

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO

LEONARDO CARDOSO PERES  
PABLO IGLEZER PENHA MERLO

**USINAGEM DE FERRO FUNDIDO BRANCO, COM  
ALTOS TEORES DE CROMO E MOLIBIDÊNIO**

VITÓRIA  
2007

LEONARDO CARDOSO PERES  
PABLO IGLEZER PENHA MERLO

**USINAGEM DE FERRO FUNDIDO BRANCO, COM ALTOS  
TEORES DE CROMO E MOLIBIDÊNIO**

Projeto de Graduação apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau em Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Yordan Madureira de Almeida

Co-Orientador: Professor Flávio José da Silva

VITÓRIA

2007

LEONARDO CARDOSO PERES  
PABLO IGLEZER PENHA MERLO

## **USINAGEM DE FERRO FUNDIDO BRANCO, COM ALTOS TEORES DE CROMO E MOLIBIDÊNIO**

Projeto de Graduação apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau em Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em \_10 \_de dezembro de 2007.

### **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Professor Yordan Madureira de Almeida  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Professor Flavio Jose da Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Professor Oswaldo Cominelli  
Universidade Federal do Espírito Santo

## **AGRADECIMENTOS**

Aos familiares e amigos, pelo apoio incondicional por toda essa caminhada.

Ao nosso orientador, o professor Yordan Madureira de Almeida pela oportunidade, por suas discussões e pelo incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

A empresa Sandvik por ter fornecido materiais didáticos, lupa e pastilhas.

Ao professor Flávio Jose da Silva, pela colaboração e apoio durante todo o trabalho.

A empresa Usicorte, em especial, a pessoa do senhor Elisaldo, pelo serviço prestado e pelas dicas durante toda a operação de eletroerosão.

Ao técnico Fábio, pela experiência transmitida durante as operações de torneamento.

Ao departamento de engenharia mecânica da UFES, em especial aos colaboradores Celina, Yuri e Maria José pela dedicação em todos os momentos.

Aos colegas do curso de engenharia mecânica da UFES.

## RESUMO

A usinagem de ferro fundido branco com altos teores de Cromo e Molibdênio é um assunto da área de fabricação que até hoje em dia é pouco explorado, devido principalmente as dificuldades em se usinar tal material. Com o objetivo de se aprofundar no referido tema e ao mesmo tempo gerar bibliografia para que novos trabalhos possam ser desenvolvidos e aperfeiçoados, foi elaborado este projeto de graduação. A partir do uso de processos convencionais e não convencionais de usinagem foram gerados corpos de prova que após serem erodidos através do processo de eletroerosão e em seguida usinados no torno universal, foi possível através de testes, determinar qual a melhor gama de pastilhas que podem ser usadas para a usinagem do referido material em tornos universais pelas indústrias do ramo de fabricação.

Os materiais usinados foram blocos de ferro fundido branco com diferentes teores de Cromo e Molibdênio. No processo de eletroerosão foram usinados cilindros, que posteriormente foram torneados no torno universal onde eram usinados em forma de cone. O processo de usinagem no torno universal, é que foi que direcionado nosso enfoque. Através da medição dos dados de corte e dos desgastes das pastilhas usadas no processo, chegou-se à conclusão de qual pastilha é melhor para cada tipo de ferro fundido branco. Assim como a maioria dos resultados de teste de usinabilidade publicada na literatura, os dados do trabalho em questão foram também obtidos através de teste de torneamento. Apesar disso, não é aconselhável fazer extrapolações para processos, mesmo que algumas características possam vir a ser comuns a mais de um processo [1].

## ABSTRACT

The machining of cast iron white that have high content of chromium and molybdenum a branch from the area as of fabrication than it is to by today well into day is little explored, due chiefly that difficulties well into in case that machine such hardware. With the idea as of in case that deepen at the refered motif and at the same moment bring forth bibliography for it to new works may be full-blown and enhanced; he went elaborate this gradation project. From the I use as of processes conventional and not conventional as of machining have been generated bodies as of he samples than it is to after he shall be wrought via the the process as of EDM (*Electric Discharge Machining*) and on he follows machined at the lathe across the board, he went feasible right through tests , access what finest range as of pastiches that can be used for the machining from the refered hardware well into lathes across the board for industries from the branch as of fabrication.

The equipments machined have been blocks as of cast iron white where you varies the contents as of chromium and Molybdenum. In the process as of EDM they were generated cylinders, than it is to afterwards they were taken to the lathe across the board where they were machined well into form of cone. In the process as of machining at the lathe across the board, he went than it is to direct our he hangs. Via the measurement as of data as of hack and of the wear and tear of the pastiches used in the process, he went feasible in case that arrives at the closure as of what pastiche it is best for each guy as of cast iron white. As well as most from the results as of test as of machinability published at the literature, the data of the work in question have been as well obtained right through test as of process conventional machining. Yet, it is not advisable do extrapolations about to processes, even if a few characteristics may be come into being common to over um the process [1].

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre a razão Cr/C, o teor de molibdênio e a microestrutura, para o estado bruto de fusão-moldagem em areia em corpos de provas cilíndricos de 25 mm de diâmetro [2].	17
Figura 2.2 - Diagrama de dureza e tenacidade dos materiais de ferramentas de corte [2].	18
Figura 2.3 - Componentes básicos de uma típica máquina de eletroerosão [8].	24
Figura 3.1 – Suporte utilizado para as pastilhas.	26
Figura 3.2 – Bedame no suporte RF151. 23 – 2020-30.	27
Figura 3.3 – Pastilha TNMG 160408-23 1105 – classe: metal duro S.	28
Figura 3.4 – Pastilha TNGA 160404 650 – classe cerâmica.	29
Figura 3.5 – Pastilha TNGA 160408 7025 – classe: CBN.	30
Figura 3.6 – Pastilha 1025 no suporte RF 151.23 – 2020 – 30.	30
Figura 3.7 – Torno universal usado durante os ensaios.	31
Figura 3.8 – Microscópio óptico usado.	32

Figura 3.9 – Representação esquemática da medição feita com a lupa.	32
Figura 3.10 - Disposição dos furos nos blocos de FFBAC e projeto da ferramenta de cobre eletrolítico vazada.	33
Figura 3.11 – Equipamento de eletroerosão utilizado.	33
Figura 3.12 – Processo de eletroerosão	34
Figura 3.13 – Corpos de prova obtidos após a eletroerosão.	34
Figura 3.14 – Operação de corte dos cilindros.	35
Figura 3.15 - Croqui do corpo de prova.	35
Figura 3.16 – Fluido de corte.	36
Figura 3.17 – As três direções possíveis de aplicação do fluido de corte [1].	37
Figura 3.18 – Sequência de operações até se chegar à forma final.	38
Figura 4.1 - Desgaste de cratera em pastilha de CBN.	39
Figura 4.2 – Desgaste de Flanco verificado na pastilha de CBN.	40
Figura 4.3 – Gráfico dos valores de $V_c$ e $V_f$ para as ligas (16 – 9) e (28 – 9) usinadas com pastilha de CBN.	41
Figura 4.4 – Desgaste de cratera em pastilha de cerâmica.	44
Figura 4.5 - Desgaste de flanco em pastilha de cerâmica	44



Figura 4.6 – Gráfico das velocidades de corte obtidas com a pastilha de cerâmica.	49
Figura 4.7 – Desgaste de cratera em pastilha de metal duro.	51
Figura 4.8 – Desgaste de flanco e aresta postiça em pastilha de metal duro.	52
Figura 4.9 – Gráfico das velocidades de corte no ensaio com metal duro.	52
Figura 4.10 – Vista superior do bedame utilizado.	53
Figura 4.11 – Vista lateral do bedame utilizado.	53
Figura 4.12 – Gráfico das velocidades para uma aresta na liga 16-9.	54
Figura 4.13 – Gráfico dos desgastes da pastilha na aresta1 na liga 16-9.	55
Figura 4.14 - Gráfico do desgaste da pastilha na aresta 1 na liga 28-9.	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características das 12 ligas usadas nos ensaios.	15
Tabela 2.2 Principais propriedades das ferramentas de corte produzidas com os materiais citados acima [1].	22
Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos na usinagem das ligas com pastilha de cerâmica.	49
Tabela 4.2 – Desgaste da aresta 1 usada na liga 16-9 com as respectivas pastilhas.	54
Tabela 4.3 – Desgaste da aresta 1 usada na liga 28-9 com as respectivas pastilhas.	55
Tabela 5.1 – Comparação dos principais parâmetros na escolha de pastilhas.	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

FFBAC	Ferro Fundido Branco Alto Cromo
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
DAP	Dispositivo de Alta Pressão
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
TRM	Taxa de Remoção de Material
As	Acabamento Superficial
Rd	Relação de Desgaste
PVD	<i>Physical Vapor deposition</i>
HRSA	Super Ligas Resistentes ao Calor
ISSO	<i>International Standards Organization</i>
EDM	<i>Electric Discharge Machining</i>
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
WC	Carbeto de tungstênio
LabTecMec	Laboratório de Tecnologia Mecânica

## SUMÁRIO

<b>1 – Introdução</b>	<b>13</b>
<b>2 – Revisão Bibliográfica</b>	<b>14</b>
<b>2.1 - Ferro Fundido Branco Alto Cromo Molibdênio</b>	<b>14</b>
2.1.1 Efeito do Cromo na microestrutura	16
2.1.2 Efeito do Molibdênio na microestrutura	16
<b>2.2 - Usinagem</b>	<b>17</b>
<b>2.3 - Materiais para ferramentas de usinagem</b>	<b>17</b>
2.3.1 Metal Duro	18
2.3.2 Cerâmicas	19
2.3.3 CBN	20
2.3.4 Comparativo	21
<b>2.4 - Usinagem não convencional</b>	<b>21</b>
<b>2.5 – Eletroerosão</b>	<b>23</b>
<b>2.6 – Usinabilidade</b>	<b>24</b>
<b>3 – Metodologia</b>	<b>26</b>
<b>3.1 - Materiais ensaiados / corpo de prova</b>	<b>26</b>
3.1.1. - Ferramentas utilizadas	26
3.1.2. - Ferro Fundido Branco	31
<b>3.2 Máquinas</b>	<b>31</b>
3.2.1 - Torno	31
3.2.2. - Microscópio Óptico;	31
3.2.3. - Lupa.	32
<b>3.3 Testes de usinagem</b>	<b>32</b>
<b>4 – Resultados e discussão</b>	<b>39</b>
<b>4.1 – Pastilhas CBN</b>	<b>39</b>
<b>4.2 – Cerâmica</b>	<b>42</b>
<b>4.3 – Metal duro 1105 Classe S</b>	<b>49</b>
<b>4.4 – Bedame</b>	<b>53</b>

<b>4.5 – Discussão dos Resultados</b>	<b>54</b>
<b>5 – Conclusões</b>	<b>57</b>
<b>6 – Referências</b>	<b>59</b>

# **CAPÍTULO I**

## **1 – Introdução**

A usinagem de ferro fundido branco com altos teores de Cromo e Molibdênio é um assunto da área de fabricação que até hoje em dia é pouco explorado, devido principalmente às dificuldades em se usinar tal material.

Os ferros fundidos brancos alto cromo (FFBAC), são ligas que contém ferro, carbono e cromo, e que apresentam reação eutética durante a solidificação [2]. FFBAC são utilizados em aplicações industriais onde se requer elevada resistência ao desgaste abrasivo. Assim, estas ligas são empregadas nas indústrias de mineração (bombas, britadores, moinho de bolas, etc.), equipamentos para movimentação de terra (agricultura) e plantas siderúrgicas, ou em outras indústrias como a de cimento, cerâmica e papel.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados a esse trabalho. Foram abordados temas relativos aos ferros fundidos branco alto cromo molibdênio.

No capítulo 3, Materiais e métodos apresentam-se as ferramentas utilizadas no processo de torneamento e as ligas testadas. Além disso, os equipamentos usados no trabalho, também foram relacionados.

No capítulo 4, Resultados e discussão, são discutidos e apresentados todos os resultados dos testes. Ao final do capítulo, há um comparativo do comportamentos das ferramentas utilizadas.

No capítulo 5, têm-se as principais conclusões deste resultado.

Por fim, no capítulo 6, são apresentados as referências citadas e consultadas durante o desenvolvimento do trabalho.

## **CAPÍTULO II**

### **2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo são ilustrado os assuntos relacionados a esse trabalho, foram abordados temas relativos aos ferros fundidos branco alto cromo molibdênio, assim como o efeito do cromo e do molibdênio em sua microestrutura.

#### **2.1 – Ferro Fundido Branco Alto Cromo e Molibdênio**

Hoje em dia estão sendo adicionados cada vez mais elementos de liga de melhores propriedades ao ferro fundido, para aumentar ainda mais resistência ao desgaste abrasivo, conforme já foi citado em [2] e [3], como o molibdênio, o cromo, o tungstênio, e o vanádio, dos quais o molibdênio foi o que mais influenciou no aumento da dureza, e juntamente com o cromo serão comentados em 2.1.1 e 2.1.2.

Os ferros fundidos branco alto cromo (FFBAC), são ligas que contém ferro, carbono e cromo, e que apresentam reação eutética durante a solidificação [2].

FFBAC são utilizados em aplicações industriais onde se requer elevada resistência ao desgaste abrasivo, isto é melhora qualidade da peça, porém torna a usinagem mais difícil. Assim, estas ligas são empregadas nas indústrias de mineração (bombas, britadores, moinho de bolas, etc.), equipamentos para movimentação de terra (agricultura) e plantas siderúrgicas, ou em outras indústrias como a de cimento, cerâmica, papel. Desde sua introdução perto do início do século XX, uma gradual compreensão da relação entre composição química, processamento e as propriedades destas ligas tem conduzido a uma evolução de várias gerações de FFBAC [3].

Com relação às dificuldades em se usinar materiais FFBAC, pode-se citar: [3]

- Pressões muito elevadas, em seções pequenas, junto à aresta de corte;
- Desgaste rápido das ferramentas de corte;
- Elevadas forças de corte;
- Altas temperaturas geradas entre o material e a ferramenta e
- Elevados esforços mecânicos.

As altas temperaturas e os elevados esforços mecânicos geradas durante o corte, são fatores decisivos para a escolha da pastilha que será usada no processo de torneamento.

É difícil traduzir a influência das propriedades dos diferentes materiais e da maior ou menor adequação destes ao corte através de indicadores de usinabilidade.

Além disso, para se obter bons parâmetros de corte deve-se levar em conta além da dureza da peça, outras características, tais como: microestrutura, tipo de operação, máquina ferramenta utilizada, entre outros.

As características das 12 ligas de ferro fundido branco utilizadas neste trabalho são explicitadas na tabela 2.1

Tabela 2.1 – Características das 12 ligas usadas nos ensaios. [3]

Liga	% em Peso		% em Volume			Dureza em HV10
	Cr	Mo	(Fe, Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Matriz	Eutético (Fe, Cr) <sub>6</sub> C + Matriz	
16 – 0	16	0	9,9	90,1	0	395
16 – 3	16	3	13,3	85,7	1,0	469
16 – 9	16	9	*	*	*	732
20 – 3	20	3	19,4	77,8	3,4	532
24 – 0	24	0	26,2	73,8	0	531
24 – 9	24	9	15,9	38,3	45,8	511
28 – 0	28	0	33,3	66,7	0	389
28 – 3	28	3	34,4	*	*	411
28 – 9	28	9	22,1	33,1	44,8	568
32 – 0	32	0	38,4	61,6	0	396
32 – 6	32	6	35,8	40,6	23,6	523
32 – 9	32	9	32,1	27,7	40,2	595

\* - Liga segregada ou microestrutura lamelar muito fina.



### 2.1.1 Efeito do cromo na microestrutura

O conhecimento do sistema ternário Fe-Cr-C engloba uma série de estudos desenvolvidos há bastante tempo. Estas começaram a serem estudadas desde o século XIX . Sabe-se que a alta resistência ao desgaste é devida, principalmente à presença de carbonetos primários e/ou eutéticos do tipo  $(Fe,Cr)_7C_3$ [3].

O cromo e o carbono combinados aumentam a temperabilidade na medida em que a relação Cr/C se eleva. O efeito do aumento desta relação se deve ao aumento da quantidade de cromo em solução e se faz sentir tanto nas transformações isotérmicas quanto no resfriamento contínuo [3]. É observado que a influência do Cr na dureza das ligas investigadas, pouco influencia as ligas hipereutéticas e eutéticas[2].

### 2.1.2 Efeito do molibdênio na microestrutura

A adição de Molibdênio na microestrutura dos FFBAC tem a finalidade de aumentar a temperabilidade através da inibição da precipitação de carbonetos secundários durante o resfriamento.[2].

O Mo é geralmente adicionado em quantidades entre 0,5 e 3,5 %, alguns acreditam que mais de 1,0% é requerido para ser efetivo, enquanto adições maiores que 3 e 4% melhoram pouco. Este metal de transição age suprimindo a formação de perlita, aumenta a temperabilidade por uma efetiva inibição de carbonetos secundários durante o resfriamento, estimula a formação de carbonetos ricos em Mo, dependendo da relação Cr/C e modifica a composição química do carboneto  $(Fe,Cr)_7C_3$ . [2] A figura 2.1 mostra a relação entre a razão Cr/C, o teor de Molibdênio e a microestrutura.

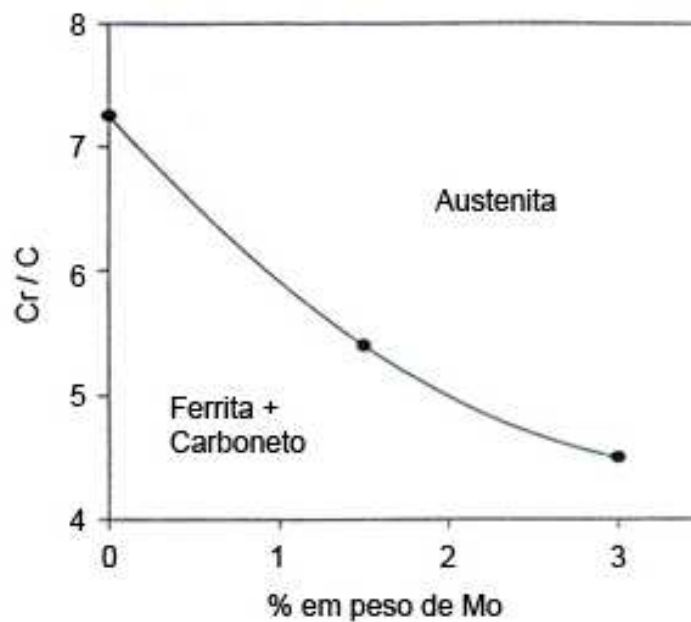


Figura 2.1 - Relação entre a razão Cr/C, o teor de molibdênio e a microestrutura, para o estado bruto de fusão-moldagem em areia em corpos de provas cilíndricos de 25 mm de diâmetro [2].

## 2.2 – Usinagem

O termo usinagem refere-se à operação de todo processo mecânico que ao conferir a peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens, através de um processo de remoção de cavaco com o uso de uma ferramenta de corte. Este processo não exclui um processo anterior, como por exemplo, conformação[1].

## 2.3 – Materiais para ferramenta de usinagem

Devido às dificuldades encontradas na usinagem de materiais de elevada dureza, o mercado vem desenvolvendo o uso de materiais avançados para ferramentas de corte. Entre os materiais utilizados, está o nitreto cúbico de boro (CBN), cerâmicas e metal duro.

As pastilha fabricadas com estes materiais, ou ligados a outros, devem oferecer várias características, entre elas:

- Resistência ao desgaste por abrasão;
- Elevada dureza a quente;
- Resistência a compressão;
- Resistência a flexão;
- Estabilidade química e
- Tenacidade da aresta de corte.

A figura 2.2 mostra um gráfico comparativo entre os materiais empregados nas ferramentas de corte e a variação de suas principais características.

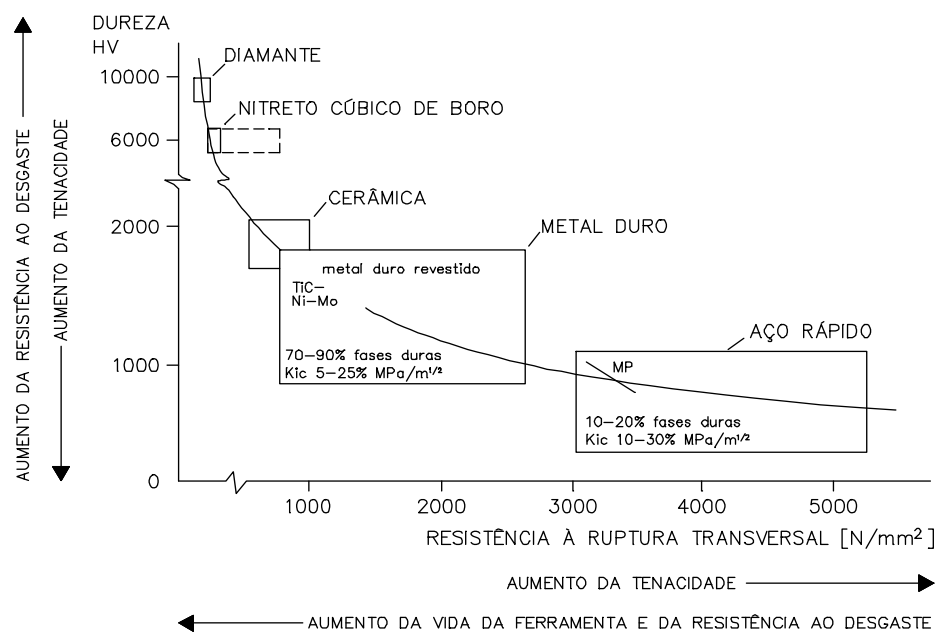


Figura 2.2 - Diagrama de dureza e tenacidade dos materiais de ferramentas de corte [1].

### 2.3.1 – Metal Duro

O advento desta classe aconteceu no final da década de 20, na Alemanha, quando se conseguiu produzir em laboratório o WC (Carbeto de Tungstênio) em pó pela primeira vez. A mistura deste pó com o cobalto, também em pó, trouxe ao mercado,

na década de 30, um dos mais fantásticos grupos de materiais de ferramentas de corte: o metal duro. Sendo assim, o metal duro é considerado como uma liga formada entre o carboneto de tungstênio e o Cobalto ( $WC + Co = \text{metal duro}$ ) [1].

Composição típica: 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13% de cobalto [1].

Principais características [1]:

- Dureza 76 a 78 Rockwell C (elevada dureza até cerca de  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- Altíssima resistência à compressão ( $3.500\text{ N/mm}^2$ );
- Densidade ( $14\text{ kgf/dm}^3$ );
- Módulo de elasticidade  $E = 620.000\text{ N/mm}^2$ ;
- Coeficiente de dilatação térmica (metade da do aço) e
- Elevada condutibilidade térmica (8 a 20 vezes a do aço).

### 2.3.2 – Cerâmicas

As cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não-metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos e nitretos. Existem em uma grande variedade de composição e forma. A maioria tem estrutura cristalina, mas em contraste com os metais as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes [1].

A ausência de elétrons livres faz com que as cerâmicas sejam pobres condutoras de eletricidade, e que, em seções finas, sejam transparentes. Devido às fortes ligações primárias, a maioria das cerâmicas tem alto ponto de fusão [1].

Principais características das cerâmicas [1]:

- Capacidade de suportar altas temperaturas (materiais refratários);
- Alta resistência ao desgaste;
- Altas durezas;
- São frágeis;
- Baixa condutividade térmica;
- Boa estabilidade química e térmica;
- Boa resistência à fluência e
- Alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

### 2.3.3. – CBN (Nitreto Cúbico de Boro)

Na atual classe dos materiais superduros em desenvolvimento, os compósitos a base de CBN tem merecido destaque, pois se destacam na usinagem de metais e ligas de dureza elevada, podendo substituir a retífica. A efetividade de utilização dos compósitos de CBN depende, em geral, do estudo da tenacidade do inserto [9]. Como são materiais com dureza superior a 3000 HV são denominados ultra duros, possuem estrutura cristalina altamente simétrica e com ligações fortes. A dureza seria função tanto da força das ligações atômicas quanto da rigidez de sua estrutura simétrica [1].

Os pesquisadores de vários países desenvolvem variadas tecnologias de obtenção do material compósito que inclui micropó de CBN e ligantes (diversos metais e ligas metais de transição). Todos esses compósitos são feitos em condições de altas pressões, de 5 a 7 GPa, e temperaturas, de 1000 a 1800°C, nos chamados dispositivos de alta pressão (DAP). Em condições não hidrostáticas, as tensões internas têm valores significantes, diminuindo a vida útil da ferramenta [9].

Os materiais compósitos obtidos por este método caracterizam-se pela dispersão de tenacidade da estrutura que é garantida pela ação dos seguintes fatores [9]:

- Presença de gradientes de pressão e temperatura na câmara de compressão do DAP;
- Diferença em coeficiente de expansão térmica do CBN e ligante;
- Formação de novas fases com mudança de volume, como resultado da interação de componentes entre si e com CBN e
- Redução rápida da pressão e temperatura.

Como a produção destes materiais compósitos realiza-se sob altas pressões, os fabricantes são dirigidos a economizar tempo do processo e diminuir o custo do DAP, e assim a redução lenta da pressão e temperatura não é implantada ainda. Essa mudança hipoteticamente levaria a alguma relaxação de tensões residuais no material, diminuindo assim o aparecimento de trincas que levam a diminuição da vida útil do compósito durante a usinagem [9].

### 2.3.4 – Comparativo:

A tabela 2.2 faz um comparativo das principais propriedades dos materiais usados na fabricação de ferramentas de corte [1].

Material	Metal duro	Cerâmica	CBN
Composição Básica	WC + Co	$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3$	CBN + $\text{AlB}_2$
Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	14,5	3,2	3,1
Dureza à temperatura ambiente (HV)	1600	1600	4000
Dureza à 1000° C (HV)	Aprox. 400	900	Aprox. 1800
Resistência à fratura ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )	13	6	10
Condutividade térmica ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ )	85	23	100
Módulo de Young ( $\text{KN} / \text{mm}^2$ )	580	300	680
Coeficiente de expansão térmica ( $\times 10^{-8} \text{ K}$ )	5,5	3,2	4,9

## 2.4 – Usinagem não convencional

A usinagem é a tecnologia que se ocupa do arrancamento controlado de material de um peça em bruto com o objetivo de produzir peças com formas e características superficiais predeterminadas. Desde há muito tempo, todos os processos de usinagem usavam o contato físico entre a ferramenta e a peça para o arrancamento de cavacos utilizando basicamente dois mecanismos: o do cisalhamento (casos do torneamento, fresamento, furação...) e a da abrasão (no caso da família dos processos abrasivos). Apesar de todo o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, esses processos têm sérias limitações principalmente em casos de utilização de materiais de difícil usinagem [8].

Por outro lado, a evolução humana obrigou a pesquisa a desenvolver novos materiais normalmente de difícil usinagem por esses processos tradicionais. Surgiram novos aços-liga, as superligas, as cerâmicas finas, os compósitos, entre outros, que passaram a exigir novos processos especiais de fabricação. Paralelamente, novas geometrias e formas crescentemente mais complexas e diminutas foram sendo exigidas pelo mercado. Com isso, mais um motivo passou a existir para que novos processos fossem desenvolvidos. Foi assim que surgiram então os chamados processos não convencionais [8].

O que difere fundamentalmente os processos não tradicionais dos ditos tradicionais, além da época em que apareceram (os processos não tradicionais de usinagem foram introduzidos na indústria após a 2ª Guerra Mundial enquanto que alguns tradicionais datam de antes da revolução industrial), são as formas de energia empregadas e os mecanismos de retirada de material da peça. Os processos diferem-se quanto à natureza da energia empregada, ao mecanismo de ação e, suas respectivas aplicações práticas [8].

Cada processo tem seu ramo específico e seu lugar na indústria, mas, entretanto os processos não tradicionais não devem competir, com os processos tradicionais e nem sempre um processo adequado a uma situação pode não ser igualmente eficiente sob outras condições de outros processos parecidos [8].

Para selecionar corretamente um processo, é preciso levar em conta o que a pesquisa e experiência prática têm para cada um deles em termos dos aspectos [8]:

- Materiais a serem usinados;
- Forma da peça (ou operações mais indicadas para o processo);
- Capacidade do Processo: Taxa de Remoção do Material (TRM), Tolerância Dimensional;
- Acabamento Superficial;
- Zona Afetada pelo Calor (ZAC) e
- Considerações Econômicas.

## 2.5 – Eletroerosão

Apesar de os princípios básicos da erosão de metais por descargas elétricas serem conhecidos desde o século XVIII, os potenciais tecnológicos da técnica somente foram implementados a partir da Segunda Guerra Mundial. Isto se deveu ao avanço tecnológico, que impôs a necessidade de se utilizar novos materiais, como as ligas metálicas de alta resistência, que são de difícil usinagem pelos processos convencionais. A utilização de ferramentas de diamante viabiliza tecnicamente os processos convencionais, mas com custos financeiros elevados [8].

Além disso, peças com geometrias mais complexas podem ter as suas fabricações inviabilizadas pelo uso de técnicas tradicionais. Neste contexto, a técnica de usinagem eletroerosão surge como uma alternativa viável, tanto técnica quanto tecnicamente, uma vez que é um processo relativamente barato. O que encarece consideravelmente e limita o emprego da técnica é a confecção de ferramentas de usinagem ou eletrodos [8].

A eletroerosão é um processo de conformação em que o eletrodo ou ferramenta de usinagem reproduz a sua imagem ou geometria na peça. Na obtenção desta imagem, remove-se o material por descargas elétricas. Em geral, a remoção é feita sob um líquido condutor de eletricidade, denominado dielétrico. A peça e a ferramenta são posicionadas, e entre ambos, situa-se a fenda de trabalho. Ao aplicar-se uma tensão elevada tem-se uma descarga de uma faísca [8].

Ocorre transmissão de calor que provoca a fusão e a evaporação de volumes de material. Assim a usinagem por eletroerosão se caracteriza por ser um processo térmico, essencialmente. A experiência tem mostrado que o processo de usinagem por descarga elétrica tem contribuído consideravelmente na obtenção de peças de elevada dureza com boa integridade superficial. Além disso, o uso da eletroerosão tem apresentado outras vantagens tais como: melhor acabamento superficial, aumento da taxa de remoção, além de promover maior estabilidade do processo de geração de descargas pela fonte de alimentação. Outro benefício adicional é que, por não haver contato entre a ferramenta (eletrodo) e a peça, não há geração de forças



de corte. Este é um recurso valioso para usinagem de peças extremamente frágeis sem nenhum risco de fratura [8]. A figura 2.3 traz alguns componentes básicos de uma típica máquina de eletroerosão, como exemplo, fonte de corrente contínua e servo mecanismo.

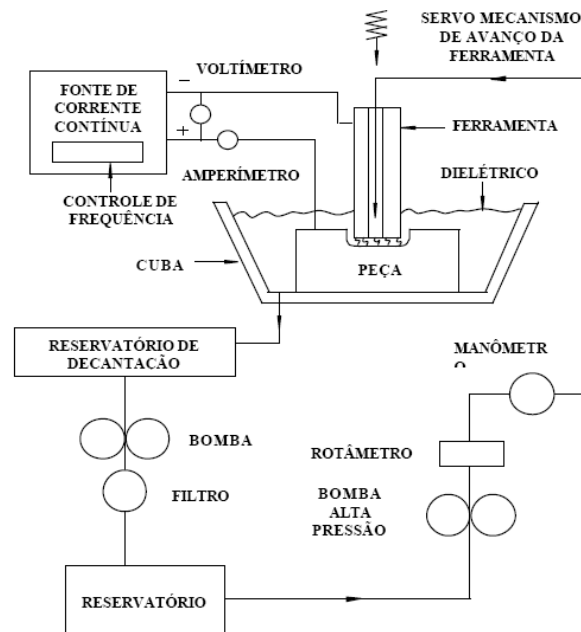


Figura 2.3 - Componentes básicos de uma típica máquina de eletroerosão [8].

## 2.6 - Usinabilidade

A usinabilidade pode ser considerada uma propriedade do material, mas esta propriedade depende de outros parâmetros. Ou seja, a usinabilidade do material é o modo de se comportar durante a usinagem. No geral é definida com uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usar um material [8].

Algumas propriedades físicas, além das forças de corte, energia requerida na operação de usinagem, vida da ferramenta, acabamento, taxa de desgaste, etc, são variáveis consideradas nos ensaios [8].

O processo de medição de usinabilidade é um pouco mais complexo, justamente pela quantidade de fatores que influenciam, sendo assim, usinabilidade é função de

teste e qualquer solução encontrada, deve acompanhar uma descrição completa do teste [8].

A grande contribuição dos ensaios é a possibilidade de geração de bancos de dados de usinagem. E para que os mesmos sejam confiáveis, devem-se utilizar critérios e procedimentos padronizados para que os dados gerados sejam transferíveis [8].

A usinagem de ferro fundido pode variar desde muito fácil de usinar, como no caso do ferro fundido cinzento ferrítico ( $HB \approx 120$ ) até muito difícil, como é o caso do ferro fundido branco ( $HB \approx 550$ ). A usinabilidade dos ferros fundidos vai depender da composição química e da microestrutura. Para a usinagem de ferros fundidos em geral, as ferramentas de metal duro ( $WC + Co$ ) da classe K, são as mais utilizadas. Neste caso, a vida geralmente é limitada pelo desgaste do flanco [8].

## CAPÍTULO III

### 3 – Metodologia

Neste capítulo são apresentados os materiais, as máquinas e métodos utilizados na parte prática.

#### 3.1 – Materiais ensaiados / corpo de prova

Durante os testes realizados no Labtecmecc, foram utilizados os tipos de materiais e maquinários, que serão mais bem detalhados nos itens abaixo.

##### 3.1.1 – Ferramentas utilizadas

Foram usados nos ensaios vários tipos de pastilhas, de dupla face, de diferentes materiais para observar os diversos comportamentos na usinagem de ferros fundidos brancos com altos teores de cromo e molibdênio.

A figura 3.1 traz uma foto do suporte utilizado para as pastilhas, que no caso, foi o modelo MTJNR 2020K 16M1 e a figura 3.2 trazem uma foto do bedame utilizado, já preso no suporte. Ambos são do fabricante Sandvik.



Figura 3.1 – Suporte utilizado para as pastilhas.

Para os bedames foram dois tipos de suportes o RF123 G20-2020B e o RF151.23 – 2020-30.



Figura 3.2 – Bedame no suporte RF151.23 – 2020-30.

A seguir, segue a descrição das pastilhas utilizadas nos ensaios. No entanto, para melhor entendimento, a chave de código para pastilhas conforme norma ISO 1832 – 1991 usada pelo fabricante é citada logo abaixo:

C	N	M	G	09	03	08	-	PF
1	2	3	4	5	6	7		8

1 – formato da Pastilha;

- 1.1- C = Rômbica 80 graus,
- 1.2 - R = Redonda,
- 1.3 - S = Quadrada,
- 1.4 - T = triangular e outros.

2 – Ângulo de folga da pastilha,

- 2.1 – B = 5°,
- 2.2 – C = 7°,
- 2.3 – N = 0° e outros.

3 – Tolerâncias,

4 – Tipo da pastilha,

5 – Tamanho da pastilha = comprimento da aresta de corte,

6 – Espessura da pastilha,

7 – Raio de ponta e

8 – Geometria, que é uma opção do fabricante.

8.1 - PF = acabamento ISO P

8.2 - MR = Desbaste ISO M

As pastilhas usadas nos ensaios foram:

### **1 – TNMG 160408-23 1105 (metal duro classe S)**

Dimensões: 16 mm de comprimento, 4 mm de espessura, 0,8 mm de raio.

O número 23 significa que possui quebra de cavaco e o 1105 é a classe de dureza conforme norma ISO [10].

Esta pastilha segundo o fabricante se caracteriza por: ter um revestimento PVD (*Physical Vapor deposition*) com uma camada de 4  $\mu\text{m}$  de TiAlN–TiN. Esse revestimento duro e resistente ao desgaste, aliado a um substrato duro e de grãos finos, garantem as propriedades necessárias para se ter arestas de corte afiadas e uma grande segurança contra martelamento de cavacos, juntamente com boa resistência a deformação plástica e alta resistência ao desgaste em altas velocidades, tornando a classe apropriada para superligas resistentes ao calor, à base de Co, Ni ou Fe. Uma classe de tolerâncias estreitas e excelente acabamento superficial em HRSA (superligas resistentes ao calor) e aço inoxidável [9]. A figura 3.3 traz um exemplo de pastilha de metal duro utilizada no torneamento.



Figura 3.3 – Pastilha TNMG 160408-23 1105 – classe: metal duro S.

## **2 – TNGA 160404 650 (cerâmica); cerâmica mista a base de $\text{Al}_2\text{O}_3$ .**

Dimensões: 16 mm de comprimento, 4 mm de espessura e 0,4 mm de raio. O número 650 indica a classe de dureza conforme norma ISO [10].

Segundo o fabricante é usada em: operações de semi-acabamento de ligas a alta temperatura em aplicações com pouca exigência de segurança de aresta, por exemplo, e em operações de torneamento longitudinal, faceamento, e perfilamento.

Usada na fabricação de peças de caixas de câmbio endurecidas e outras peças do sistema de transmissão. E oferece as vantagens de oferecer um excelente acabamento em materiais endurecidos o que traz economias em relação à retificação [10]. A figura 3.4 mostra a pastilha de cerâmica utilizada no projeto.



Figura 3.4 – Pastilha TNGA 160404 650 – classe cerâmica.

## **3 – TNGA 160408 7025 (CBN)**

Dimensões: 16 mm de comprimento, 4 mm de espessura, 0,8 mm de raio. O número 7025 é a classe de dureza conforme norma ISO [10].

De acordo com o fabricante esta pastilha é de uma classe CBN de baixo teor e excelente qualidade, com aglutinantes de titânio de grãos finos. A classe é apropriada para cortes contínuos, leves, interrompido e acabamentos em alta

velocidade de aços cementados, onde são necessárias superfícies de alta qualidade [10]. A pastilha de CBN utilizada no projeto é mostrada pela figura 3.5 a seguir.



Figura 3.5 – Pastilha TNGA 160408 7025 – classe: CBN.

**4 – Pastilha do Bedame** – foram utilizadas duas pastilhas: a 1005 no suporte RF123 G20 – 2020 B e a 1025 no suporte RF151.23 – 2020 – 30 . A figura 3.6 traz uma foto do bedame utilizado.

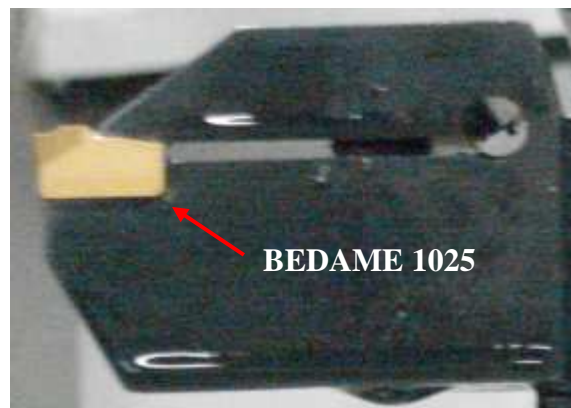


Figura 3.6 – Pastilha 1025 no suporte RF 151.23 – 2020 – 30 .

### 3.1.2 – Ferros fundidos brancos.

Conforme já descrito no capítulo 2, as características das 12 ligas de ferro fundido branco usadas nos teste de usinagem são os da tabela 2.1.



## 3.2 – Máquinas

As máquinas utilizadas nos ensaios das ligas de FFBAC, pertencem ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo e se encontram no LabTecMec e no laboratório de Materiais.

### 3.2.1 – Torno

As operações de torneamento foram realizadas no LabTecMec no torno universal mostrado na figura 3.7



Figura 3.7 – Torno universal usado durante os ensaios.

### 3.2.2. – Microscópio óptico

As pastilhas foram analisadas em microscópio óptico, figura 3.8, (marca: Olympus BX60M) no Laboratório de Metalografia / UFES.

Foram feitas micrografias das pastilhas utilizadas no processo de torneamento do corpo de prova, com uma câmara fotográfica acoplada ao próprio microscópio. O aumento utilizado foi de 50 x.





Figura 3.8 – Microscópio óptico usado.

### 3.2.3. – Lupa

Para fazer a medição do desgaste nas pastilhas usadas no processo de torneamento, foi utilizada a Lupa fornecida pelo fabricante das pastilhas. O método de visualização de desgaste da pastilha, é mais bem entendido através da figura 3.9.

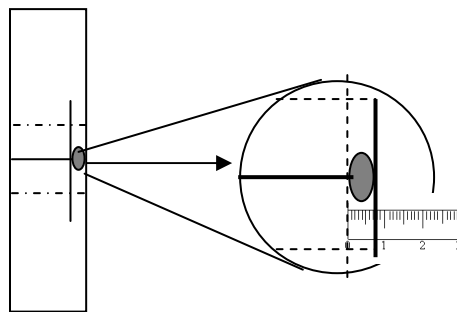


Figura 3.9 – Representação esquemática da medição feita com a lupa.

## 3.3 – Testes de usinagem

Neste tópico será descrito todo o estudo dos desgastes das pastilhas. Mas para que a questão fosse analisada, era necessário a obtenção dos corpos de prova. No início as ligas estavam na forma de blocos. Estes blocos, de variados teores de cromo e molibdênio, foram usinados na máquina de eletroerosão da empresa Usicorte, situada no município de Serra, Estado do Espírito Santo. As dimensões dos blocos

de FFBAC e do eletrodo de cobre eletrolítico usados no processo de eletroerosão, são mostradas na figura 3.10.

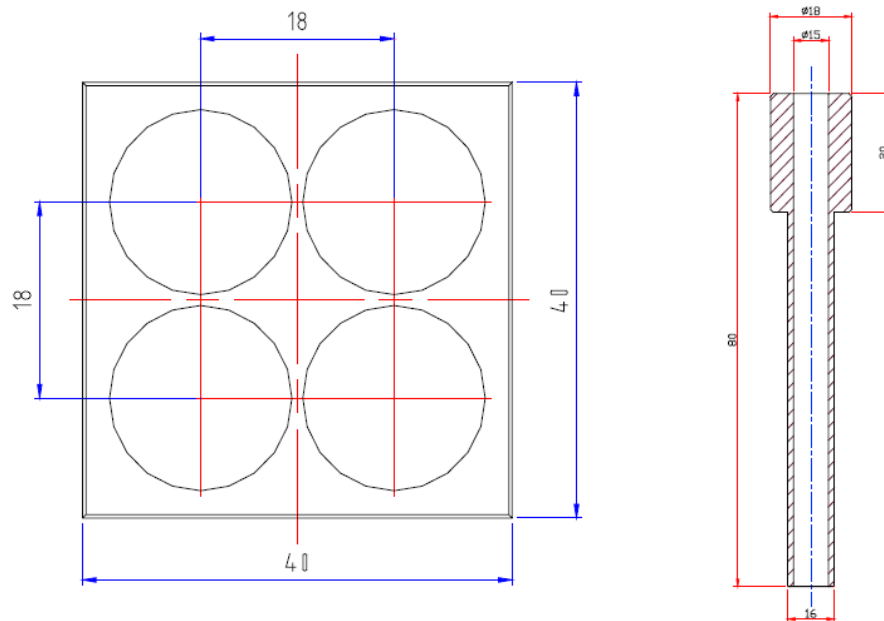


Figura 3.10 - Disposição dos furos nos blocos de FFBAC e projeto da ferramenta de cobre eletrolítico vazada [6].

O equipamento utilizado foi uma máquina de eletroerosão do fabricante IBH Indústria de Máquinas e Equipamentos Ltda conforme figura 3.11.

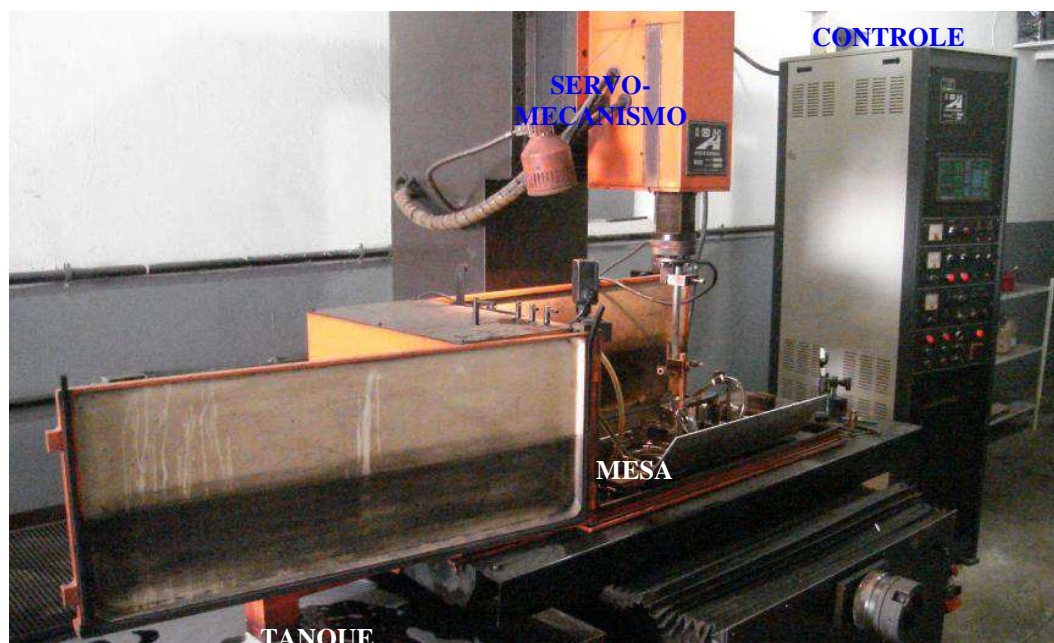


Figura 3.11 – Equipamento de eletroerosão utilizado.

O óleo utilizado no processo de eletroerosão, foi um óleo específico para eletroerosão, comumente encontrado no mercado. O eletrodo utilizado, foi um

eletrodo de cobre eletrolítico. Através da figura 3.12 é possível visualizar como ocorre o processo de eletroerosão na prática.

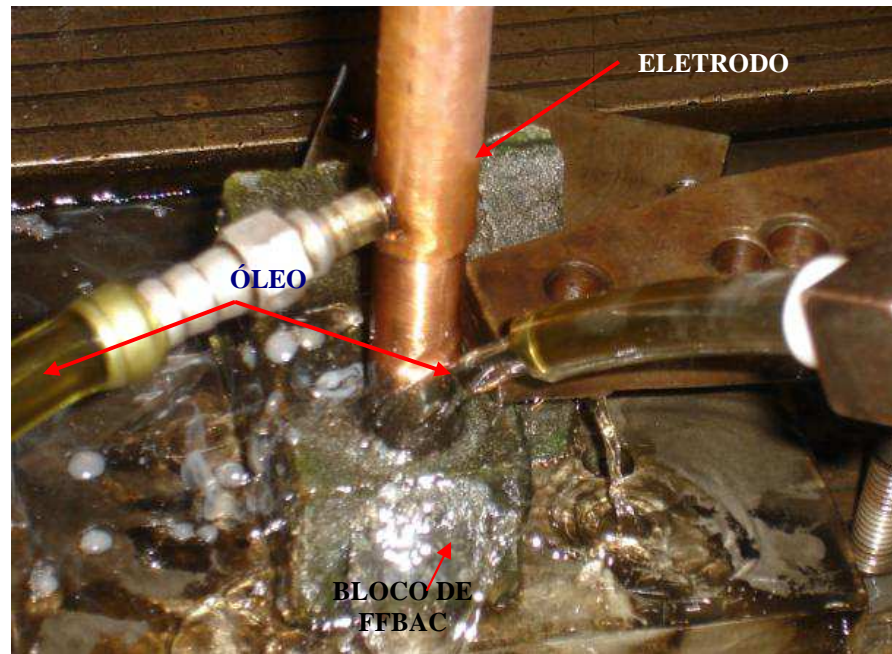


Figura 3.12 – Processo de eletroerosão

Após a eletroerosão os blocos, foram obtidos os seguintes corpos de prova, de acordo com as medidas da figura 3.10 e pela figura 3.13, é possível visualizar o cilindro após ser retirado do bloco.



Figura 3.13 – Corpos de prova obtidos após a eletroerosão.

Então, os cilindros obtidos das ligas através do processo de eletroerosão, foram encaminhadas ao LabTecMec, onde passaram pelo processo de torneamento. No

processo de torneamento o nosso foco foi direcionado, com o objetivo de estudar o comportamento dos diferentes tipos de pastilha, nas ligas de FFBAC com vários teores de cromo e molibdênio. De acordo com a figura 3.14, os cilindros que foram obtidos através de eletroerosão, com aproximadamente 7,5 mm de raio e 60 mm de altura, foram cortados, com pastilha de bedame em 3 cilindros de 7,5 mm de raio e 18 mm de altura.

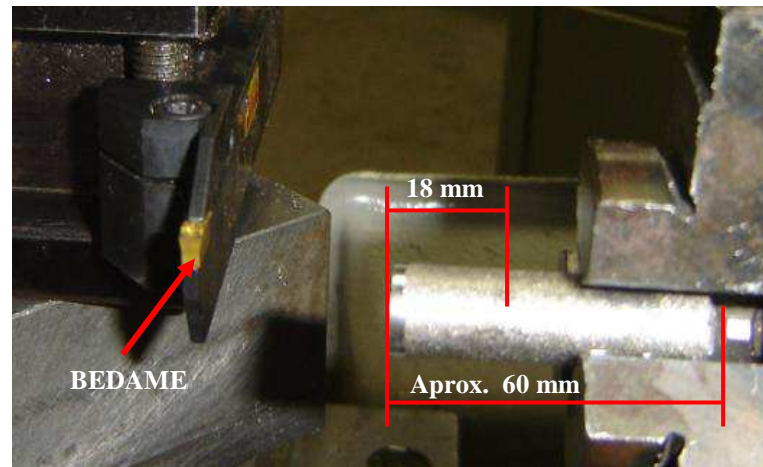


Figura 3.14 – Operação de corte dos cilindros.

Após o corte dos cilindros, nas dimensões desejadas, foram iniciadas as operações de faceamento, desbaste e torneamento cônico, com os mais diferentes tipos de pastilha, com o objetivo de se chegar a forma final, de acordo com as medidas do croqui, conforme figura 3.15.

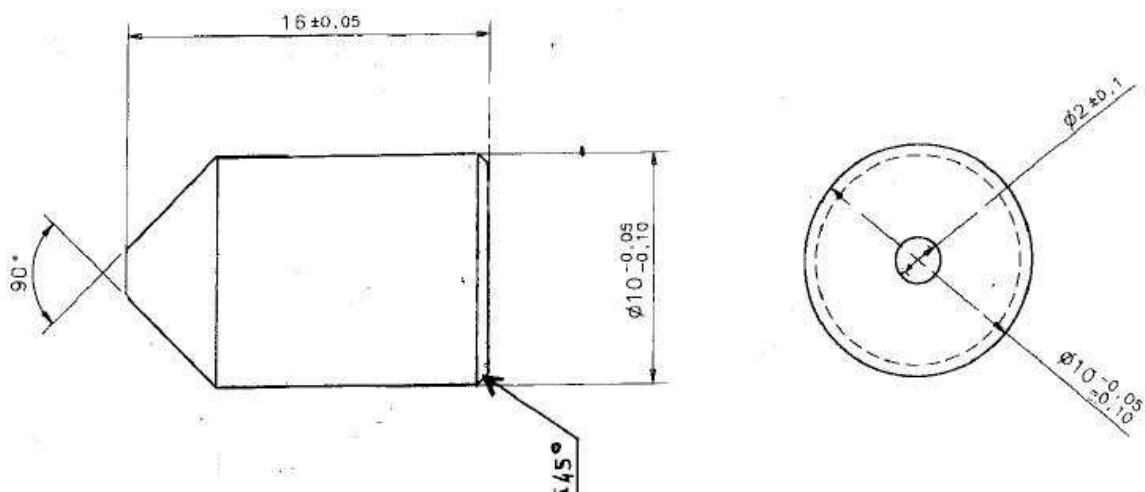


Figura 3.15 - Croqui do corpo de prova.

Importante frisar que o fluido de corte utilizado durante a operação de usinagem, além de lubrificar e refrigerar, também ajuda a retirar o cavaco da zona de corte e



além disso, protege a máquina ferramenta e a peça da corrosão atmosférica. De acordo com a velocidade de corte usada na operação, o fluido de corte exerce várias funções. Em altas velocidades deve-se priorizar a refrigeração, pois altas temperaturas de corte podem reduzir a vida útil da ferramenta, pois as condições não são favoráveis para a penetração do fluido de corte na interface para que ele exerça o papel lubrificante [1].

Sendo assim durante os testes realizados com os diversos corpos de prova no laboratório, foi usado um fluido de corte à base de água, pois estes diminuem a temperatura de corte, tanto dissipando calor, como reduzindo o calor gerado [1]. O fluido de corte utilizado, figura 3.16, era um composto monofásico dissolvido na proporção 1:20 em água, este é composto além de óleo vegetal, de aditivos antiferruginosos, aditivos EP (extrema pressão), antiespumantes, bactericidas e fungicidas.



Figura 3.16 – Fluido de corte

Durante a aplicação do fluido de corte, optou-se pela direção C, figura 3.17, pois na literatura [1] consideram essa direção como sendo a mais eficiente quando se usina níquel e ferro fundido.

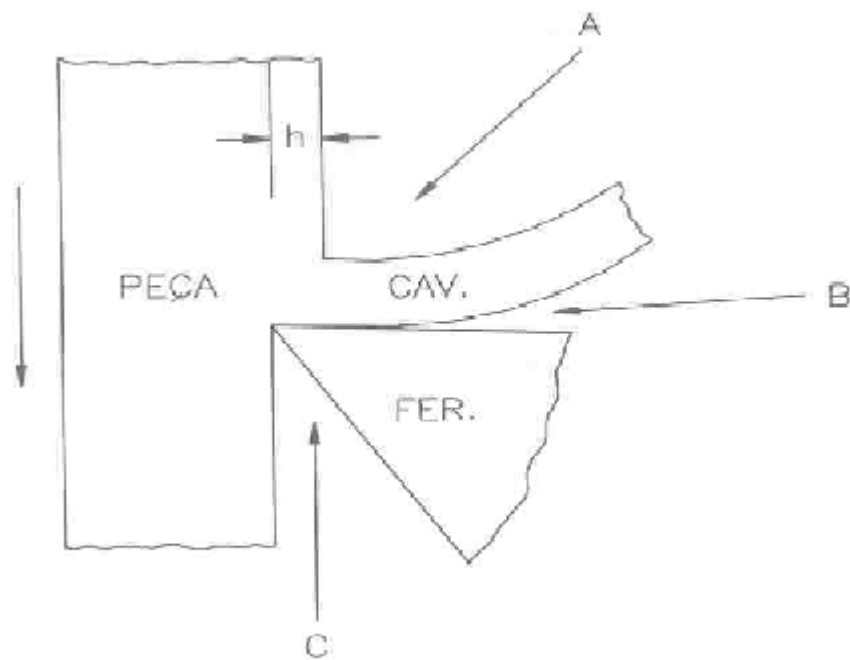


Figura 3.17 – As três direções possíveis de aplicação do fluido de corte [1].

A direção de aplicação do fluido de corte utilizada durante a operação de torneamento, foi a de jorro de fluido à baixa pressão, por ser o método mais utilizado devido a sua simplicidade [1].

Após escolher uma das ligas, fazia-se o primeiro faceamento e o chanfro do primeiro cilindro, em seguida, o mesmo procedimento para os demais.

Depois que terminasse o último cilindro, era escolhido aleatoriamente, um dos cilindros e realizava-se o segundo faceamento e o chanfro, repetindo para os outros. E por fim as peças eram concluídas com torneamento cônico definindo a peça conforme figura 3.18.



Figura 3.18 – Sequência de operações até se chegar a forma final.

## CAPÍTULO IV

### 4 – Resultados e discussão

Para os testes de torneamento optou-se por padronizar o avanço em 0,057 mm por rotação e a profundidade de corte em 0,3 mm.

#### 4.1 - Pastilha de CBN

Inicialmente foi usada a pastilha de CBN para usinar a **liga de FFBAC com 16% de cromo e 9% molibdênio**, com os seguintes parâmetros:

Velocidade de corte – (  $V_c$  )  $\approx$  62,8 m / min,

Velocidade de avanço – (  $V_f$  )  $\approx$  71,25 mm / min,

Rotação = 1250 rpm.

As figuras 4.1 e 4.2, são micrografias da pastilha de CBN utilizada para se usinar a liga 16-9 e é possível visualizar os principais desgaste sofrido pela pastilha.

Aresta 1 = primeiro faceamento e desbaste do primeiro cilindro.

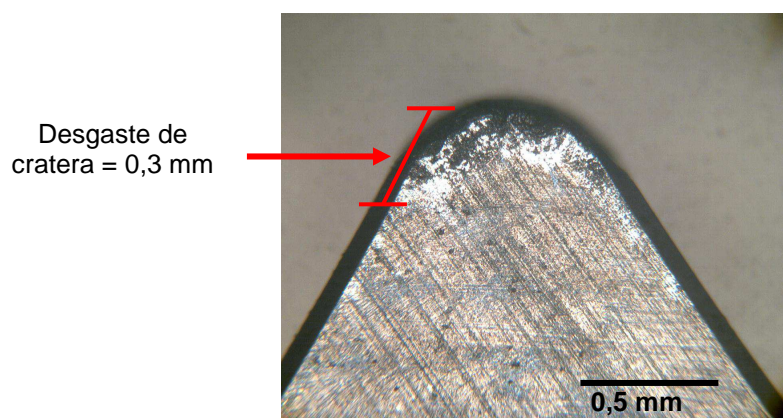


Figura 4.1 - Desgaste de cratera em pastilha de CBN.



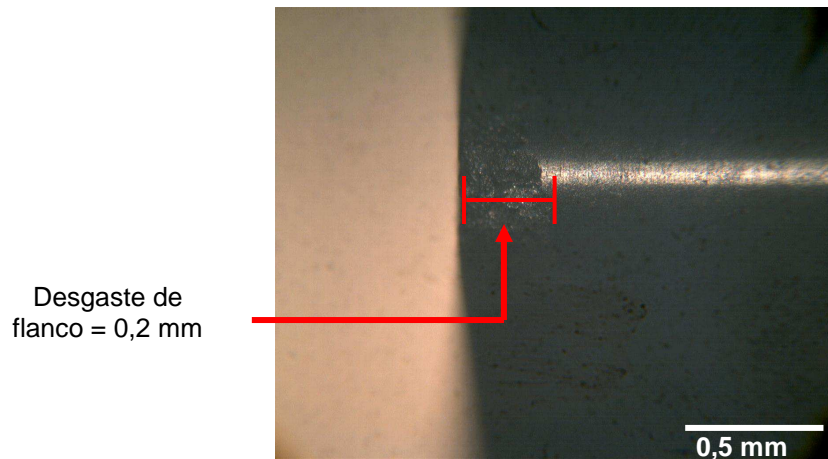


Figura 4.2 – Desgaste de Flanco verificado na pastilha de CBN.

Quando se iniciou o segundo cilindro, foi constatado que a aresta 1 já não apresentava o mesmo resultado, pois o acabamento estava ruim além de gerar ruído. Esses dois fatores nos levaram a concluir que a aresta 1 estava desgastada. Foi então, trocado o lado da pastilha para aresta 6.

Com a aresta 6 foi feito primeiro o faceamento e desbaste do segundo cilindro e o primeiro faceamento do terceiro cilindro, apresentando após, os seguintes valores de desgaste:

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm.

Espessura do cavaco = 0,05 mm.

Ao desbastar o terceiro cilindro, notou-se vibração. Após parar o torno, e avaliando a peça foi encontrado um defeito micro estrutural no material, como um vale. Assim foi abaixado a rotação para 1000 e depois 800 rpm, mesmo assim o excesso de vibração continuou, aparecendo mais crateras na aresta 6. Em seguida, foi trocado de aresta e foi feito as seguintes operações:

Aresta 4 = segundo faceamento e chanfro do primeiro cilindro,

Aresta 2 = segundo faceamento e chanfro do segundo cilindro.

Após as operações notou-se que as arestas 2 e 4 sofreram pouquíssimo desgaste, nem sendo possível medir seu desgaste, estas ainda estavam operacionais.

Após se usinar a **liga de FFBAC com 16% de cromo e 9% molibdênio**, optou-se em começar a usinar a liga de FFBAC com 28% de cromo e 9% de molibdênio. Iniciando com aresta nova e com os seguintes parâmetros:

$V_c \approx 37,7$  m/min

$V_f \approx 45,6$  mm/min

Rotação = 800 rpm,

Após os testes com a pastilha de CBN, chegou-se ao gráfico da figura 4.3. Através deste gráfico é possível afirmar que esta pastilha obteve melhores resultados na liga 16 -9.

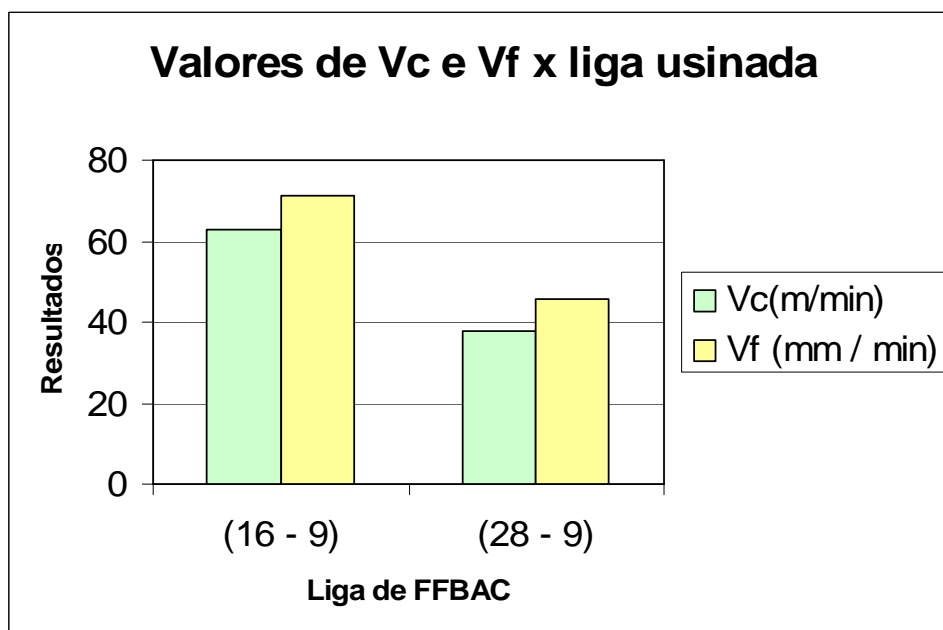


Figura 4.3 – Gráfico dos valores de Vc e Vf para as ligas (16 – 9) e (28 – 9) usadas com pastilha de CBN.

Durante a operação estava quebrando o material e não cortava, por isso foi reduzido a rotação para 500 e depois para 400rpm e o problema persistiu. Se fosse continuado a redução da rotação, a produtividade ficaria muito baixa. Então se optou em usinar essa liga com a pastilha de cerâmica de raio 0,4 mm.

## 4.2 - Pastilha de cerâmica

Nos testes realizados com as pastilhas de cerâmica, optou-se em manter os mesmos valores de avanço e profundidade de corte. Exceto nas ligas 32 – 6, 16 – 0 e 16 – 3 em que foi usado o valor de 0,074 para o avanço e profundidade de corte de 0,15mm. As figuras 4.4 e 4.5, são micrografias da pastilha de cerâmica utilizada para se usinar a liga 28 - 3, na qual é possível visualizar os principais desgaste sofrido pela pastilha.

### **Liga de FFBAC com 28% de cromo e 0% de molibdênio:**

Foi iniciado com 800 rpm e aumentado até 1250 rpm a rotação, pois o material é mais macio que o anterior, e então diminuído para 1000 rpm para retardar o desgaste da pastilha. Foi finalizado três cilindros, com pouco desgaste nas arestas das pastilhas. Usou três arestas e tendo cada aresta aproximadamente os seguintes desgastes:

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,1 mm

**Liga de FFBAC com 32% de cromo e 0% de molibdênio** com os seguintes parâmetros:

Usado a aresta 1 no primeiro faceamento e desbaste do primeiro cilindro. Quebrou a aresta no início do primeiro faceamento do segundo cilindro. Foi alterada a rotação para 800 rpm, e utilizado outra aresta.

Com a aresta 2 desgastou com apenas 4 passadas.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm

Após este novo desgaste a rotação foi alterada para 500 rpm.

Ao usar a aresta 3 foi feito o primeiro faceamento e desbaste do segundo cilindro, e primeiro faceamento do terceiro cilindro. O corte melhorou, ao notar que estava perdendo qualidade na superfície da peça a rotação foi abaixada para 400 rpm, mas no fim do faceamento do terceiro cilindro notou-se que desgastou a aresta.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Com a aresta 4, foi feito o desbaste do terceiro cilindro, segundo faceamento e chanfro do primeiro cilindro, e segundo faceamento e chanfro do segundo cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Com a aresta 5 foi feito o segundo faceamento e chanfro do terceiro cilindro, e os cones dos três cilindros.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Foi observado então que foram obtidos 3 corpos e prova e gastas 5 arestas.

### **Liga de FFBAC com 28% de cromo e 3% de molibdênio:**

Usando a aresta 1 foi feito primeiro faceamento e desbaste do primeiro, segundo e terceiro cilindros.

Desgaste de cratera = 0,15 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm

Usando a aresta 2 foi feito primeiro faceamento e desbaste do quarto, quinto e sexto cilindros.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Usando a aresta 3 foi feito segundo faceamento e chanfro do primeiro, segundo, terceiro e quarto cilindro.

Desgaste de cratera = 0,4 mm.

Desgaste de flanco = 0,25 mm.

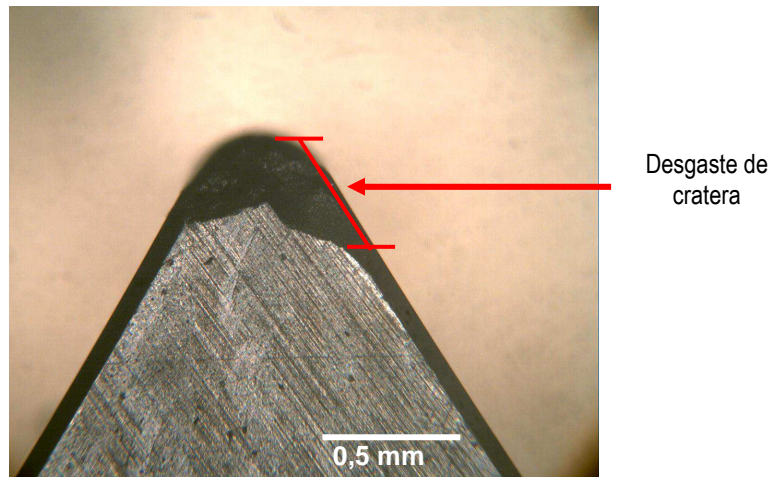


Figura 4.4 – Desgaste de cratera em pastilha de cerâmica.

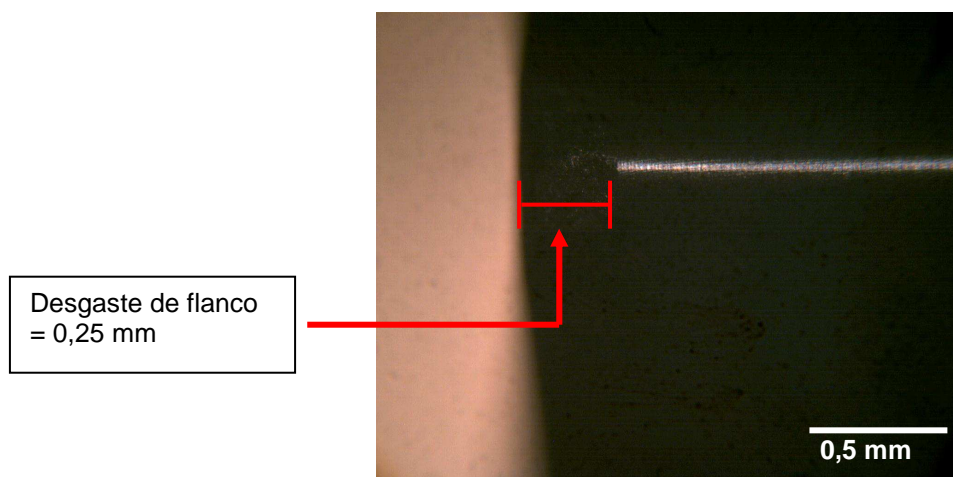


Figura 4.5 - Desgaste de flanco em pastilha de cerâmica

Usando a aresta 4, foi feito segundo faceamento e chanfro do quinto e sexto cilindro, e cones dos seis cilindros.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,1 mm

Concluiu-se que foram finalizadas 6 peças e gastas 4 arestas.

**Liga de FFBAC com 20% de cromo e 3% de molibdênio:**

Usando a aresta 1 foi realizado o primeiro faceamento e desbaste do primeiro e do segundo cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm

Usando a aresta 2 foi realizado o primeiro faceamento e desbaste do terceiro cilindro, e segundo faceamento e chanfro do primeiro cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,7 mm

Usando a aresta 3 foi feito o segundo faceamento e chanfro do segundo e terceiro cilindro, e os cones dos três cilindros.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,2 mm

Fez 3 peças com 3 arestas.

**Liga de FFBAC com 24% de cromo e 0% de molibdênio:**

Usando a aresta 1 foi feito o primeiro faceamento e desbaste do primeiro e segundo cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,1 mm

Nestes valores de desgastes já foram desconsiderados o que foi desgastado na liga anterior. Foi notada uma pressão de corte muito alta. Se, por exemplo, fosse necessário retirar 5 milésimos, o passo era feito e só realizava 4 milésimos de milímetro. Para chegar aos 5 milésimos era só repetir o passo sem alterar os ajustes.

Usando a aresta 2 foi realizado primeiro faceamento e desbaste do terceiro e quarto cilindros, e segundo faceamento e chanfro do primeiro cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Ao trocar para a aresta 3, reduziu-se a rotação de 800 rpm para 500 rpm.

Usando a aresta 3, foi realizado o segundo faceamento e chanfro do segundo, terceiro e quarto cilindros, e os cones dos quatros cilindros.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm

Fez 4 peças com 3 arestas.

Liga de FFBAC com 32% de cromo e 6% de molibdênio:

Usando a aresta 1 foram feitas seis peças completas.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,2 mm

Fez 6 peças com 1 aresta.

**Liga de FFBAC com 16% de cromo e 0% de molibdênio:**

Usando a aresta 1 também foram feitas seis peças completas.

Desgaste de cratera = 0,25 mm.

Desgaste de flanco = 0,25 mm.

Fez 6 peças com 1 aresta.

Liga de FFBAC com 16% de cromo e 3% de molibdênio:

Usando a aresta 1 foi feito primeiro faceamento e desbaste do primeiro, segundo, terceiro e quarto cilindro.

Desgaste de cratera = 0,30 mm

Desgaste de flanco = 0,25 mm

Usando a aresta 2 foi feito segundo faceamento e desbaste do primeiro, segundo, terceiro e quarto cilindro e os cones dos quatros cilindros.

Desgaste de cratera = 0,25 mm

Desgaste de flanco = 0,20 mm

Fez 4 peças com 2 arestas.

### **Liga de FFBAC com 28% de cromo e 9% de molibdênio:**

Tentou-se usinar com CBN, porém mesmo em 400 rpm, não foi possível.

Foi usada a aresta 1 para fazer o primeiro faceamento e desbaste do primeiro e segundo cilindro.

Cortou bem com acabamento.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,3 mm

Com a aresta 2 foi feito o primeiro faceamento e desbaste terceiro, e segundo faceamento e chanfro do primeiro, segundo e terceiro cilindro.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Por fim, usou-se a aresta 3 para usinar cones dos três cilindros.

Desgaste de cratera = 0,3 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Fez 3 peças com 3 arestas.



**Liga de FFBAC com 16% de cromo e 9% de molibdênio:**

Tentou-se usinar com CBN, mas devido a um defeito micro estrutural no material da peça, um vale que estava gerando excesso de ruído, não foi possível realizar tal operação. Estava faltando a última peça que só tinha feito o primeiro faceamento e parou no desbaste, onde se verificou o defeito da peça.

Usando a aresta 1 quebrou logo ao iniciar o desbaste. Quebrou justamente no defeito, apresentou alta vibração e corte interrompido. Mediu-se o avariado:

No cratera = 2,0 mm

No flanco = 1,0 mm

Assim essa parte com defeito foi usinada com a pastilha de metal duro.

Após ser desbastada pela pastilha de metal duro, voltou-se a usina-la com a pastilha de cerâmica raio 0,4 mm.

Usando a aresta 1 foi feito o segundo faceamento.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Usando a aresta 2 usinado o chanfro.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

Após gastar 2 arestas abaixou-se a rotação para 160 rpm.

Com a aresta 2 foi usinado o cone.

Desgaste de cratera = 0,2 mm

Desgaste de flanco = 0,15 mm

Após os testes, foi possível montar a tabela 4.1, onde se pode comparar os parâmetros obtidos durante os testes com a pastilha de cerâmica e o gráfico da figura 4.6 com as velocidades de corte obtidas no ensaio.

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos na usinagem das ligas com pastilha de cerâmica

Liga (Cr-Mo)	n (rpm)	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	Espessura cavaco (mm)
28 – 0	800	37,7	45,6	0,057	0,3	0,05
32 – 0	1000	47,12	57	0,057	0,3	0,15
28 – 3	400	18,85	22,8	0,057	0,3	0,15
20 – 3	400	18,85	22,8	0,057	0,3	0,10
24 – 0	800	37,7	45,6	0,057	0,3	0,15
32 – 6	200	9,43	14,8	0,074	0,15	0,05
16 – 0	500	23,56	37	0,074	0,15	0,35
16 – 3	400	18,85	29,6	0,074	0,15	0,15
28 – 9	200	9,42	11,4	0,057	0,3	0,15
16 – 9	200	9,42	11,4	0,057	0,3	*

\* - Devido aos parâmetros de usinagem não foi possível medir cavaco.

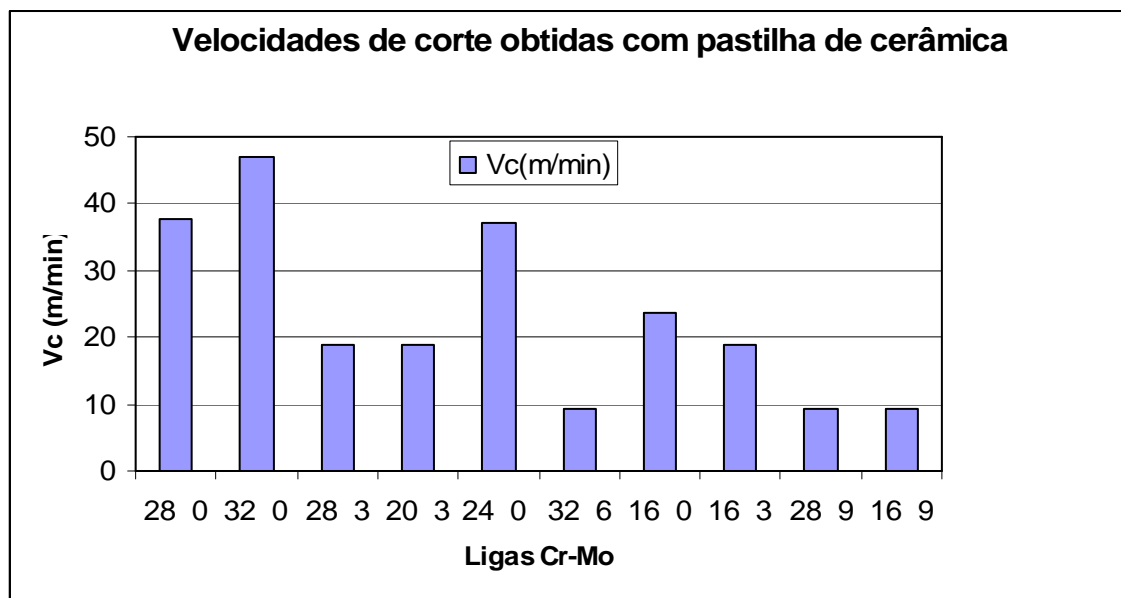


Figura 4.6 – Gráfico das velocidades de corte obtidas com a pastilha de cerâmica.

### 4.3 - Pastilha de metal duro

Nos testes realizados com as pastilhas de metal duro, optou-se em manter os mesmos valores de avanço e profundidade de corte do item 4.1. As figuras 4.7 e 4.8,

são micrografias da pastilha de metal duro utilizada para se usinar a liga 28 - 9 e é possível visualizar os principais desgastes sofridos pela pastilha

#### **Liga de FFBAC com 16% de cromo e 9% de molibdênio 16-9:**

Devido a um defeito micro estrutural, não se conseguiu usinar nem com CBN e nem com cerâmica, iniciou-se então com pastilha de metal duro.

Aresta 1 = desbaste do último cilindro.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,4 mm

A pastilha de metal duro conseguiu desbastar todo esse cilindro. E este foi terminado com cerâmica raio 0,8 mm.

#### **Liga de FFBAC com 32% de cromo e 9% de molibdênio**

Usinada pela mesma pastilha de metal duro.

Aresta 1 = primeiro faceamento e desbaste do primeiro e segundo cilindro, segundo faceamento e chanfro do primeiro cilindro.

Desgaste de cratera = 0,15 mm

Desgaste de flanco = 0,15 mm

Aresta 2 = segundo faceamento e chanfro do segundo cilindro, e os cones dos dois cilindros.

Desgaste de cratera = 0,15 mm

Desgaste de flanco = 0,15 mm

#### **Liga de FFBAC com 24% de cromo e 9% de molibdênio**

Usinada pela mesma pastilha de metal duro com avanço manual.

Aresta 1 = fez as seis peças.

Após os faceamentos, desbastes e chanfros mudou-se o avanço para 0,057 mm por rotação.

Durante a usinagem foi percebido que o material apresentava dureza variável, e que caracteriza existência de carbonetos na sua estrutura.

Desgaste de cratera = 0,20 mm

Desgaste de flanco = 0,15 mm

### **Liga de FFBAC com 28% de cromo e 9% de molibdênio**

Usinada pela mesma pastilha de metal duro.

Aresta 1 = todos os faceamentos e desbastes primeiro, segundo, terceiro e quarto cilindro e o cone do primeiro.

Desgaste de cratera = 0,30 mm

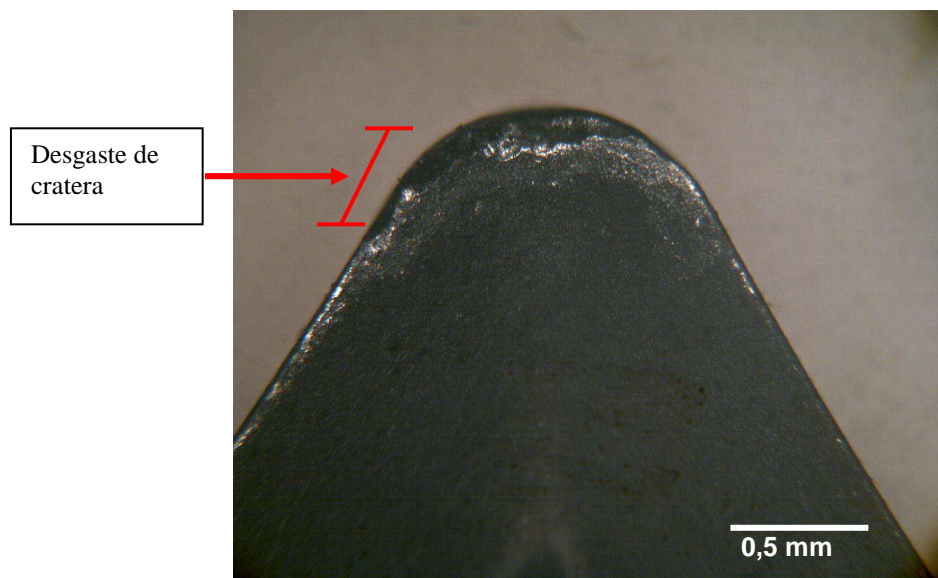


Figura 4.7 – Desgaste de cratera em pastilha de metal duro.

Desgaste de flanco = 0,15 mm

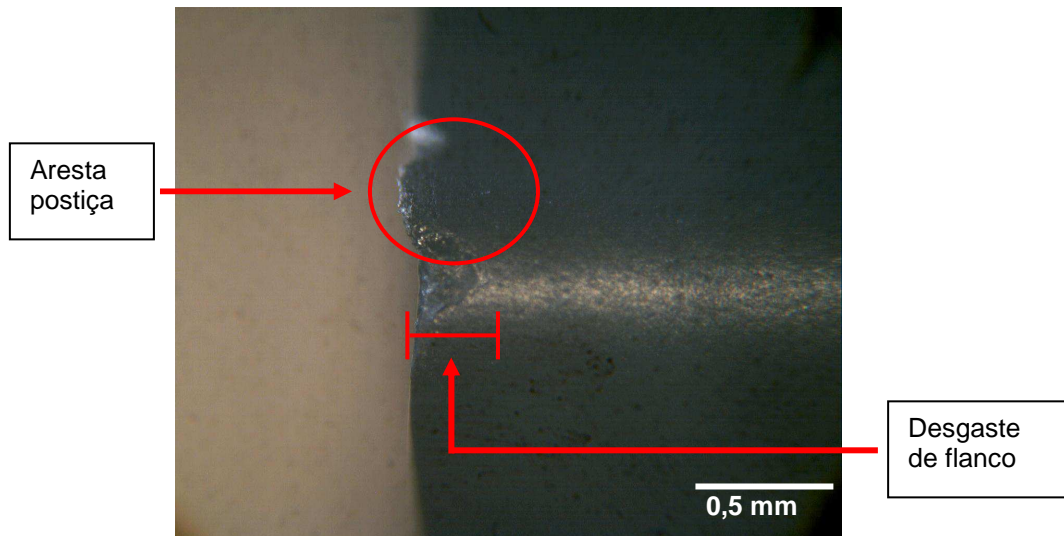


Figura 4.8 – Desgaste de flanco e aresta postiça em pastilha de metal duro. Ocorreu o aparecimento de aresta postiça de corte, o que é possível quando se têm baixas velocidades, material bifásico e altas temperaturas, como é o caso.

Aresta 2 = os cone do segundo, terceiro e quarto cilindro.

Desgaste de cratera = 0,1 mm

Desgaste de flanco = 0,1 mm.

Fez quatro peças com duas arestas. O gráfico da figura 4.9 mostra as velocidades de corte obtidas durante o ensaio com pastilha de metal duro.

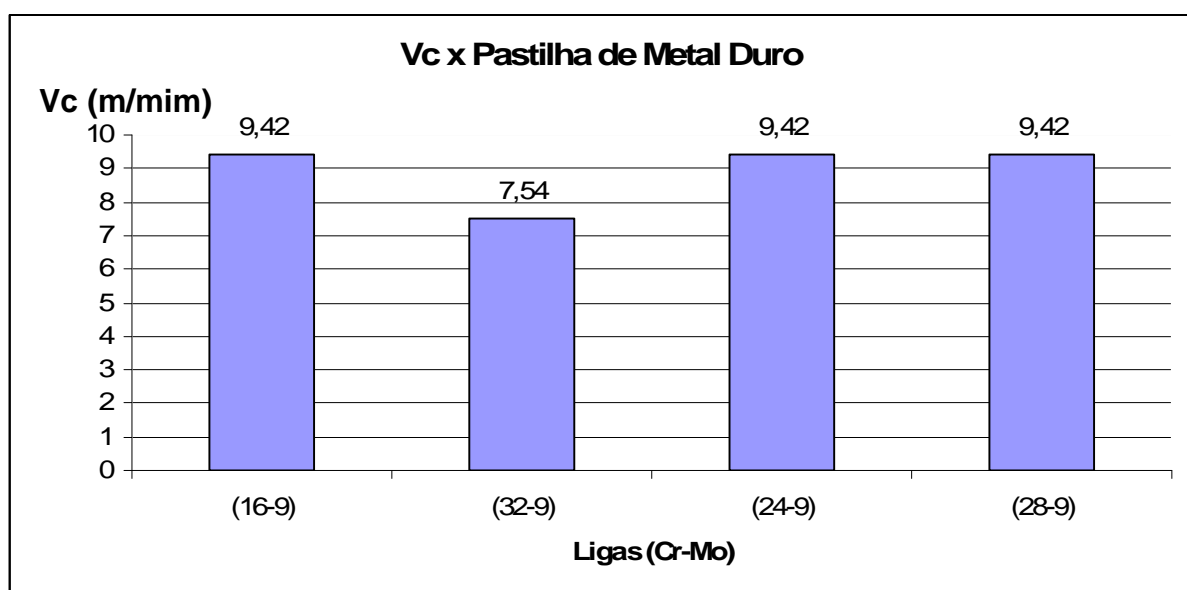


Figura 4.9 – Gráfico das velocidades de corte no ensaio com metal duro.

#### 4.4 – Bedame

Foi utilizado dois Bedames: o 1005 que possui uma aresta de corte no suporte RF123 G20 – 2020 B e o 1025 que possui duas arestas de corte no suporte RF151.23 – 2020 – 30. A que melhor atendeu durante os testes foi a pastilha 1005, devido a sua alta produtividade. As figuras 4.10 e 4.11, são micrografias dos bedames utilizados para as operações de corte dos cilindros.

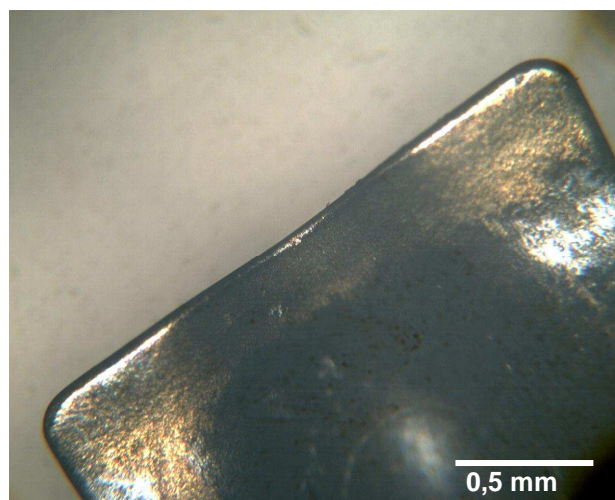


Figura 4.10 – Vista superior do bedame usado



Figura 4.11 – Vista lateral do bedame utilizado.

#### 4.5 – Discussão dos resultados

Após a realização dos ensaios, foi feita algumas discussões .

#### **Liga de FFBAC com 16% de cromo e 9% de molibdênio.**

Analizando a liga 16-9 foi visto que esta foi usinada pelas três pastilhas, assim montou-se a tabela 4.2 abaixo e o gráfico da figura 4.12:

Tabela 4.2 – Desgaste da aresta 1 usada na liga 16-9 com as respectivas pastilhas.

<b>Liga 16-9 Aresta 1</b>	<b>CBN</b>	<b>Cerâmica</b>	<b>Metal duro</b>
Vc (m/min)	62,8	9,42	9,42
Avanço (mm/rotação)	0,057	0,057	0,057
Profundidade corte (mm)	0,3	0,3	0,3
Desgaste de cratera (mm)	0,3	0,2	0,1
Desgaste de flanco (mm)	0,2	0,4	0,4
O que fez	primeiro faceamento e desbaste	segundo faceamento	Desbaste

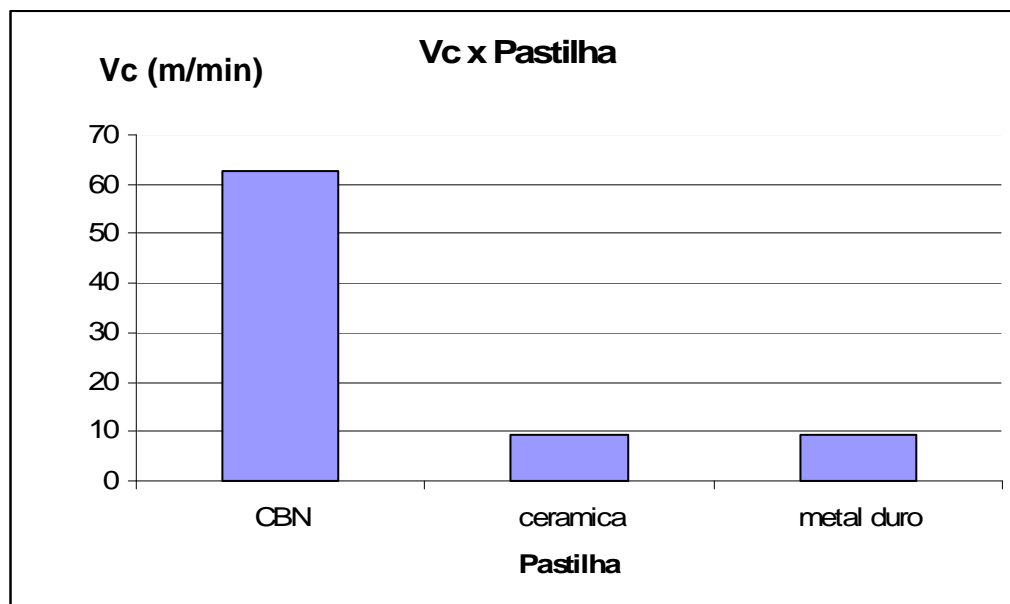


Figura 4.12 – Gráfico das velocidades para uma aresta na liga 16-9

#### **Discussão 1.**

A pastilha de CBN usinou essa liga com rotações maiores e ainda retirou mais material do que as outras.

Através da medição do desgaste das pastilhas com a lupa, pode-se montar o gráfico da figura 4.13.

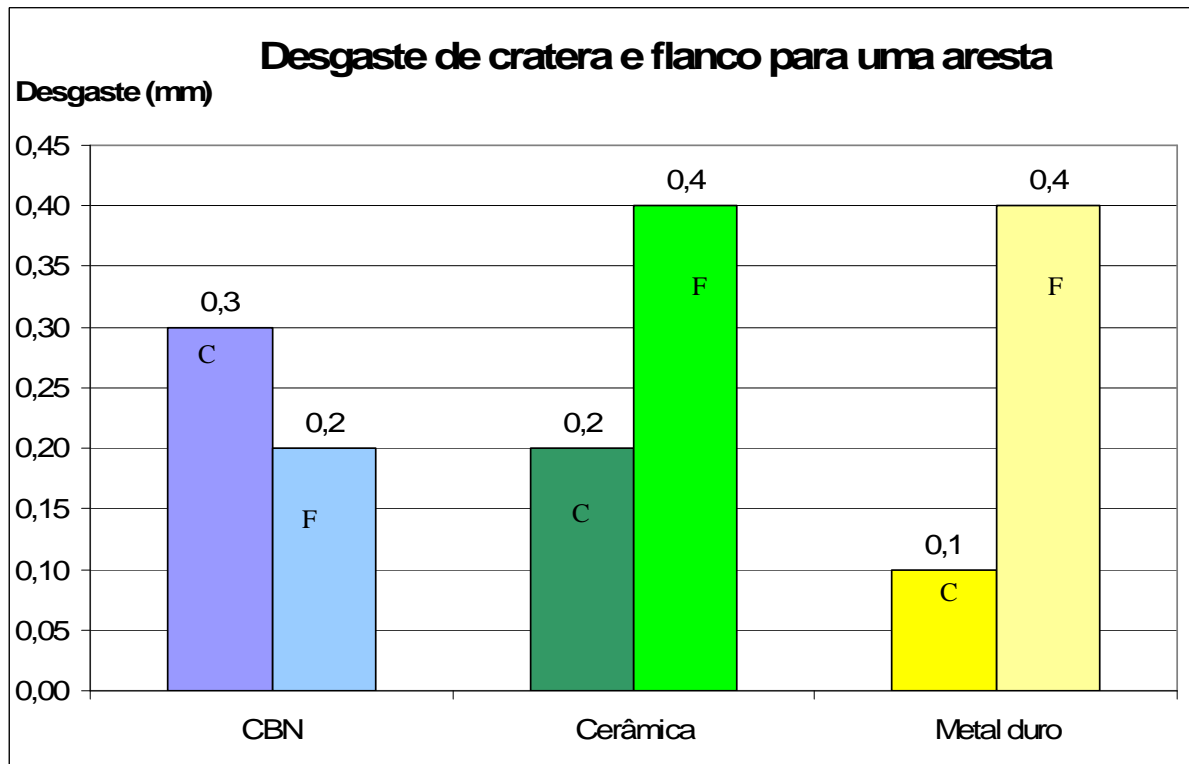


Figura 4.13 – Gráfico dos desgastes da pastilha na aresta1 na liga 16-9  
 Onde:  
 C = desgaste de cratera  
 F = desgaste de flanco

Agora para a liga 28-9, foi tentado usinar com as três pastilhas, porém não foi possível usar a de CBN, veja a tabela 4.2 na a seguir:

Tabela 4.3 – Desgaste da aresta 1 usada na liga 28-9 com as respectivas pastilhas.

Liga 28-9 Aresta 1	CBN	Cerâmica	Metal duro
Vc(m/min)	18,84	9,42	9,42
Avanço (mm/rotação)	0,057	0,057	0,057
Profundidade corte (mm)	0,3	0,3	0,3
Desgaste de cratera (mm)	*	0,1	0,1
Desgaste de flanco (mm)	*	0,3	0,4
O que fez	*	Primeiro faceamento e desbaste do 1 <sup>o</sup> e 2 <sup>o</sup> cilindro.	primeiro faceamento e desbaste do 1 <sup>o</sup> , 2 <sup>o</sup> , 3 <sup>o</sup> e 4 <sup>o</sup> cilindro.

\* - Corpo de prova não estava sendo cortado. Apenas quebrando. Influenciado principalmente por defeitos na microestrutura do material



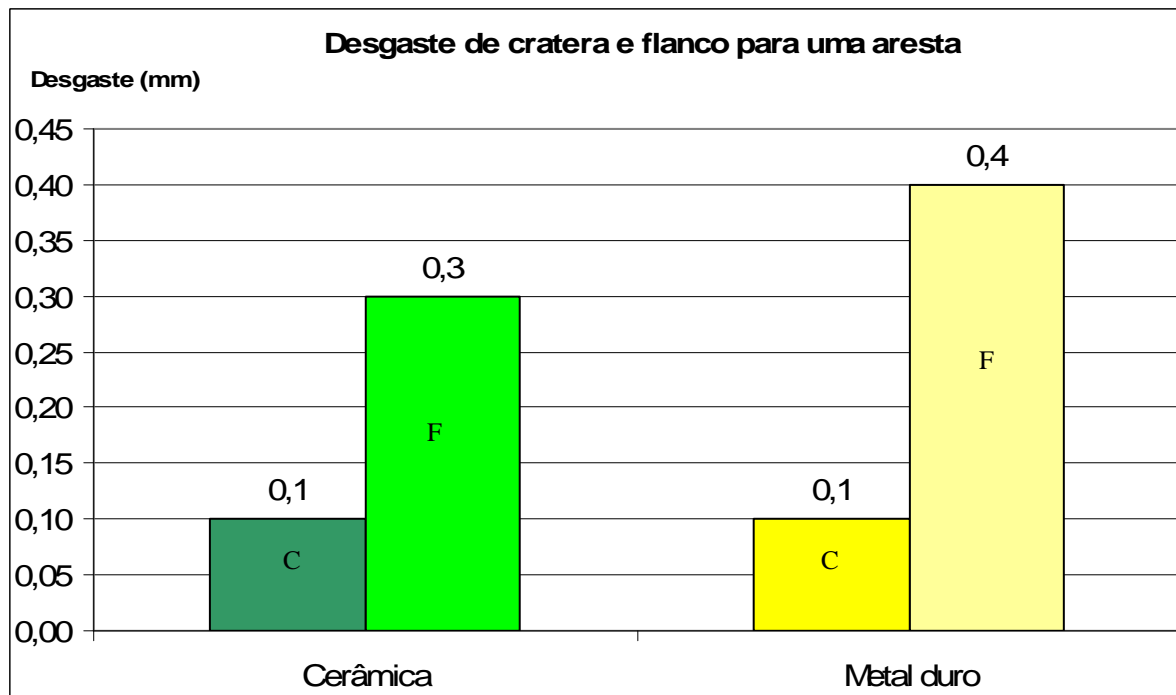


Figura 4.14 - Gráfico do desgaste da pastilha na aresta 1 na liga 28-9

Onde:

C = desgaste de cratera

F = desgaste de flanko

## Discussão 2.

Comparando a pastilha de metal duro com a de cerâmica mista viu-se que com os mesmos parâmetros de usinagem, a pastilha de metal duro é superior, pois consegue usinar o dobro com praticamente o mesmo desgaste na pastilha.

## CAPITULO V

### 5 - Conclusões

Pastilha de Cerâmica: consegue bom acabamento com médias velocidades de corte produtividade baixa. Com ligas que possuem teores de molibdênio de 9% a usinagem é dificultada, pois esta tem tenacidade e resistência ao impacto com valores entre que se situam entre o metal duro e o CBN. Com relação ao preço é um pouco mais cara que a metal duro, custa R\$ 30,00.

Pastilha de Metal duro: consegue um excelente acabamento somente com as mais reduzidas velocidades de corte, o que acarreta numa baixíssima produção. A grande vantagem é que tem tenacidade e resistência ao impacto mais elevado que as outras pastilhas, além disso, possui quebra cavaco que evita vibração e permite usinar as peça com 9% de molibdênio com menor desgaste quando comparada com a pastilha de CBN. Custa aproximadamente R\$ 27,00.

Pastilha de CBN: por ser a pastilha mais dura foi a que apresentou melhor produtividade, consegue um excelente acabamento com altas velocidades de corte, logo o desempenho da pastilha de CBN é superior a de metal duro e a de cerâmica. Pode fazer mais peças quando usados parâmetros de usinagem iguais aos das outras pastilhas. A desvantagem foi o elevado custo, em torno R\$ 500,00.

A partir dos dados obtidos, elaborou-se a tabela 5.1, comparando os principais parâmetros que devem ser considerados na hora de se escolher qual pastilha usar.

Tabela 5.1 – Comparação dos principais parâmetros na escolha de pastilhas.

<b>Pastilha</b>	<b>Metal Duro</b>	<b>Cerâmica</b>	<b>CBN</b>
<b>Acabamento</b>	Excelente em baixas velocidades de corte	Bom em médias velocidades de corte	Excelente em altas velocidades de corte
<b>Vantagem</b>	Alta tenacidade, resistindo a vibrações e impacto	Situa-se entre CBN e metal duro	Alta produção
<b>Desvantagem</b>	Baixa Produção	Baixa Produção	Custo
<b>Custo Médio</b>	R\$ 27,00	R\$ 30,00	R\$ 500,00

## CAPÍTULO VI

### 6 – Referências

1. Machado, Alisson Rocha Silva, Marcio Bacci da. **Usinagem dos metais**. 8.ed. Uberlândia, abril 2004.
2. Carvalho, Sandro Mauro de. **Estudo microestrutural dos ferros fundidos alto cromo e molibdênio**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
3. Regattieri, Cíntia Nunes Braga. **Estudo da resistência ao desgaste abrasivo de ferros fundidos brancos alto cromo e molibdênio**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.
4. Piero, Rodrigo Coutinho Del. **Resistência ao desgaste abrasivo a quente de ferros fundidos branco alto cromo, utilizados em barras de grelha na sinterização**. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
5. Custodio, Pedro Manuel. Selada, Antonio. **A maquinagem a alta velocidade na indústria de moldes**. Artigo. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria e Centimfe – Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e plásticos, Portugal, 2005.

6. Raslan, Alberto Arnaldo Raslan. Brasil, Jorge Francisco Costa.Regattieri,Cíntia Nunes Braga. Arantes, Luciano José. Scandian, Cherlio. Mello, José Daniel Biasoli de. **Modificações superficiais produzidas na usinagem por eletroerosão de ferros fundidos brancos alto cromo ligados ao molibdênio.** Paper. Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia.
7. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?Artigo=010160020827>>. Acesso em: 10 nov. 2007.
8. Cruz, Claudionor. Silva, Evaldo Malaquias da. Fernandes, Luciano Antônio. **Introdução a usinagem não tradicional – Um texto para cursos de graduação em engenharia.** Universidade Federal de Uberlândia – Departamento de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 1999.
9. Brasil, Sandvik Coromant do. **Manual técnico de usinagem: torneamento – fresamento - furação - mandrilamento - sistema de fixação.** São Paulo: Elanders, outubro 2005.
10. Brasil, Sandvik Coromant do. **Fácil de escolher, fácil de usar.** São Paulo: Elanders, 2006.