Rotating Cutting Tools. *Surface and Coating Technologies*, 1995. 76-77 p., 712-718 p.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 1836: Anwendungsgebiete der Werkzeugentypen N*, und W. Berlin, 1977.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 1412: Spiralboher Begriffe*. Berlin, 1977.

DEUTCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 1414: Spiralboher aus Schenellarbeitsstahl*. Berlin, 1977.

DICK, R. M.; FOLTS, G. J. – Os fluidos utilizados na transformação de metal têm de ser bem gerenciados. *Máquinas e Metais*, São Paulo, n. 380, setembro 1997. p. 34-50.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. – *Tecnologia da Usinagem do Materiais*. ArtLiber Editora, 2-ed., 2000. p. 165-179, p. 242.

EL BARADIE, M. A. – Cutting Fluids: Part I. Characterisation. *Journal of Materials Processing Technology*. Dublin, n. 56, 1996. p. 786-797.

EL BARADIE, M. A. – Cutting Fluids: Part II. Recycling and Clean Machining. *Journal of Materials Processing Technology*. Dublin, n. 56, 1996. p. 798-806.

ERTUNC, H. M.; LOPARO, K. A.; OCAK, H. – Tool Wear Condition Monitoring in Drilling Operations using Markov Models (HMMs). *Machines Tools & Manufacture*, 2000.

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo, 10<sup>a</sup> reimpressão, 2000. Ed. Edgard Blucher Ltda. 751 p.

GANIER, M. – Reciclar, eliminar e Valorizar Fluidos e Resíduos de Corte, *Máquinas e Metais*, n. 314, março 1992. p. 28-32.

GEY, C. – Novos revestimentos dão origem a ferramentas mais eficientes, *Máquinas e Metais*. São Paulo, n. 485, 2006. p. 52-67.

GIL, A. C. – *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo, 4<sup>a</sup> edição, 2002. Ed. Atlas S.A. 175 p.

GOODRICH, G. M. - Uncovering the path to cast iron machinability solutions. *Modern Casting*, jun. 2003.

KLOCKE, F.; KRIEG, T.; GERSCHWILER, K.; FRITSCH, R.; ZINKANN, V.; POLHS, M.; EISENBLATTER, G. Improved Cutting Processes with Adapted Coating Systems. *Laboratory for Machine Tools and Production Engineering*. Aachen, 1998. 4 p.

KÖNIG, W.; RUMMENHÖLLER, S. – As Indústrias estão tendo que Orientar Ecologicamente seus Processos Produtivos. *Máquinas e Metais*, São Paulo, n. 387, abril 1998. p. 22-29.

LAHRES, M.; MULLER-HUMMEL, P.; DOERFEL, O. – Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys. *Surface and Coatings Technology*, v. 91, 1997. p. 116-121.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. – Vantagens e Desvantagens do Uso (ou não) de Fluidos de Corte, *Máquinas e Metais*. São Paulo, dezembro 2000. p. 134-151.

MIRANDA, G. W. A. – *Uma Contribuição ao processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro revestida com TiAlN*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, 160p. Tese de Doutorado.

NOORI-KHAJAVI, A; KOMANDURI, R. – Frequency and Time Domains Analyses of Sensor Signals in Drilling-I. Correlation with Drill Wear. *Machines Tools & Manufacture*. Vol. 35, n.6, 1995. p. 775-793.

NOVASKI, O. *Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica*. Editora Edgard Blucher, Cap.III, 1994. p. 69-85.

NOVASKI, O. *Contribuições ao Processo de Furação com Brocas Helicoidais*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 131p. Tese de Livre Docência.

POPKE, H.; EMMER, T. H.; STEFFENHAGEN, J. – Environmentally Clean Metal Cutting Process – Machining on the Way to Dry Cutting. *Pros Instn Mech Engrs. Magdeburg*, v. 213, part B, Janeiro 1999. p. 329-332.

SANTOS, S. C. – *Furação de Ferro Fundido Cinzento com Brocas de Metal Duro Integral*. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Uberlândia, 1999, 105p. Dissertação de Mestrado

SCHROETER, R. B. A.; CASTRO, P. R.; TEIXEIRA, C. R. – Influência da Minimização do Fluido de Corte na Furação com Broca Helicoidal de Metal Duro. *In CONEM*, Rio Grande do Norte, Anais. UFRN, 2000. 1 CD-ROM.

SCHULZ, H.; EMRICH, K.; FINZER, T.; DÖRR, J. Quais são e para que servem os Revestimentos. *Máquinas e Metais*. São Paulo, setembro 2000. p. 30-37.

SMITH P. – Coolants and Cancer: Fact or Fiction?. *American Machinist*, dezembro 1996. p. 46-50.

YANG, J. A.; JAGANATHAN, V.; DU, R. – A new Dynamic Model for Drilling and Reaming Processes, *Machine Tools & Manufacture*, May 2002.

**ANEXO A – Ilustrações dos ensaios realizados**

Foto da célula de carga montada na máquina



Foto da preparação da máquina antes do ensaio



Foto da máquina após o ensaio

**ANEXO B – Exemplo de Relatório gerado durante Ensaios**

VB=10 (1)

To+ s	Torque kgfm	Fa kgf	Tensão V	Corrente A
0.00	0.07	0.00	222.00	11.00
0.20	1.30	50.00	222.00	13.00
0.40	1.26	160.00	222.00	13.00
0.60	1.38	160.00	223.00	13.50
0.80	1.28	300.00	223.00	12.90
1.00	1.38	310.00	223.00	12.90
1.20	1.38	290.00	224.00	12.80
1.40	1.42	300.00	224.00	13.10
1.60	1.37	310.00	224.00	13.10
1.80	1.42	320.00	222.00	12.40
2.00	1.46	310.00	222.00	12.40
2.20	1.33	300.00	222.00	12.10
2.40	1.22	300.00	222.00	12.00
2.60	1.36	280.00	222.00	12.00
2.80	1.30	300.00	223.00	11.80
3.00	1.32	290.00	223.00	11.90
3.20	1.28	130.00	223.00	11.40
3.40	0.12	10.00	223.00	9.80

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)