

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

IZABELA SILVA BICALHO

MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS UTILIZADAS NO
FRESAMENTO COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO AÇO AISI H13
ENDURECIDO

BELO HORIZONTE

2015

IZABELA SILVA BICALHO

MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS UTILIZADAS NO FRESAMENTO
COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO AÇO AISI H13 ENDURECIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Leonardo Roberto da Silva

BELO HORIZONTE

2015

IZABELA SILVA BICALHO

**MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS UTILIZADAS NO
FRESAMENTO COM ALTA VELOCIDADE DE CORTE NO AÇO AISI H13
ENDURECIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 13/07/2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva – Orientador

Prof. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Evanilton José Alves Barbosa

Dedico este trabalho a meus pais e a toda a
minha família que tanto me ajudaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível.

Agradeço aos meus pais, a minha irmã, ao meu namorado e a toda a minha família por estarem sempre me apoiando.

Agradeço ao professor Leonardo pelo apoio e pela ajuda sempre que precisei no decorrer do trabalho.

Agradeço ao Manoel por todo amparo e por sempre me apoiar quando necessitei.

Agradeço ao CEFET/MG por disponibilizar os equipamentos utilizados durante a pesquisa e a empresa NEMAK por disponibilizar os equipamentos para que a pesquisa fosse realizada.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

(CHARLES CHAPLIN)

RESUMO

A usinagem com altas velocidades (High Speed Machining - HSM) tem sido muito aplicada na fabricação de moldes e matrizes, pois além de garantir bom acabamento superficial, ainda reduz consideravelmente o tempo gasto para tal processo, o que reduz gastos com mão de obra por exemplo. Porém, com a alta velocidade, alguns inconvenientes ocorrem como o desgaste excessivo da ferramenta. O objetivo deste trabalho visa mensurar e determinar os mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de corte de metal duro no fresamento com alta velocidade de corte de peças de aço AISI H13 endurecido. Para isto, primeiramente usou-se uma lupa graduada para medir o desgaste de flanco máximo ($VB_{BM\acute{a}x}$) da ferramenta e após elas foram levadas para análises no MEV para identificação dos mecanismos de desgaste. Os resultados obtidos mostram que a quantidade de desgaste que as ferramentas apresentam é pequena e que não chega a inutilizá-las, o tipo de desgaste atuante é de flanco e o mecanismo de desgaste predominante nas peças é a ruptura seguida de abrasão, sendo que quase a totalidade das ferramentas analisadas apresenta este tipo de desgaste. Conclui-se que a velocidade de corte influencia fortemente no comportamento do desgaste.

Palavras-chave: Fresamento com alta velocidade. Ferramentas de corte. Mecanismos de desgaste.

ABSTRACT

The high speed machining (HSM) has been widely applied in the manufacture of dies and molds, as well as ensuring good surface finish, and considerably reduces the time spent on the process, which reduces costs on manpower, for example. However, with the high speed, some inconveniences happen such as wear tool. The purpose of this study is to measure and determine the wear mechanisms that act on carbide tools in the high speed milling of hardened AISI H13 steel. Thus, firstly a graduated magnifying glass was used to measure the maximum flank wear ($VB_{BM\acute{a}x}$) on the tools and after that, they were taken for SEM analysis to identify the wear mechanisms. The results obtained showed that the amount of wear the tools showed is small and does not make them unusable and the active type of wear is flank wear and the dominant wear mechanism on the tools is abrasive wear, with almost all the tools that were analyzed showed this type of wear. The conclusion is that the cutting speed influence on the tool behavior and therefore the tool wear.

Keywords: High speed milling. Cutting tools. Wear mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fabricação dos aços ferramenta	15
Figura 2 - Processo ESR	18
Figura 3 - Processo de fabricação do metal duro	20
Figura 4 - Tipos de fresamento	24
Figura 5 - Fresamentos tangencial e de faceamento	25
Figura 6 - Fresamentos concordante e discordante	26
Figura 7 - Movimentos no fresamento	27
Figura 8 - Profundidades no fresamento	28
Figura 9 - Faixas de velocidade de transição entre corte convencional e HSC	29
Figura 10 - Esquema de redução da temperatura na aresta de corte em relação à velocidade de corte	30
Figura 11 - Parâmetros que compõem o processo HSM	31
Figura 12 - Influência da temperatura e velocidade dos principais mecanismos de desgaste	33
Figura 13 - Desgaste de flanco da ferramenta de corte	34
Figura 14 - Desgaste de flanco	34
Figura 15 - Desgastes de flanco médio e máximo	35
Figura 16 - Fresadora MIKRON HSM 700	36
Figura 17 - Corpos de prova antes e depois do fresamento	37
Figura 18 - Insertos utilizados nos ensaios	38
Figura 19 - Lupa graduada utilizada para medição do desgaste de flanco	40
Figura 20 - Microscópio Eletrônico de Varredura SHIMADZU SSX-550	41
Figura 21 - Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,05$ mm	42
Figura 22 - Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,10$ mm	43
Figura 23 - Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,20$ mm	44
Figura 24 - Micrografias do inserto da peça 2 para a condição 1 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x	45
Figura 25 - Micrografias do inserto da peça 4 para a condição 2 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x	45

- Figura 26 - Micrografias do inserto da peça 9 para a condição 3 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 45**
- Figura 27 - Micrografias do inserto da peça 11 para a condição 4 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 46**
- Figura 28 - Micrografias do inserto da peça 13 para a condição 5 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 46**
- Figura 29 - Micrografias do inserto da peça 18 para a condição 6 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 46**
- Figura 30 - Micrografias do inserto da peça 19 para a condição 7 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 47**
- Figura 31 - Micrografias do inserto da peça 23 para a condição 8 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 47**
- Figura 32 - Micrografias do inserto da peça 27 para a condição 9 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 47**
- Figura 33 - Micrografias do inserto da peça 29 para a condição 10 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 48**
- Figura 34 - Micrografias do inserto da peça 33 para a condição 11 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 48**
- Figura 35 - Micrografias do inserto da peça 35 para a condição 12 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x 48**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços ferramenta	16
Tabela 2 - Composição química em percentual do aço AISI H13	17
Tabela 3 - Processos CVD e PVD	22
Tabela 4 - Composição química em percentual do aço AISI H13	37
Tabela 5 - Condições de ensaio utilizadas	38
Tabela 6 - Amostras utilizadas em cada condição de ensaio	39
Tabela 7 - Interrupções ocorridas em cada condição de ensaio	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Aços ferramenta	15
3.1.1 Características e aplicações dos aços ferramenta	16
3.2 Aço AISI H13	17
3.2.1 Características e aplicações do aço AISI H13	18
3.3 Ferramenta de corte	19
3.3.1 Metal duro	19
3.3.2 Metal duro revestido	20
<i>3.3.2.1 Deposição Química a Vapor - CVD (Chemical Vapour Deposition)</i>	21
<i>3.3.2.2 Deposição Física a Vapor - PVD (Physical Vapour Deposition)</i>	21
3.4 Fresamento	23
3.4.1 Fresamento concordante	25
3.4.2 Fresamento discordante	25
3.4.3 Movimentos no fresamento	26
3.4.4 Velocidades no fresamento	27
3.4.5 Grandezas no fresamento	27
3.5 Usinagem a alta velocidade	28
3.5.1 Diminuição da temperatura na usinagem HSM	30
3.5.2 Fatores que afetam a usinagem HSM	30
3.5.3 Vantagens e desvantagens da usinagem HSM	32
3.6 Mecanismos de desgaste	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1 Banco de ensaios	36

4.2	Corpos de prova	36
4.3	Ferramenta de corte	37
4.4	Condições utilizadas nos ensaios	38
4.5	Caracterização dos mecanismos de desgaste	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1	Medição do desgaste da ferramenta	42
5.2	Análise dos mecanismos de desgaste	44
6	CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

A utilização de metal duro em ferramentas de corte para usinagem representou uma guinada para os processos de torneamento principalmente de fresamento, pois proporcionou a produção de peças com menor custo e menos tempo de fabricação. O metal duro é um material que apresenta elevada resistência ao desgaste, e por isso pode ser aplicado no fresamento com altas velocidades, além de ser refratário, sendo assim, ele se apresenta como uma das melhores alternativas para a usinagem com alta velocidade que possui condições agressivas de trabalho como elevadas temperaturas e alta taxa de desgaste (UPADHYAYA, 1998 apud OLIVEIRA, 2007).

O fresamento é um dos principais processos de usinagem, pois possui flexibilidade aliada a alta taxa de remoção de material. Neste processo a ferramenta é multicortante, cilíndrica, possui geometria definida e eixo de rotação perpendicular ao avanço e realiza o movimento rotacional, enquanto que a peça realiza os movimentos longitudinais, transversais e de avanço, ou seja, tanto a ferramenta quanto a peça se movimentam durante o corte (GUENZA, 2008; MACHADO et al., 2009).

Durante o fresamento, a ferramenta de corte é consumida no processo devido ao seu desgaste e avarias que são inerentes ao processo. Esses fatores fazem a temperatura na superfície de corte aumentar e conseqüentemente a integridade superficial da peça pode ser danificada, além da possibilidade de causar tensões residuais indesejáveis na mesma. Sabe-se que o principal mecanismo de desgaste que atua na ferramenta é o mecanismo de abrasão, porém esta informação é insuficiente para tentar minimizá-lo durante o processo. Assim, é de extrema importância estudar os mecanismos de desgaste que atuam na ferramenta de corte para minimizar seus efeitos e até mesmo evitá-los para que os custos e o tempo do processo de fresamento sejam cada vez menores, proporcionando peças de alta qualidade (GUENZA, 2008).

A usinagem HSM é uma tecnologia eficiente que promove notável tolerância de forma e dimensional. Neste processo, a velocidade de corte é de cinco a dez vezes maior do que no processo usual, porém para se ter tal velocidade os movimentos de avanço e profundidade são diminuídos em grande quantidade (ERDEL, 1997; SCHULZ e MORIWAKI, 1992 apud OLIVEIRA, 2007).

2 OBJETIVOS

O desgaste das ferramentas de corte no processo de fresamento HSM aumenta o tempo de usinagem, pois é necessário tempo para troca ou reafiação da ferramenta, além de aumentar o custo do processo, custo da própria ferramenta e da sua manutenção e por fim o corte também não apresenta boa qualidade superficial, assim faz-se necessário o estudo dos mecanismos de desgaste que atuam na ferramenta de corte.

2.1 Objetivo geral

Estudar os mecanismos de desgaste de ferramentas de corte de metal duro no processo de fresamento com altas velocidades.

2.2 Objetivos específicos

- a) Medir o desgaste de flanco máximo ($VB_{BM\acute{a}x}$) da ferramenta de corte;
- b) Avaliar os mecanismos de desgaste atuantes no inserto no processo de fresamento com alta velocidade.

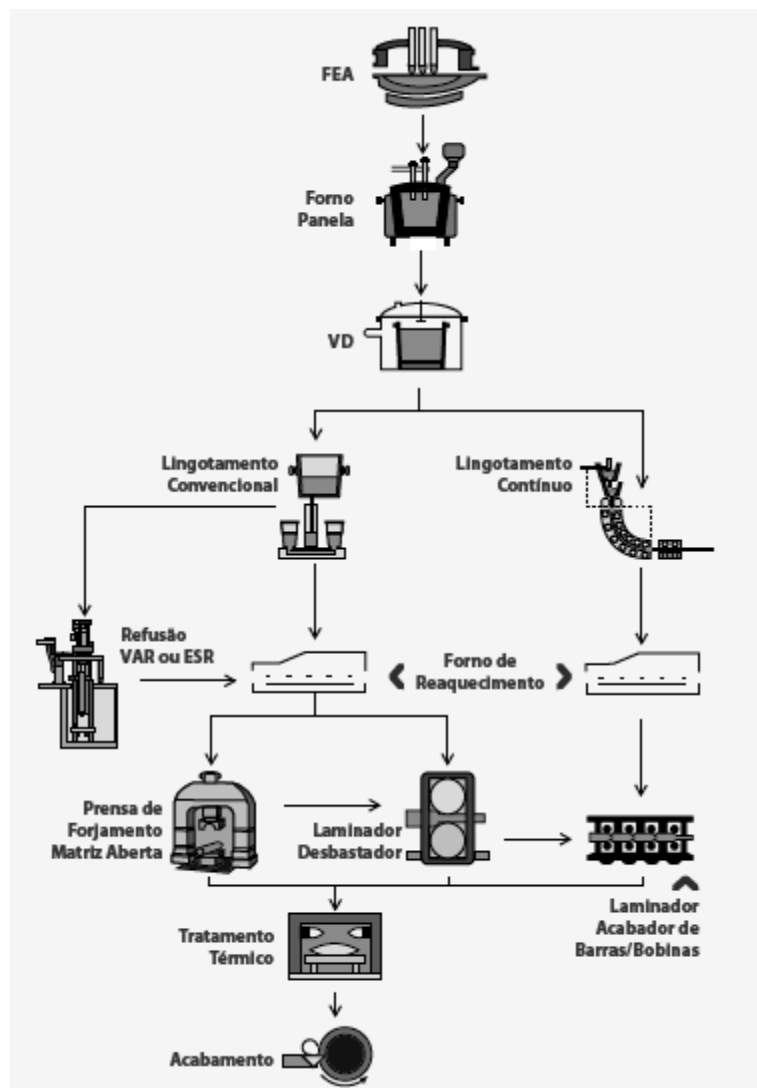
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços ferramenta

Os aços ferramenta podem ser fabricados por metalurgia do pó, forjamento ou fundição de precisão e para manter sua elevada qualidade, necessária em determinadas aplicações, deve-se fazer um monitoramento cuidadoso de variáveis como composição química e homogeneidade do aço (GABARDO, 2008).

A Figura 1 mostra o esquema de fabricação de aços ferramenta na aciaria, em que os significados das siglas são Forno Elétrico a Arco (FEA), Desgaseificação a Vácuo (VD), Refusão por Escória Eletrocondutora (ESR) e Refusão a Arco sob Vácuo (VAR) (VILLARES METALS, 2012).

Figura 1 - Processo de fabricação dos aços ferramenta.



Fonte: VILLARES METALS, 2012.

Os aços ferramenta podem ser classificados de acordo com suas características ou suas aplicações, a classificação mais comum desses aços é a American Iron and Steel Institute (AISI). Na Figura 1 é possível perceber as etapas VD e ESR, nas quais o aço AISI H13 é fabricado. Na classificação AISI, cada aço ferramenta possui um símbolo e a Tabela 1 representa os principais aços e símbolos (SILVA et al., 2006 apud GABARDO, 2008).

Tabela 1 - Classificação dos aços ferramenta.

TIPO DE AÇO FERRAMENTA		SÍMBOLO
Aços temperáveis em água (water)		W
Aços resistentes ao choque (shock)		S
Aços para fins especiais	Tipo baixa liga (lowalloy)	L
	Aços para moldes	P
Aços para trabalho a frio	Aços temperáveis em óleo (oil)	O
	Aços média liga temperáveis ao ar (air)	A
	Aços alto carbono, alto cromo	D
Aços para trabalho a quente (hot working)	Ao cromo	H1 – H19
	Ao tungstênio	H20 – H39
	Ao molibdênio	H40 – H59
Aços rápidos	Ao tungstênio	T
	Ao molibdênio	M

Fonte: SILVA et al., 2006 apud GABARDO, 2008.

De acordo com a Tabela 1, o aço AISI H13 pertence à série H, que são aços para trabalho a quente (no inglês hot working), de média e alta liga com baixo teor de carbono. Os aços mais comuns desta categoria são o H11, H12 e H13, que são aplicados especialmente em moldes de fundição sob pressão e ferramentas para extrusão a quente por possuírem características como resistência a deformação e a trincas em altas temperaturas e resistência ao impacto (SILVA et al., 2006 apud GABARDO, 2008).

3.1.1 Características e aplicações dos aços ferramenta

Os aços ferramenta possuem notáveis propriedades como elevadas dureza e tenacidade, boa resistência à abrasão e à corrosão, além de conservar essas propriedades quando exposto a altas temperaturas. Um modo de preservar a ferramenta e elevar sua vida útil é fazer tratamentos em sua superfície. As principais aplicações de aços ferramenta são em ferramentas de corte, ferramentas de forjamento e matrizes de extrusão (GABARDO, 2008; PAULA, 2008).

3.2 Aço AISI H13

De acordo com Ferreira (2001), o aço AISI H13 é um aço para trabalho a quente e tem sido constantemente melhorado ao mesmo tempo em que acordos também têm sido feitos com determinadas associações. O fruto dessas ações é que este aço hoje pode ser considerado um aço com qualidade premium no campo das ferramentas, o que significa que houve um aumento de suas propriedades mecânicas e conseqüentemente aumento da vida útil da ferramenta.

Segundo Ferreira (2001), o aço AISI H13 possui manganês, silício, vanádio, molibdênio e, especialmente, cromo como elementos de liga. A Tabela 2 exemplifica a porcentagem em peso mínima e máxima para cada elemento na composição deste aço.

Tabela 2 - Composição química em percentual do aço AISI H13.

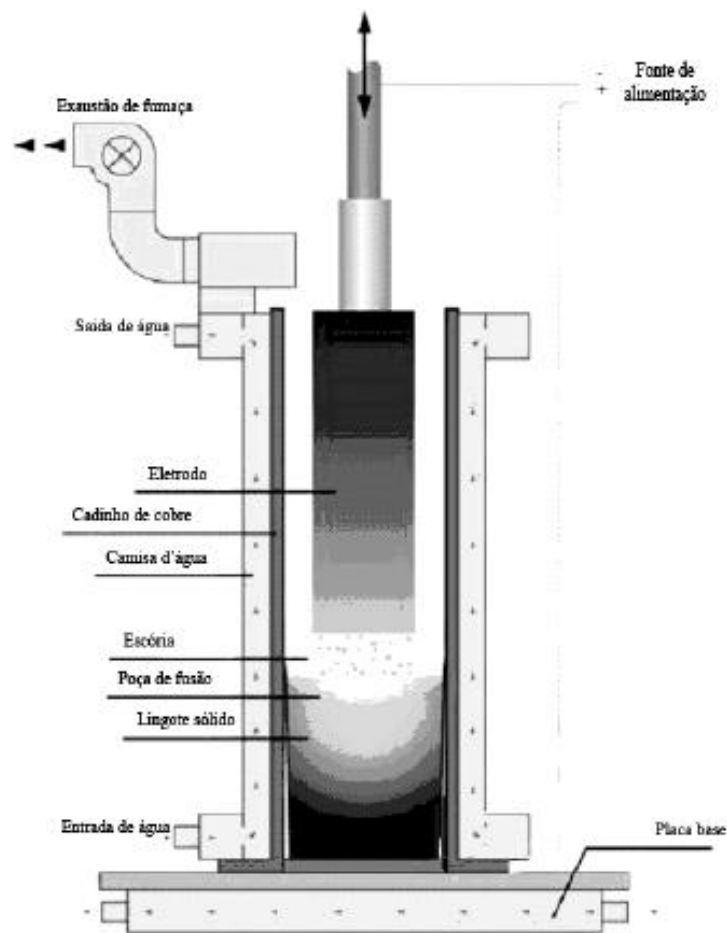
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
Mínimo	0,37	0,20	0,80	5,00	0,80	1,20
Máximo	0,42	0,50	1,20	5,50	1,20	1,75

Fonte: NADCA, 1997 apud FERREIRA, 2001.

Cada elemento de liga e sua proporção fornecem uma característica diferente ao aço e influenciam nas suas propriedades como, por exemplo, o carbono é responsável pela dureza do aço (BENEDYK, 1970 apud GABARDO, 2008). Já o cromo garante temperabilidade e resistência à oxidação ao aço, o silício eleva o seu limite de escoamento, o molibdênio diminui a fragilidade do aço a altas temperaturas, pois melhora a retenção de dureza, o manganês diminui o potencial de oxigênio agindo como desoxidante e, por fim, o vanádio garante tenacidade ao aço (BASSO, 2007; GABARDO, 2008).

A fabricação do aço AISI H13 é feita pelo método ESR, que consiste na refusão do lingote por VD com uma lingoteira de cobre que possui escória básica. Este processo proporciona um material homogêneo com pouca segregação e extraordinária microestrutura bruta de solidificação. (GABARDO, 2008; VILLARES METALS, 2014). A Figura 2 exemplifica o processo ESR.

Figura 2 - Processo ESR.



Fonte: KELKAR et al., 2005 apud GABARDO, 2008.

Durante a fabricação do aço AISI H13, a formação de carbonetos primários deve ser impedida, pois eles agem como concentradores de tensão, fragilizando o aço, diminuindo sua tenacidade e favorecendo o aparecimento de trincas (GABARDO, 2008).

3.2.1 Características e aplicações do aço AISI H13

O aço AISI H13 é um dos aços ferramenta mais utilizados por possuir excelentes propriedades mecânicas (GABARDO, 2008). Dentre essas propriedades podem ser citadas: altas temperabilidade e resistência ao amolecimento pelo calor e a trincas por fadiga térmica, boas resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, polibilidade e usinabilidade, estabilidade dimensional durante o tratamento térmico e excelentes tenacidade e resistência a choques térmicos em razão de mudanças bruscas de temperatura, evitando o aparecimento de trincas (STEEL, 1993 e UDDEHOLM, 2014 apud GABARDO, 2008; VILLARES METALS, 2006).

De acordo com a North American Die Cast Association (NADCA) (1997) apud Gabardo (2008), a propriedade final do aço não depende somente do tratamento térmico realizado, mas também da qualidade inicial do material.

O aço AISI H13 é utilizado em uma faixa de dureza que vai de 44 a 50 HRc, que depende de sua aplicação. Este aço deve possuir ótimas qualidades, pois é utilizado em situações que envolvem pressão, desgaste e impacto em elevadas temperaturas, normalmente a temperatura de 500 °C é atingida ou ultrapassada. Algumas das suas aplicações são matrizes para fundição em pressão, para forjamento a quente e para estampagem; moldes de injeção e extrusão de metais (alumínio, zinco e cobre); balancins e punções; tesouras e facas para corte a quente; ferramentas para extrusão e forjamento; guias; conformação em prensas e martelos e, finalmente, em aplicações mecânicas e automobilísticas (CHIAVERINI, 1979 e FALBHOMER et al., 2000 apud HIOKI, 2006; FERREIRA, 2001; PEREIRA, 2006; GABARDO, 2008; VILLARES METALS, 2006; MESQUITA, 2013).

3.3 Ferramenta de corte

Para determinar o material da ferramenta de corte, deve-se levar em conta que este deve ser mais duro e mecanicamente mais resistente que o material da peça. No caso do fresamento, que o corte é interrompido, além de altas dureza e resistência mecânica, o material precisa ser tenaz para suportar as forças de choque e impacto às quais ele será submetido. Para se ter uma boa ferramenta de corte, ela deve combinar todas essas características em determinadas proporções, para isso podem ser misturados materiais que juntos oferecem características necessárias ao processo (MACHADO et al., 2009).

3.3.1 Metal duro

Segundo Machado et al. (2009), a descoberta do metal duro utilizado em ferramentas de corte possibilitou o aumento da velocidade de corte, que passou a ser de 250 a 300 m/min. Este material foi descoberto por Schröter em 1920, quando produziu o carboneto de tungstênio (WC). O metal duro, WC + Co, é produzido pela metalurgia do pó e apresenta surpreendentes propriedades como resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. Ele pode conter adições de vários componentes diferentes, por isso existem várias classes diferentes para esse material, de acordo com sua aplicação.

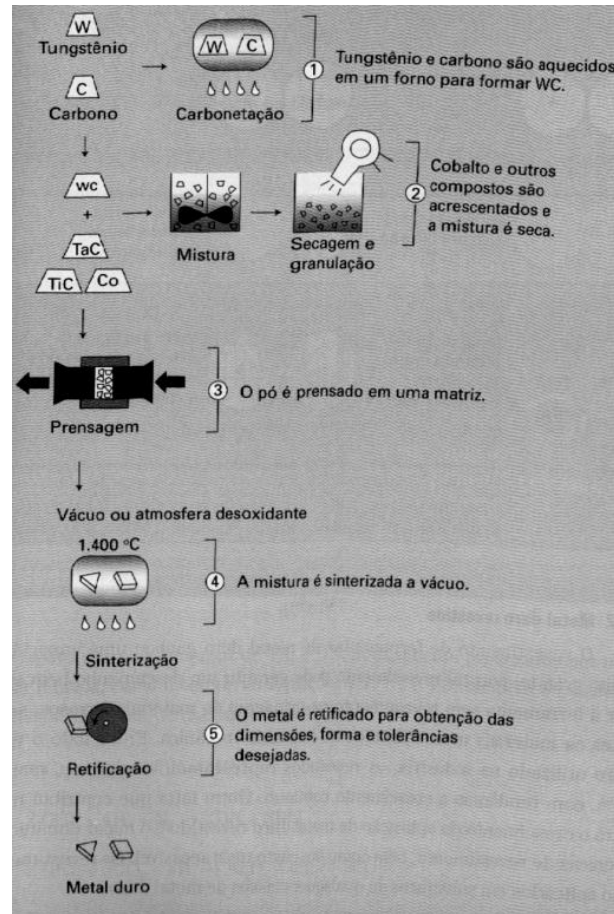
De acordo com Machado et al. (2009), a fabricação do metal duro constitui das seguintes etapas:

- Mistura de W + C;
- Moagem;
- Prensagem da mistura;

- Sinterização a vácuo;
- Retificação.

Além das etapas citadas acima, pode ocorrer a adição de outros elementos ao metal duro, dependendo de sua classe. A Figura 3 esquematiza o processo de sua fabricação.

Figura 3 – Processo de fabricação do metal duro.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

3.3.2 Metal duro revestido

Os revestimentos de ferramentas de metal duro devem possuir algumas características como alta dureza, baixa condutividade térmica, boas tenacidade e estabilidade térmica, difusão mínima e baixo coeficiente de atrito. Isto se deve ao fato de que as ferramentas de corte de metal duro são utilizadas em condições muito rigorosas como elevadas tensões e temperaturas (pode ultrapassar 1000 °C), atrito e deformação plástica. Tais condições podem provocar fadiga mecânica e térmica, daí a necessidade de revestir a ferramenta (AGUIAR, 2012).

Os revestimentos tem se mostrado eficientes quanto ao desgaste da ferramenta, pois diminuem consideravelmente este processo. Os principais revestimentos utilizados em ferramentas de corte de metal duro são TiN , Ti(C,N) e Al₂O₃, que são materiais refratários que aumentam a vida útil da ferramenta (JIANG, 2006 apud AGUIAR, 2012).

3.3.2.1 Deposição Química a Vapor - CVD (Chemical Vapour Deposition)

De acordo com Bunshah (2001) apud Rosa (2013), este processo é utilizado para depositar substâncias com uma extensa diversidade de materiais, o que o faz ser um processo muito flexível. A sigla CVD vem do inglês Chemical Vapour Deposition, no português pode ser dita como Deposição Química a Vapor. É um método em que o material a ser depositado está na forma de vapor e assim ele é encaminhado para uma câmara na qual recebe calor para uma reação química acontecer, e assim ele é depositado na forma sólida no material a ser revestido. Este processo é chamado de CVD convencional, porém o material a ser depositado pode receber calor de outras maneiras como no processo CVD assistido por plasma ou no CVD induzido por laser.

Segundo Sandvik Coromant (2014), após a realização da deposição devem ser feitos tratamentos posteriores para aumentar a tenacidade da cobertura, além de possibilitar menores desgastes por abrasão. Essas coberturas podem ser de:

- **Ti(C,N):** as coberturas de carbonitreto de titânio proporcionam menor desgaste da ferramenta de corte, pois possuem características como elevadas dureza e resistência ao desgaste.
- **Al₂O₃:** as coberturas de óxido de alumínio proporcionam menores desgastes por craterizações e baixas deformações plásticas, além de possuírem características como inércia química e baixa condutividade térmica.
- **TiN:** as coberturas de nitreto de titânio proporcionam menores desgastes.

3.3.2.2 Deposição Física a Vapor - PVD (Physical Vapour Deposition)

Este processo de deposição resulta em camadas finas e também pode ser aplicado quando são necessárias várias camadas. A sigla PVD vem do inglês Physical Vapour Deposition, no português pode ser dita como Deposição Física a Vapor. É um método em que o material a ser depositado também está na forma de vapor e sai de um cátodo, passando por gases, vácuo ou

plasma até chegar à superfície do material a ser revestido, assim o vapor é condensado. Neste processo o cátodo pode ser sólido ou líquido (MATTOX, 1978 apud ROSA, 2013).

De acordo com Sandvik Coromant (2014), as coberturas no processo PVD podem ser de:

- **TiN:** a cobertura de nitreto de titânio foi a primeira utilizada neste processo de recobrimento. Ela possui características comuns a este processo de deposição, além de possuir uma cor dourada.
- **Ti(C,N):** as coberturas de carbonitreto de titânio proporcionam menores desgastes da ferramenta de corte, além de possuir elevada dureza.
- **Ti(N,Al):** as coberturas de nitreto de titânio-alumínio proporcionam menores desgastes da ferramenta, pois aliam características como elevadas dureza e resistência a oxidação.
- **Óxido:** as coberturas de óxido de alumínio possuem características como inércia química e alta resistência a craterização.

A Tabela 3 faz um comparativo entre os dois processos CVD e PVD.

Tabela 3 – Processos CVD e PVD.

	CVD	PVD
Temperatura de recobrimento (°C)	850-1100 500 (MO-CVD*)	Padrão<500
Mecanismo de aderência	Difusão	Ligação metálica de ataque iônico
Resistência de aderência	Excelente	Moderada
Estrutura de grão do recobrimento	Fina a grosseira	Fina
Efeito no substrato	Significativa nos metais	Geralmente não significativa
Tensão no recobrimento	Moderado	Alto
Arestas afiadas	Moderado	Bom
Espessura recobrimento (µm)	1-10 ou mais	1-4

* MO-CVD: metallo-organic CVD.

Fonte: PIERSON, 1999 apud ROSA, 2013.

3.4 Fresamento

A usinagem é o principal processo no mundo que transforma em cavaco cerca de 10% de toda a produção mundial de metais, além de ser muito popular e empregar milhares de

peças (TRENT, 1985 apud MACHADO et al., 2009). Hoje, o fresamento é difundido mundialmente muito por parte do surgimento de ferramentas com altas dureza e resistência ao desgaste, o que possibilitou a utilização do fresamento na usinagem de materiais endurecidos (GRZESIK, 2008).

De acordo com Machado et al. (2009), as operações de usinagem possuem duas finalidades diferentes: desbaste, em que o foco é a alta remoção de material, e o acabamento, em que a qualidade superficial é o mais importante. A profundidade de corte nas operações de desbaste é maior, já nas operações de acabamento as profundidades são menores e a velocidade de corte é maior, para garantir um bom acabamento da superfície.

A flexibilidade do fresamento se deve ao fato da possibilidade de usinar peças com geometrias e tamanhos variados, podendo ser complexas ou não, todas com alta qualidade superficial, isto tudo porque a fresadora possui vários eixos de movimentação (HELLENO e SCHÜTZER, 2003 apud GUENZA, 2008). Neste contexto é interessante definir alguns termos do processo, assim pode-se dizer que fresadora é a máquina que efetua o fresamento, fresa é a ferramenta de corte e suas arestas são denominadas dentes (GUENZA, 2008).

Segundo Guenza (2008), o corte no fresamento é interrompido, pois os dentes da fresa entram e deixam a peça a cada rotação, o que acarreta em elevadas temperaturas e forças de impacto.

De acordo com Machado et al. (2009), existem vários tipos de fresamento, entre eles estão:

- Fresamento tangencial (concordante ou discordante);
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis;
- Fresamento de topo;
- Fresamento frontal;
- Fresamento com fresa de topo esférica;
- Fresamento de cavidades.

A Figura 4 ilustra os processos de fresamento.

Figura 4 – Tipos de fresamento.

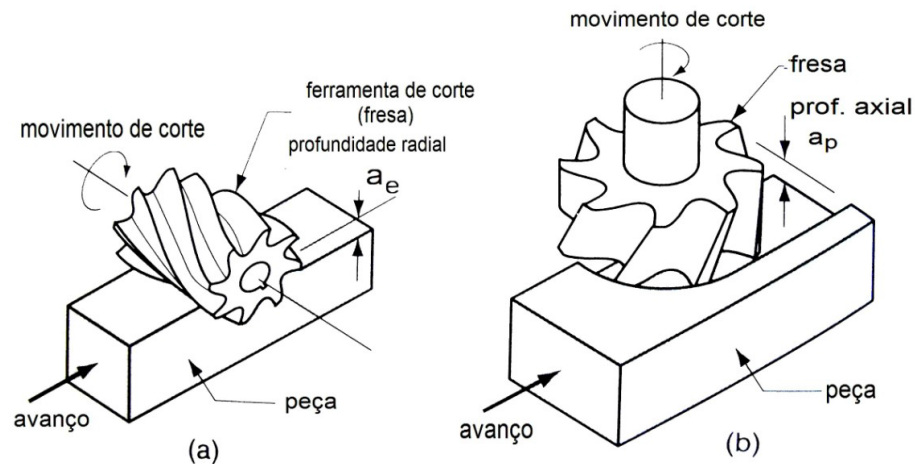


Fonte: MACHADO et al., 2009.

Os tipos de fresamentos mais usuais são os fresamentos tangencial e de faceamento. A Figura 5 exemplifica estes processos (GUENZA, 2008).

Segundo Guenza (2008), são várias as formas de classificação dos processos de fresamento, umas delas é classificar o fresamento de acordo com a direção do eixo da ferramenta e do movimento de avanço. Segundo esta classificação, o fresamento possui duas maneiras de ser: concordante e discordante.

Figura 5 – Fresamentos tangencial e de faceamento.



Fonte: GROOVER, 2002 apud GUENZA, 2008.

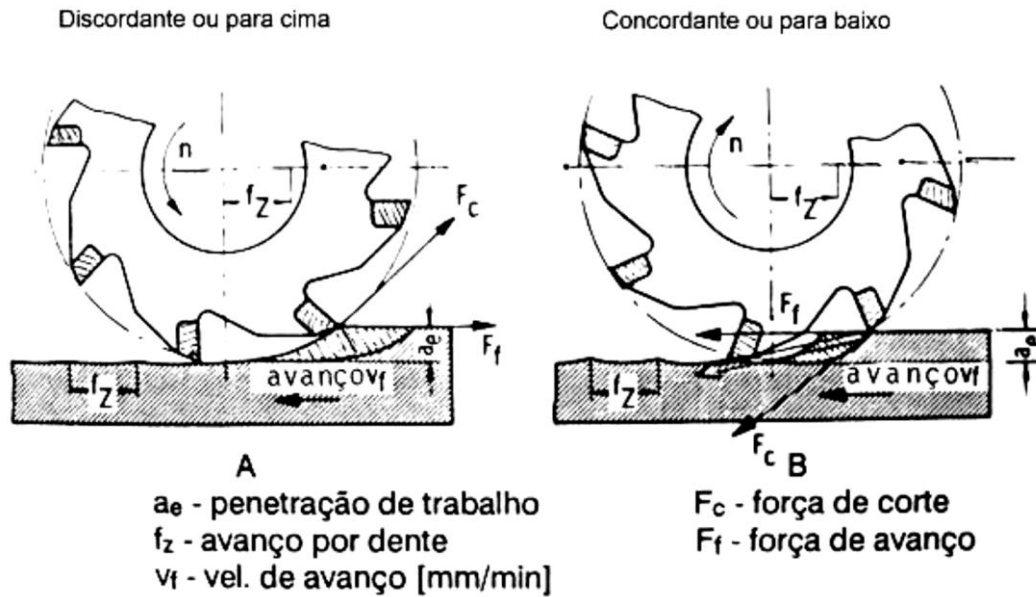
3.4.1 Fresamento concordante

Neste fresamento, os sentidos de corte e avanço são praticamente os mesmos e o resultado desta técnica é que a ferramenta possui componente de força no sentido do avanço, podendo causar solavancos e vibrações. Este tipo de avanço é recomendado para trabalho em máquinas que não possuem folga no movimento de avanço, mantendo um avanço uniforme durante o corte (STEMMER, 1995 e SANDVIK COROMANT, 2005 apud GUENZA, 2008).

3.4.2 Fresamento discordante

Neste fresamento, os sentidos de corte e avanço são contrários, assim a ferramenta de corte exerce força na peça no sentido de levantá-la, o que requer uma boa fixação da mesma. Este tipo de fresamento é indicado para situações em que a máquina apresenta folga no movimento de avanço. Esta folga não exerce influência neste tipo de fresamento (STEMMER, 1995 apud GUENZA, 2008). A Figura 6 exemplifica os fresamentos concordante e discordante.

Figura 6 – Fresamentos concordante e discordante.



Fonte: STEMMER, 1995 apud GUENZA, 2008.

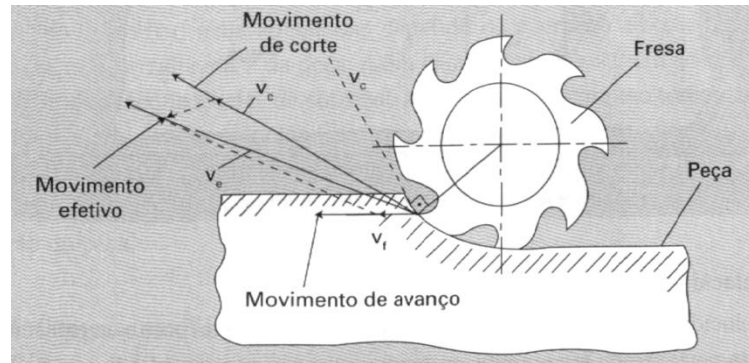
3.4.3 Movimentos no fresamento

De acordo com Machado et al. (2009), os movimentos no fresamento são:

- Movimento de corte: é definido como o movimento entre a peça e a ferramenta de corte em que o cavaco é retirado uma vez somente.
- Movimento de avanço: é definido como o movimento entre a peça e a ferramenta de corte, que junto com o movimento de corte, são responsáveis pela remoção contínua de material.
- Movimento efetivo: é a combinação dos movimentos de corte e avanço, aplicados ao mesmo tempo e que produz o processo de usinagem.

A Figura 7 apresenta ilustrações destes movimentos.

Figura 7 – Movimentos no fresamento.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

3.4.4 Velocidades no fresamento

De acordo com Machado et al. (2009), as velocidades no fresamento são:

- Velocidade de corte (v_c): velocidade instantânea em relação à direção e o sentido do corte. Esta velocidade pode ser calculada a partir da fórmula em que d é o diâmetro da ferramenta [mm] e n é o número de rotações por minuto [rpm] conforme Equação 1:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

- Velocidade de avanço (v_f): velocidade instantânea em relação à direção e sentido de avanço. Pode ser calculada pela Equação 2 em que f é o avanço [mm/rev] e n é o número de rotações por minuto [rpm]:

$$v_f = f \cdot n \quad (2)$$

- Velocidade efetiva de corte (v_e): velocidade instantânea em relação à direção e sentido efetivo de corte. Pode ser calculada vetorialmente de acordo com a Equação 3:

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f \quad (3)$$

3.4.5 Grandezas no fresamento

De acordo com Machado et al. (2009), as grandezas no fresamento são:

- Avanço (f): comprimento percorrido pela ferramenta de corte em cada volta completa [mm/rev].

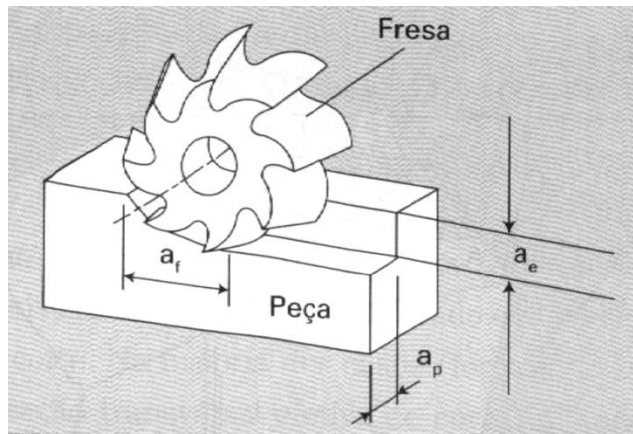
- Avanço por dente (f_z): utilizado para ferramentas como a fresa que possuem mais de um dente. É o comprimento percorrido por cada dente da ferramenta de corte na direção de seu avanço. É calculado a partir da Equação 4 em que z é o número de dentes [mm/rev]:

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (4)$$

- Profundidade ou largura de usinagem (a_p): é a profundidade ou a largura de penetração da fresa na peça. Esta grandeza é medida perpendicularmente ao plano de trabalho.
- Penetração de trabalho (a_e): é a quantidade de penetração da fresa na peça. Esta grandeza é medida no plano de trabalho, perpendicularmente à direção de avanço.
- Penetração de avanço (a_f): é a quantidade de penetração da fresa na peça. Esta grandeza é medida no plano de trabalho, na direção de avanço.

As três profundidades mencionadas estão esquematizadas na Figura 8.

Figura 8 - Profundidades no fresamento.



Fonte: MACHADO et al., 2009.

3.5 Usinagem com alta velocidade

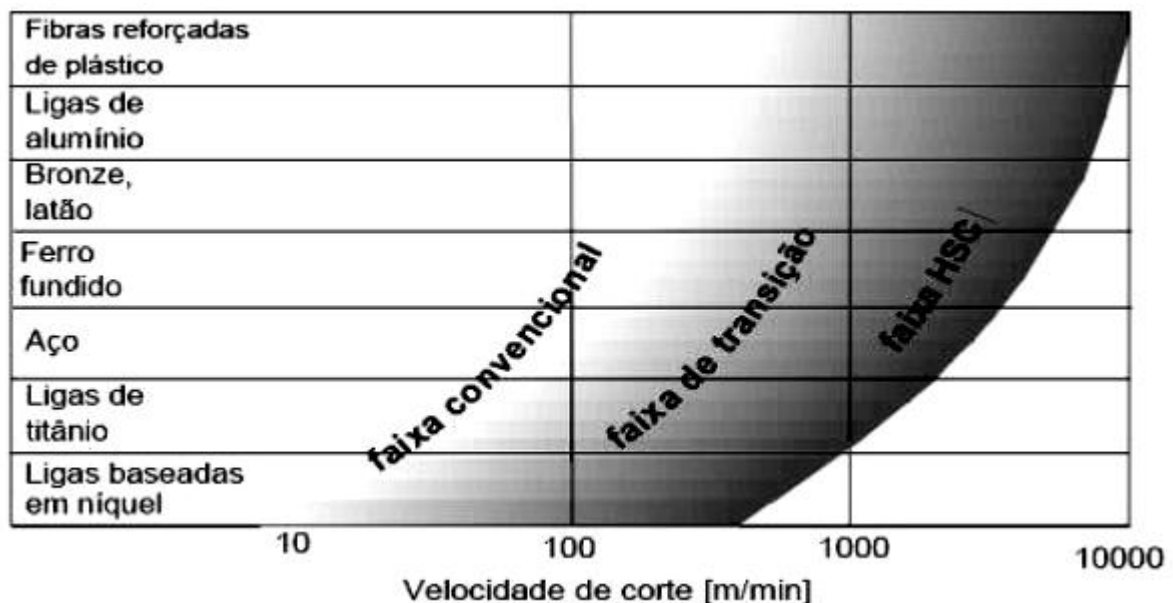
HSM significa High Speed Machining, que no português pode ser dito como Usinagem com Alta Velocidade, é também conhecido como HSC, que significa High Speed Cutting (alta velocidade de corte) (GUENZA, 2008). Os estudos relacionados a esta tecnologia foram iniciados por Carl J. Salomon nos anos de 1924 a 1931, que usou uma serra com grande diâmetro para realizar seus experimentos, pois ainda não existiam instrumentos que atingissem

a rotação nem a velocidade necessárias para realizar tais experiências. Após analisar os resultados obtidos, Salomon verificou que à medida que a velocidade de corte era aumentada, a temperatura e as forças de corte e de avanço diminuam. Mais tarde foi comprovado que Salomon não estava certo e que a temperatura da peça diminuía devido ao regime de transição entre tradicional e HSM (SCHÜTZER e SCHULZ, 1989 apud GUENZA, 2008).

Os primeiros indícios de aplicação da tecnologia HSM foram na indústria aeroespacial na usinagem de componentes de ligas de alumínio (SCHULZ, 1992 e DEWES, 1997 apud HIOKI, 2006). Também se tem informações de aplicação do processo HSM na indústria automotiva, porém o principal uso desta técnica é na fabricação de moldes e matrizes na produção de componentes (OLIVEIRA, 2003 apud HIOKI, 2006). A maior vantagem de sua utilização é poder substituir, parcial ou totalmente, a eletroerosão, além de proporcionar um melhor acabamento da superfície e necessitar de menos polimento posterior (HIOKI, 2006 e GUENZA, 2008).

As máquinas-ferramentas para usinagem HSM devem ser rígidas e devem possibilitar que ocorram grandes acelerações e desacelerações nos seus eixos. Elas devem também ser leves e amortecer vibrações (ALTAN, LILLY e YEN, 2001 apud OLIVEIRA, 2007). A Figura 9 ilustra as faixas de velocidades de corte para os regimes convencional e HSM para alguns materiais.

Figura 9 – Faixas de velocidade de transição entre corte convencional e HSC.



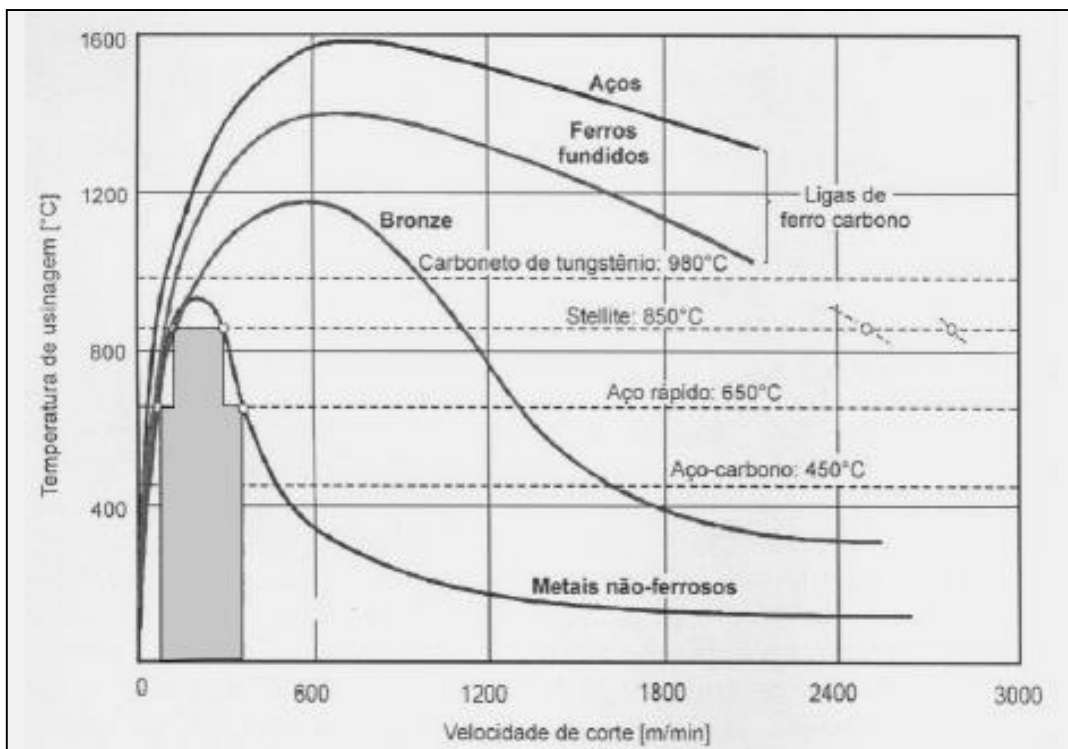
Fonte: SCHULZ, 1989 apud GUENZA, 2008.

3.5.1 Diminuição da temperatura na usinagem HSM

Apesar da temperatura se elevar quando a velocidade de corte é aumentada, a temperatura pode ser balanceada, pois no processo HSM ocorre a redução da seção de corte, o que diminui a temperatura possibilitando a utilização de ferramentas tradicionais com bom desempenho e a temperatura alcançada pode até ser menor do que na usinagem tradicional (DEWES & ASPINWALL, 1997; SANDVIK, 2002 apud HIOKI, 2006).

A Figura 10 mostra a redução de temperatura na aresta de corte para diversos materiais e velocidades de corte.

Figura 10 – Esquema de redução da temperatura na aresta de corte em relação à velocidade de corte.



Fonte: SCHULZ, 1999 apud HIOKI, 2006.

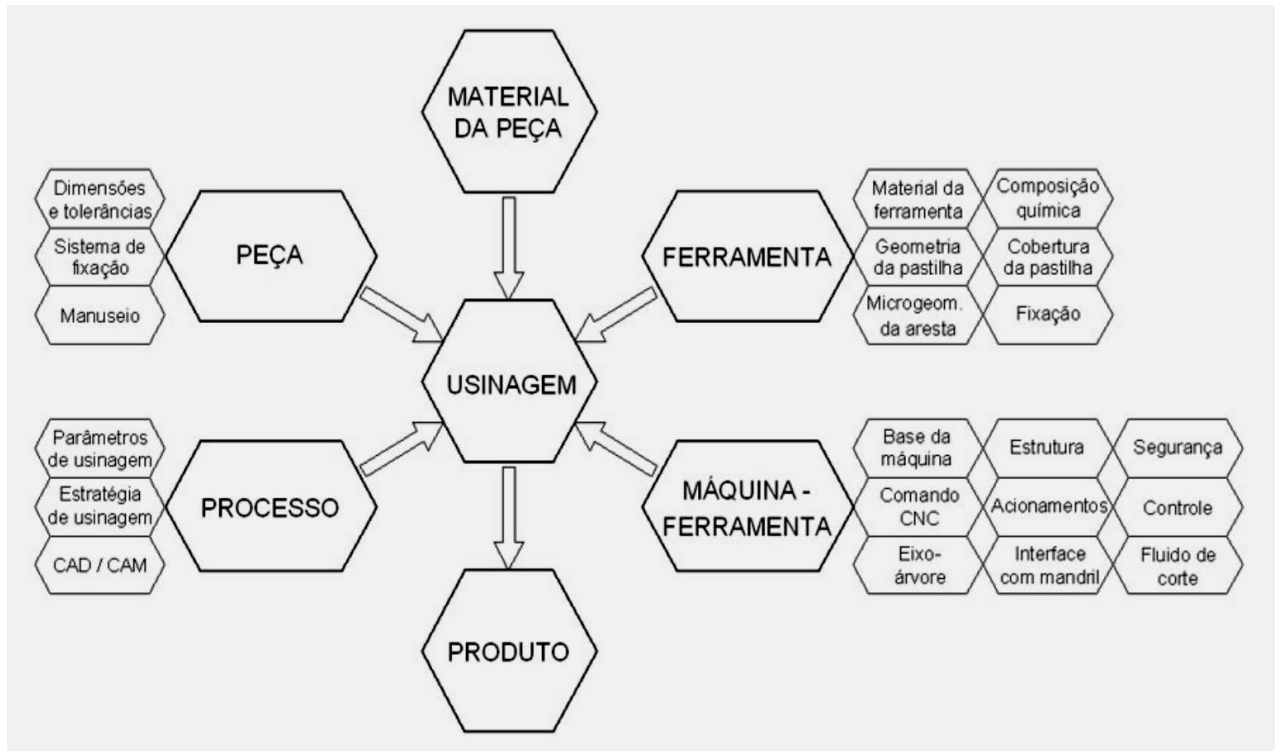
Quando a velocidade de corte é elevada, a quantidade de energia total também aumenta, o que faz elevar a temperatura do conjunto e pode acarretar em desgaste da ferramenta por mecanismos de difusão e oxidação, que são ativados pela temperatura (HIOKI, 2006).

3.5.2 Fatores que afetam a usinagem HSM

Quando se fala em usinagem HSM, deve-se saber a qual tipo de usinagem se refere, pois este processo envolve parâmetros como alta velocidade de corte, alto número de rotações no fuso e alta velocidade de avanço, neste caso considera-se HSM como um conjunto desses parâmetros.

A combinação dessas variáveis resulta num melhor desempenho do processo (SANDVIK, 1999 e SCHULZ, 1999 apud HIOKI, 2006). A Figura 11 ilustra estes parâmetros.

Figura 11 – Parâmetros que compõem o processo HSM.



Fonte: SCHULZ e MORIWAKI, 1992 apud OLIVEIRA, 2007.

No fresamento HSM é possível utilizar dois tipos de ferramentas de corte, as ferramentas sólidas e as pastilhas intercambiáveis. A utilização de cada uma deve ser determinada por fatores como vida útil da ferramenta, custo da ferramenta, tempo gasto para troca da ferramenta, tempo gasto para reafiação, etc (LACALLE et al., 2002 apud OLIVEIRA, 2007).

A tecnologia HSM pode ser aplicada para metais leves, não-ferrosos e plásticos. A ferramenta de corte é a base para se obter alto rendimento e boa qualidade utilizando a usinagem HSM. A vida útil da ferramenta de corte deve ser a maior possível, se isso não ocorrer representará aumento do custo do processo, por isso algumas variáveis são importantes para se obter bom rendimento como seleção do material da ferramenta, geometria da ferramenta, método de usinagem, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte (WILKINSON et al., 1997; SILVA et al., 2004).

3.5.3 Vantagens e desvantagens da usinagem HSM

Podem-se citar algumas vantagens da tecnologia HSM como alta taxa de remoção, melhor acabamento superficial, peça sem rebarba e melhor fluxo de cavaco (SANDVIK, 2000 apud HIOKI, 2006).

A tecnologia HSM permite uma redução de custos que pode chegar até 60%, pois se gasta menos tempo e menos trabalho para usinar (PASINI e ZEILMANN, 2004 apud HIOKI, 2006). Porém para este processo ser vantajoso, todos os seus elementos como máquina-ferramenta e quadro de pessoas devem estar de acordo com os requisitos necessários ao processo, como suportar o rigoroso ambiente de corte HSM e oferecer segurança ao processo (SILVA et al., 2004).

Já em relação às desvantagens, pode-se citar desgaste excessivo da ferramenta, alto custo da ferramenta de corte e necessidade de ter um sistema de fixação da ferramenta especial (HIOKI, 2006).

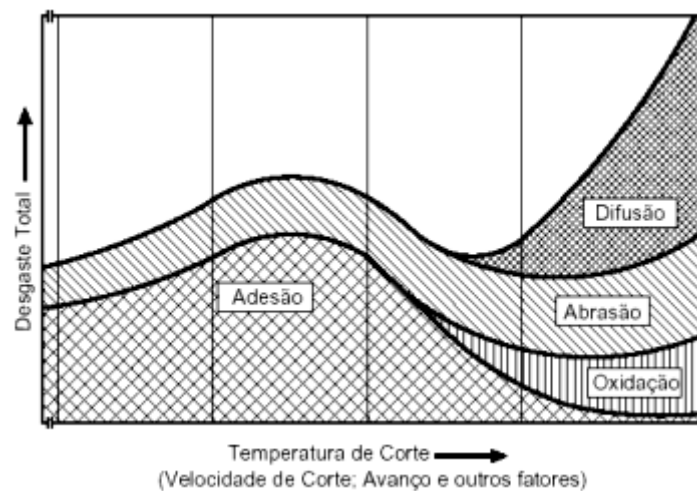
3.6 Mecanismos de desgaste

O desgaste da ferramenta de corte é um dos motivos da necessidade de sua troca ou reafiação. Este desgaste ocorre gradativamente e faz com que a ferramenta perca material e conseqüentemente tenha sua eficiência diminuída (SOUTO, 2007).

De acordo com Trent e Wright (2000) apud Souto (2007), os mecanismos de desgaste da ferramenta existentes são: cisalhamento plástico a altas temperaturas, deformação sob tensões de compressão, desgaste por difusão, desgaste por aderência e arrastamento, desgaste abrasivo e desgaste de entalhe. Um jeito para se aumentar a vida útil da ferramenta de corte é determinar o mecanismo de desgaste atuante nela e evitá-lo ou então interrompê-lo caso este já ocorra (AMORIM, 2002).

Os principais mecanismos de desgaste que atuam nas ferramentas de corte são a abrasão, difusão, adesão e oxidação, que são influenciados pela temperatura e velocidade de corte. A Figura 12 exemplifica este fato. Nela é possível perceber que em baixas temperaturas de corte só existem os mecanismos de adesão e abrasão e que em altas temperaturas, a adesão deixa de existir e surgem a difusão e oxidação, com predominância da difusão (ROHLOFF, 2012).

Figura 12 – Influência da temperatura e velocidade dos principais mecanismos de desgaste.

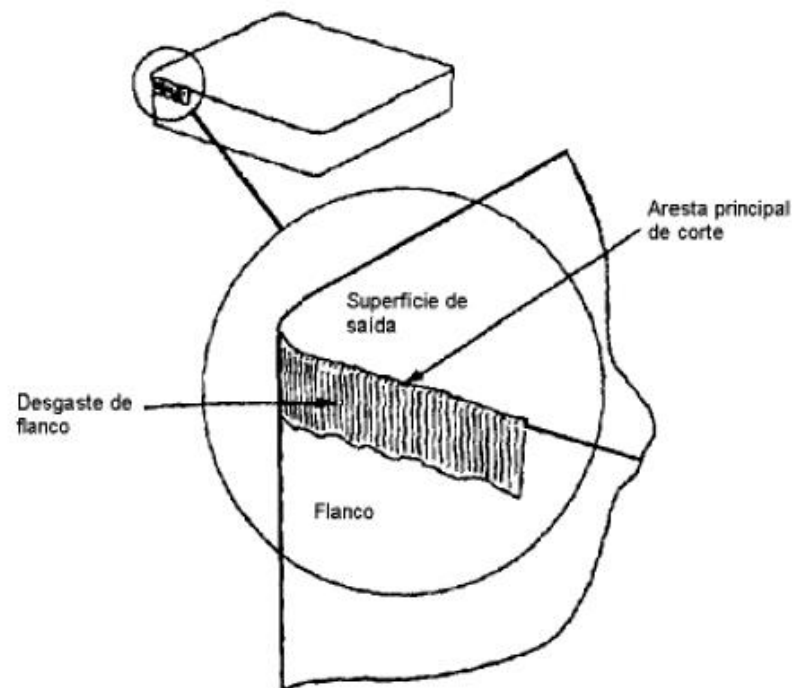


Fonte: KÖNIG e KLOCKE (1997) apud ROHLOFF (2012).

A abrasão é um dos mecanismos de desgaste mais frequente, em que partículas duras estão presentes entre as superfícies e devido a elevada temperatura a dureza da ferramenta é diminuída. É o principal causador do desgaste de flanco da ferramenta e para evitá-lo é necessária uma ferramenta com elevada dureza a quente. A adesão é um mecanismo em que ocorre a APC (aresta postiça de corte) devido a ação de forças elevadas ou pela interação do cavaco com a ferramenta. Desta forma, cada vez menos a ferramenta toca na peça para realizar o corte e adquire aparência áspera. A difusão ocorre quando os átomos de um material se transportam para outro material e essa transferência é acentuada com o aumento da temperatura, pela solubilidade de cada elemento no material e pelo tempo de contato entre o cavaco e a ferramenta. Por último, tem-se a oxidação, que nada mais é que a formação de óxidos na superfície da ferramenta de corte devido a alta temperatura aliada à presença de umidade no ambiente e a ferramenta sempre estará sujeita a este tipo de mecanismo de desgaste (ROHLOFF, 2012).

A ferramenta de corte possui algumas áreas em que o desgaste ocorre com mais frequência, são elas as superfícies de saída e de folga. Nelas podem ocorrer os desgastes de flanco, cratera e entalhe, sendo o primeiro o mais importante na determinação da utilidade da ferramenta (SOUTO, 2007). A Figura 13 exemplifica o desgaste de flanco da ferramenta de corte.

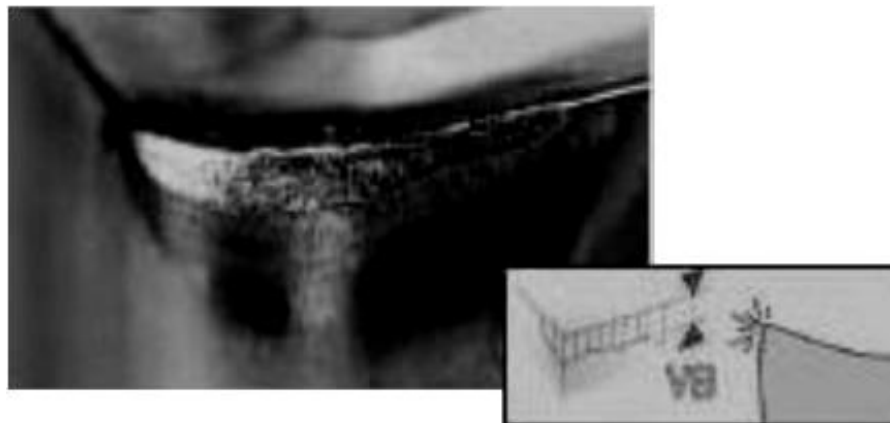
Figura 13 – Desgaste de flanco da ferramenta de corte.



Fonte: AMORIM, 2002.

O desgaste de flanco ocorre quando o ângulo de folga diminui, assim aumentando a área de contato entre as superfícies da ferramenta de corte e da peça, o que faz aumentar o atrito entre essas superfícies e acarretando em elevadas temperatura e tensão (SOUTO, 2007). A Figura 14 ilustra este desgaste.

Figura 14 – Desgaste de flanco.

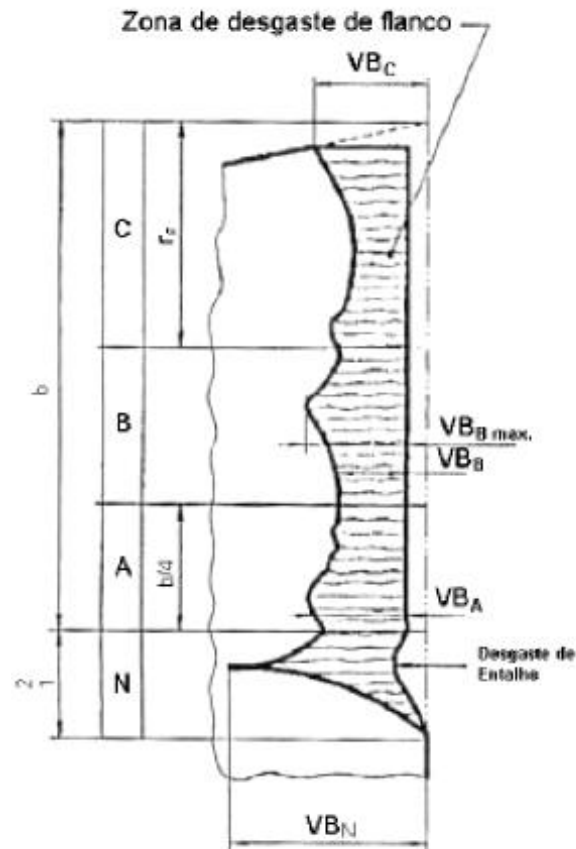


Fonte: SANDVIK COROMANT, 2014.

Alguns problemas causados pelo desgaste do flanco da ferramenta de corte são vibrações no momento do corte, peças com dimensões incorretas e a integridade superficial das peças pode ser comprometida (AMORIM, 2002).

Para saber se a ferramenta de corte ainda é utilizável, o desgaste de flanco médio (VB_B) deve ser no máximo de 0,3 mm e o desgaste de flanco máximo ($VB_{B\text{Máx}}$) deve ser de no máximo 0,6 mm. Quando algum desses critérios é atingido pela ferramenta de corte, deve-se reafiá-la ou substituí-la (ISO 3685, 1993). A Figura 15 esquematiza os desgastes de flanco médio e máximo.

Figura 15 – Desgastes de flanco médio e máximo.



Fonte: AMORIM, 2002.

Esta seção apresenta a metodologia, bem como todos os equipamentos e materiais necessários para realização da pesquisa. Os procedimentos foram realizados na empresa Nematik Alumínio do Brasil e no laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG.

4.1 Banco de ensaios

O banco de ensaios é composto pela fresadora da marca MIKRON, modelo HSM 700, representada na Figura 16, com mínimo de 100 rpm e máximo de 42.000 rpm, área de trabalho $X = 700$ mm, $Y = 550$ mm e $Z = 450$ mm e capacidade de carga da mesa de até 700 kg.

Figura 16 – Fresadora MIKRON HSM 700.



Fonte: Própria autora.

4.2 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados de aço AISI H13 temperado e revenido com dureza média de 46 HRc. Classificado como aço ferramenta, é empregado na fabricação de moldes para injeção de alumínio e matrizes para forjamento a quente, devido principalmente à sua boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. A Tabela 4 apresenta a composição química em percentual deste aço determinada pelo fabricante.

Tabela 4 – Composição química em percentual do aço AISI H13.

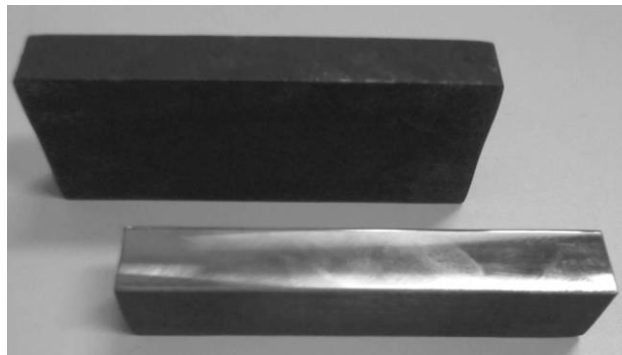
C	Si	Mn	Cr	Mo	V
---	----	----	----	----	---

0,40	1,00	0,35	5,20	1,50	0,90
------	------	------	------	------	------

Fonte: VILLARES METALS, 2012.

A Figura 17 apresenta duas amostras, uma antes e outra depois de ser fresada, dos corpos de prova utilizados nos testes com dimensões de 101,6 mm de comprimento, 18 mm de largura e 50,8 mm de altura.

Figura 17 - Corpos de prova antes e depois do fresamento.



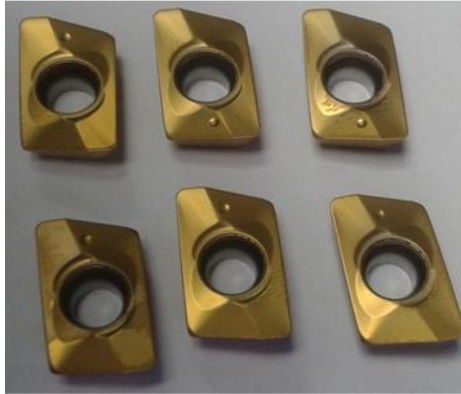
Fonte: Própria autora.

4.3 Ferramenta de corte

O tipo de ferramenta de corte utilizada foi uma fresa porta ferramenta com diâmetro de 20 mm que comporta dois insertos. Já os corpos de prova foram presos em uma morsa e foram usinados pelo fresamento frontal de acabamento na superfície de 18 mm com cortes concordante e discordante simultaneamente.

Nos experimentos foram utilizados insertos de metal duro classe F30M com elementos em sua composição química como W (tungstênio), Co (cobalto), Cr (cromo) e C (carbono) e em sua cobertura como Ti (titânio), Al (alumínio) e N (nitrogênio). O inserto possui dimensões de 0,8 mm de raio das arestas e 1° de ângulo de saída (Código ISO XOMX 120408TR-D14). A Figura 18 apresenta os insertos utilizados nos ensaios.

Figura 18 - Insertos utilizados nos ensaios.



Fonte: Própria autora.

4.4 Condições utilizadas nos ensaios

Foram utilizadas doze condições diferentes de usinagem nos ensaios, todas a seco, ou seja, sem a utilização de fluido de corte. Para cada uma foram testados três corpos de prova com numeração de 1 a 36. Os ensaios foram interrompidos quando a profundidade atingida pela ferramenta alcançasse 25 mm ou então quando o desgaste de flanco máximo da ferramenta de corte atingisse 0,6 mm. As condições de ensaio estão especificadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições de ensaio utilizadas.

Parâmetros	Velocidade de corte (m/min)	Avanço por aresta (mm)	Número de rotações por minuto (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Volume retirado da peça (mm ³)
Condição 1	150	0,05	2387	239	50800
Condição 2	150	0,1	2387	477	50800
Condição 3	150	0,2	2387	955	50800
Condição 4	300	0,05	4775	477	50800
Condição 5	300	0,1	4775	955	50800
Condição 6	300	0,2	4775	1910	50800
Condição 7	450	0,05	7162	716	50800
Condição 8	450	0,1	7162	1432	50800
Condição 9	450	0,2	7162	2865	20320
Condição 10	600	0,05	9549	955	32512
Condição 11	600	0,1	9549	1910	32512
Condição 12	600	0,2	9549	3820	2032

A Tabela 6 demonstra quais corpos de prova foram utilizados em quais condições de ensaio.

Tabela 6 - Amostras utilizadas em cada condição de ensaio.

Condições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amostras	1 a	4 a	7 a	10 a	13 a	16 a	19 a	22 a	25 a	28 a	31 a	34 a
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36

Os ensaios foram interrompidos em todas as condições citadas para medir o desgaste dos dois insertos utilizados e o volume de material retirado dos corpos de prova para determinada quantidade de passadas. A Tabela 7 especifica quando ocorreram as interrupções nos ensaios.

Tabela 7 - Interrupções ocorridas em cada condição de ensaio.

Condição	Períodos de interrupção (número de passadas)
1	20, 40, 60, 80 e 100
2	20, 40, 60, 80 e 100
3	20, 40, 60, 80 e 100
4	20, 40, 60, 80 e 100
5	20, 40, 60, 80 e 100
6	8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88, 96 e 100
7	20, 40, 60, 80 e 100
8	20, 40, 60, 80 e 100
9	10, 20, 30 e 40
10	8, 16, 24, 32, 40, 48, 56 e 64
11	16, 32, 48 e 64
12	4

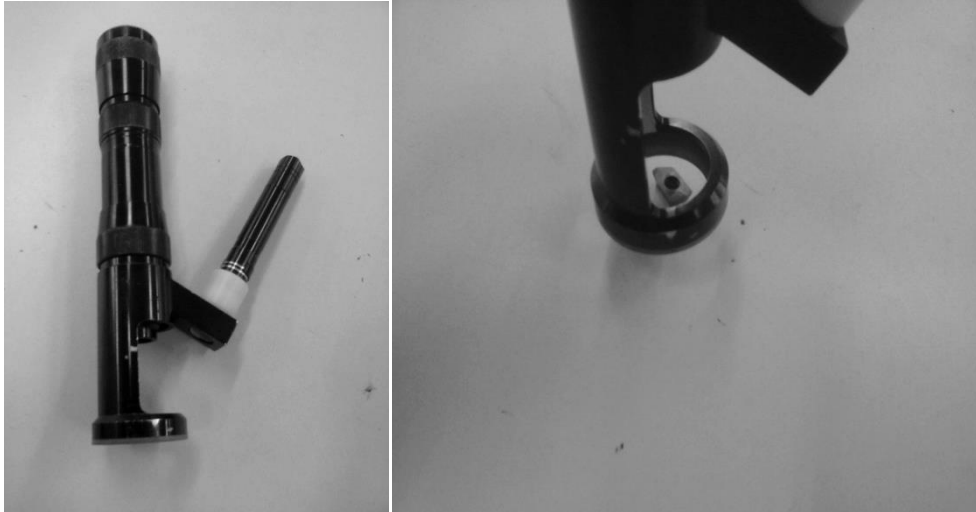
Todas as condições de corte testadas foram realizadas em triplicata, ou seja, três amostras foram fresadas em cada condição de corte e para cada amostra foram utilizados dois insertos novos, assim ao final de cada experimento eram obtidos seis insertos para serem analisados.

4.5 Caracterização dos mecanismos de desgaste

As amostras foram caracterizadas pelo método de medição do desgaste dos insertos com auxílio de uma lupa graduada e da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) sem nenhuma preparação prévia.

A medição do desgaste da ferramenta de corte foi realizada medindo-se o desgaste de flanco máximo ($VB_{BMáx}$) da ferramenta de corte com o auxílio de uma lupa graduada da marca Holtermann Comercial e Técnica Ltda., modelo LH-10, com um aumento de 20 vezes, resolução de 0,05 mm e número de série 282007, conforme Figura 19.

Figura 19 – Lupa graduada utilizada para medição do desgaste de flanco.



Fonte: Própria autora.

A medição do desgaste da ferramenta foi feita após cada ciclo de interrupção para os dois insertos testados da ferramenta e para os três corpos de prova em cada condição e assim foi realizada a média aritmética dos mesmos e obteve-se o resultado médio do desgaste de flanco do inserto.

Como padrão, o final da vida útil da ferramenta de corte foi estabelecido quando o desgaste de flanco máximo ($VB_{BMáx}$) atingir o valor de 0,6 mm, de acordo com a norma ISO 3685 (1993).

Os mecanismos de desgaste das ferramentas foram determinados por meio da análise do MEV feita no laboratório de caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais após o processo de fresamento. O objetivo da caracterização foi identificar os aspectos dos mecanismos de desgaste da ferramenta envolvidos durante o processo de fresamento.

O equipamento de MEV utilizado foi da marca Shimadzu, modelo SSX 550, Superscan com aumento de 80, 100 e 500 vezes. Foram analisados 12 insertos utilizados no fresamento. A Figura 20 ilustra o equipamento em questão.

Figura 20 – Microscópio Eletrônico de Varredura SHIMADZU SSX-550.



Fonte: Própria autora.

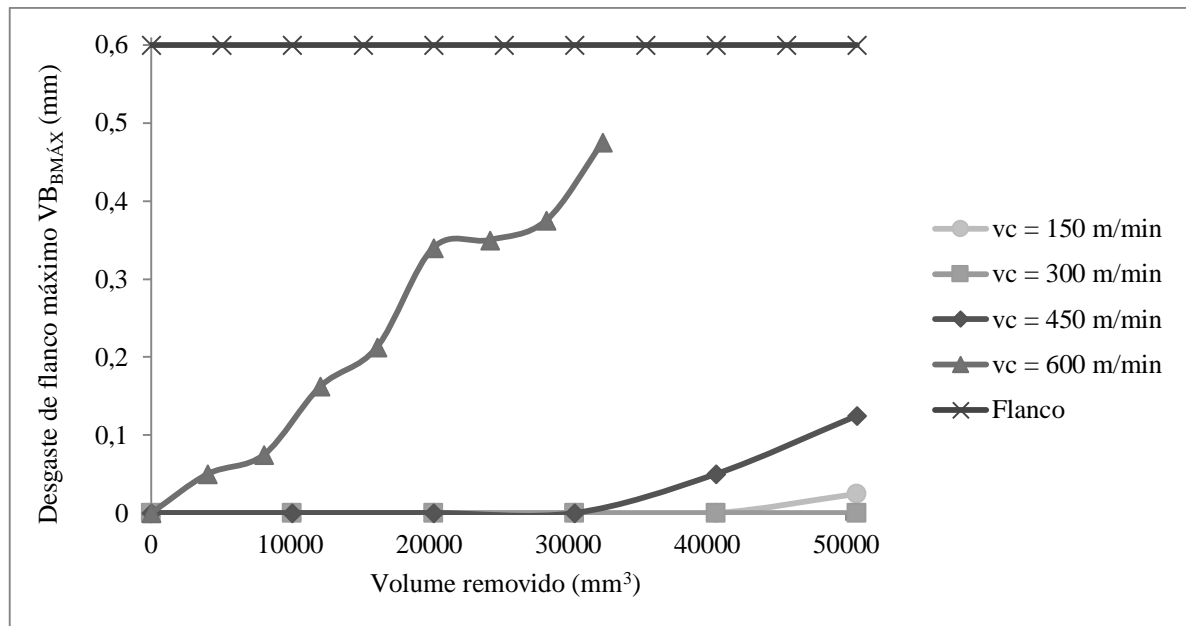
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados para todas as amostras analisadas.

5.1 Medição do desgaste da ferramenta

A média dos valores de desgaste da ferramenta avaliada pelo parâmetro $VB_{BMÁX}$ foram agrupados de acordo com a condição de usinagem nas Figuras 21 a 23.

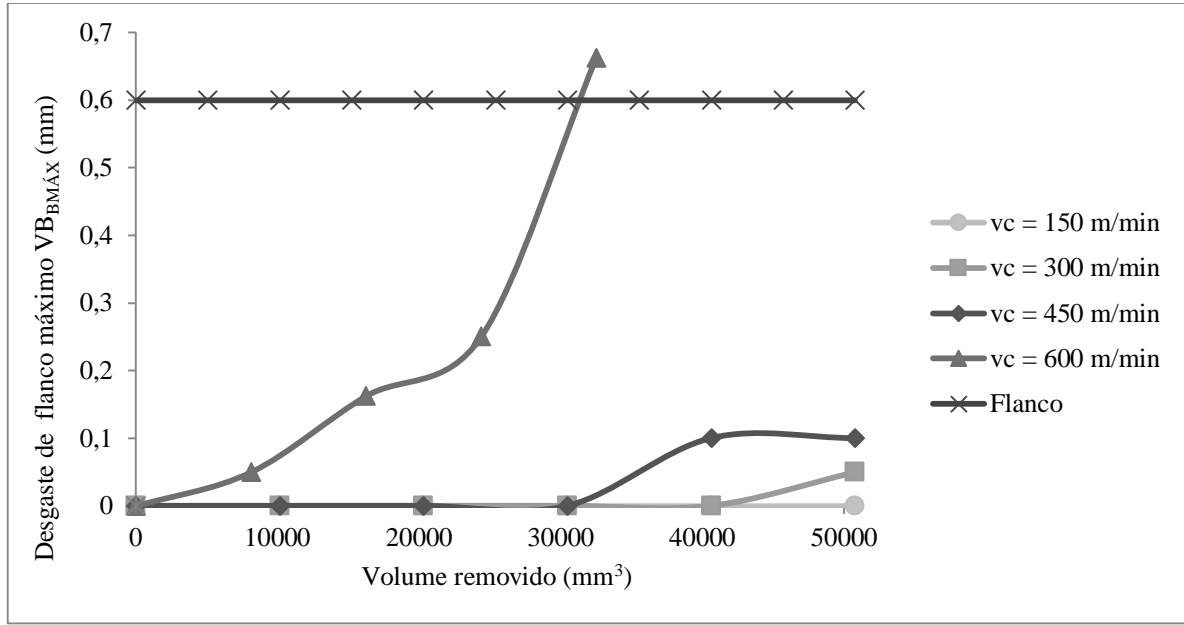
Figura 21 – Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,05$ mm.



Na Figura 21 foi possível observar que utilizando a velocidade de 600 m/min obteve-se um desgaste bem significativo em comparação às outras velocidades testadas. Por exemplo, quando o volume retirado foi de 20.320 mm³, o desgaste da ferramenta com vc de 600 m/min chegou a 0,34 mm enquanto que para as outras velocidades utilizadas o desgaste foi nulo. Em relação às velocidades de corte de 150 e 450 m/min percebe-se que o desgaste não foi tão acentuado quanto o obtido para vc de 600 m/min, sendo considerado o desgaste mediano. Pode-se afirmar também que o desgaste final obtido para vc de 450 m/min (0,13 mm) e o desgaste para vc de 150 m/min (0,03 mm) foi em torno de cinco vezes maior, assim não apresentando diferença significativa. Por último, tem-se que para vc de 300 m/min não houve nenhum desgaste após a retirada de 50.800 mm³ da peça. A ferramenta até este ponto não apresentou nenhum desgaste, porém se o fresamento continuasse certamente a mesma apresentaria algum desgaste.

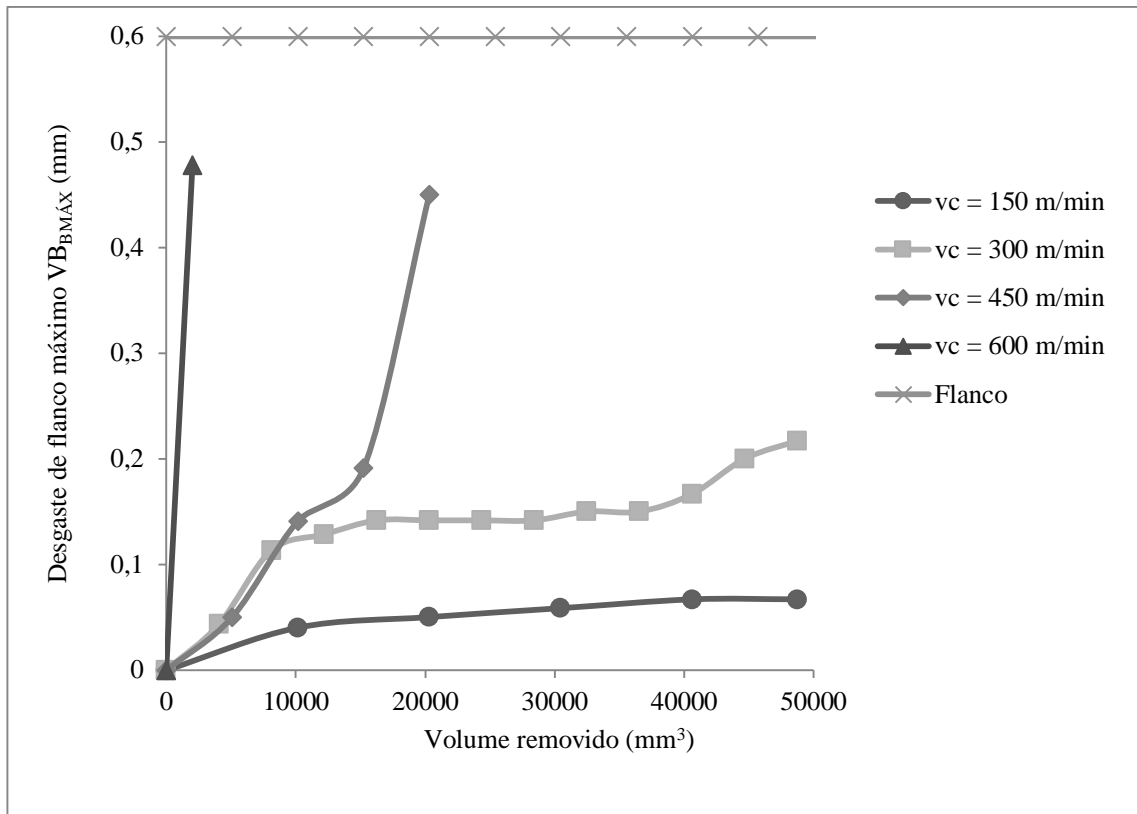
É possível afirmar que para um f_z de 0,05 mm a melhor velocidade de corte empregada visando o menor desgaste da ferramenta de corte é a velocidade de corte de transição de 300 m/min nas condições testadas.

Figura 22 – Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,10$ mm.



Em relação à Figura 22, pode-se observar que mais uma vez a vc de 600 m/min apresentou maior desgaste em relação às outras velocidades e chegou até a ultrapassar o limite de 0,6 mm de desgaste estabelecido. Um exemplo que pode ser citado é que para a vc de 600 m/min, mediuse o desgaste com 24.384 mm³ retirados da peça e o desgaste da ferramenta foi de 0,25 mm enquanto que para as outras velocidades analisadas o desgaste era nulo. Agora comparando-se as velocidades de 300 e 450 m/min percebe-se que não houve diferença significativa entre os desgastes finais apresentados, sendo para a vc de 300 m/min foi obtido um desgaste de 0,05 mm e para a vc de 450 m/min um desgaste de 0,10 mm, com volume retirado das peças de 50.800 mm³. Isto mostra que o desgaste final da ferramenta para a vc de 450 m/min foi o dobro que para a vc de 300 m/min. Por fim, tem-se desgaste nulo para a vc de 150 m/min. A velocidade de corte de transição de 150 m/min apresentou bom desempenho na usinagem do aço AISI H13 endurecido na condição de f_z de 0,10 mm.

Figura 23 – Desgaste das ferramentas de corte para $f_z = 0,20$ mm.



Pode-se observar na Figura 23 que o maior desgaste foi apresentado mais uma vez pela vc de 600 m/min, sendo que com apenas quatro passadas e volume retirado da peça de 2.032 mm^3 a ferramenta já apresentou desgaste de 0,48 mm impossibilitando a continuidade do teste. Para a vc de 450 m/min, o valor obtido do desgaste também foi alto e o teste teve de ser interrompido com 40 passadas e volume retirado da peça de 20.320 mm^3 , apresentando desgaste de 0,45 mm. Já para as velocidades de 150 e 300 m/min, o teste prosseguiu até o fim e o volume retirado da peça foi de 50.800 mm^3 , obtendo-se um desgaste de 0,07 mm para a vc de 150 m/min e um desgaste de 0,22 mm para a vc de 300 m/min, mostrando que a última apresentou um desgaste três vezes maior aproximadamente. Dessa maneira é possível concluir que as melhores velocidades empregadas para um f_z de 0,2 mm foram as velocidades de 150 e 300 m/min. Observa-se que a velocidade de corte e o avanço influenciam significativamente no desgaste da ferramenta.

5.2 Análise dos mecanismos de desgaste

As Figuras 24 a 35 apresentam os aspectos dos desgastes nos insertos com aumentos de 100 e 500 vezes. As micrografias foram realizadas somente nos insertos que apresentaram o maior desgaste dentre as seis ferramentas utilizadas em cada condição.

Figura 24 – Micrografias do inserto da peça 2 para a condição 1 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

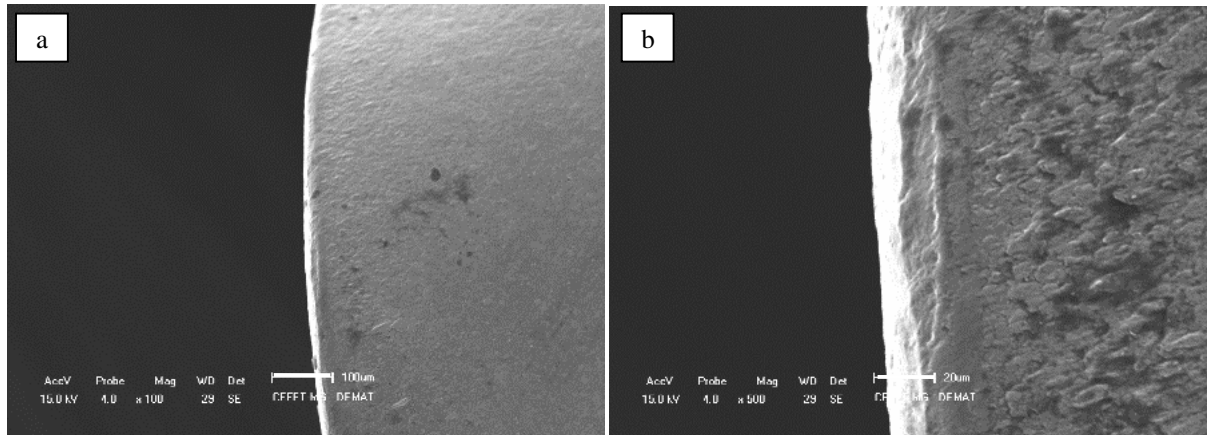


Figura 25 – Micrografias do inserto da peça 4 para a condição 2 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

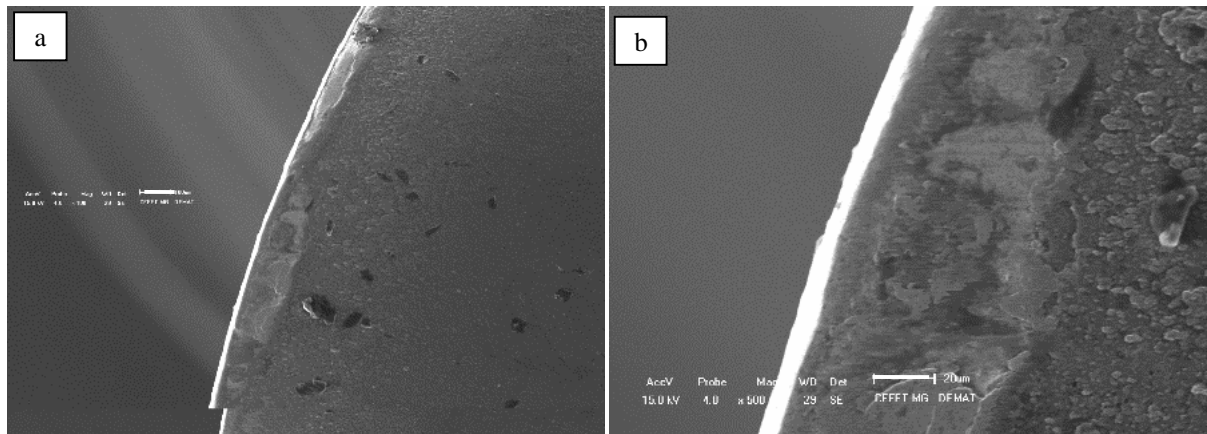


Figura 26 – Micrografias do inserto da peça 9 para a condição 3 ($v_c = 150$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

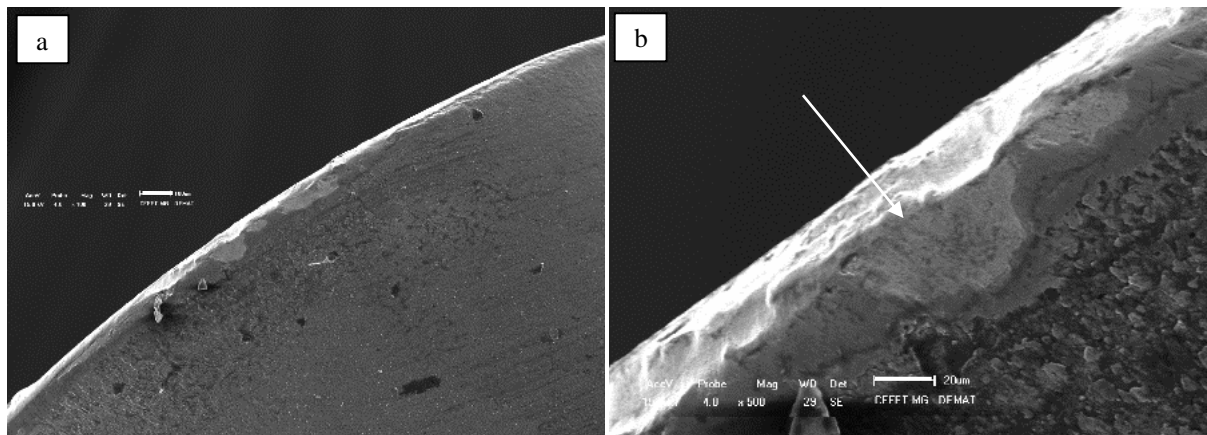


Figura 27 – Micrografias do inserto da peça 11 para a condição 4 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

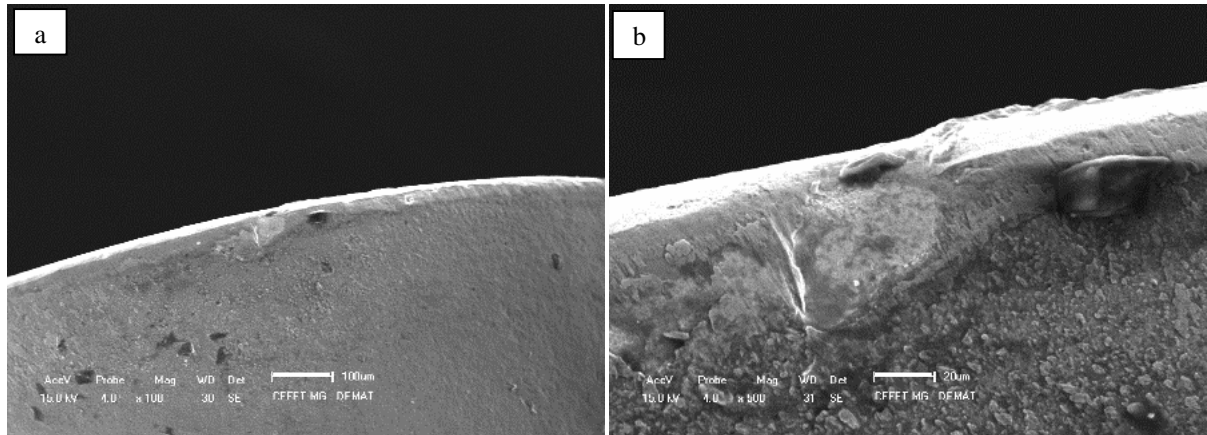


Figura 28 – Micrografias do inserto da peça 13 para a condição 5 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

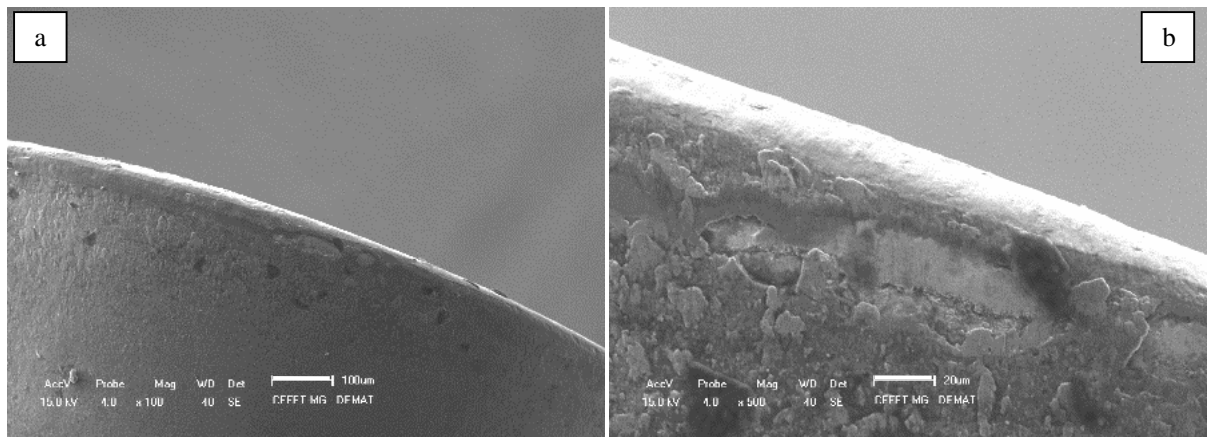


Figura 29 – Micrografias do inserto da peça 18 para a condição 6 ($v_c = 300$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

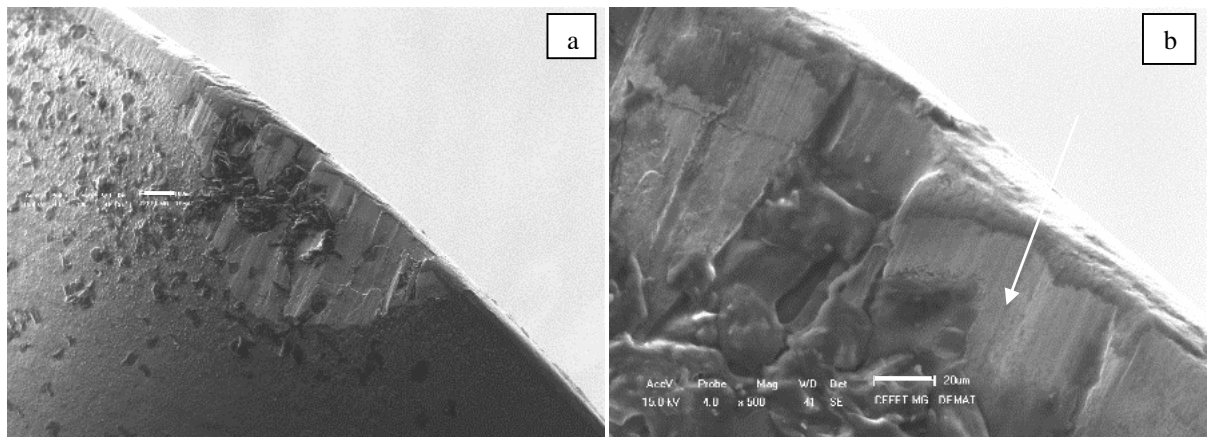


Figura 30 – Micrografias do inserto da peça 19 para a condição 7 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

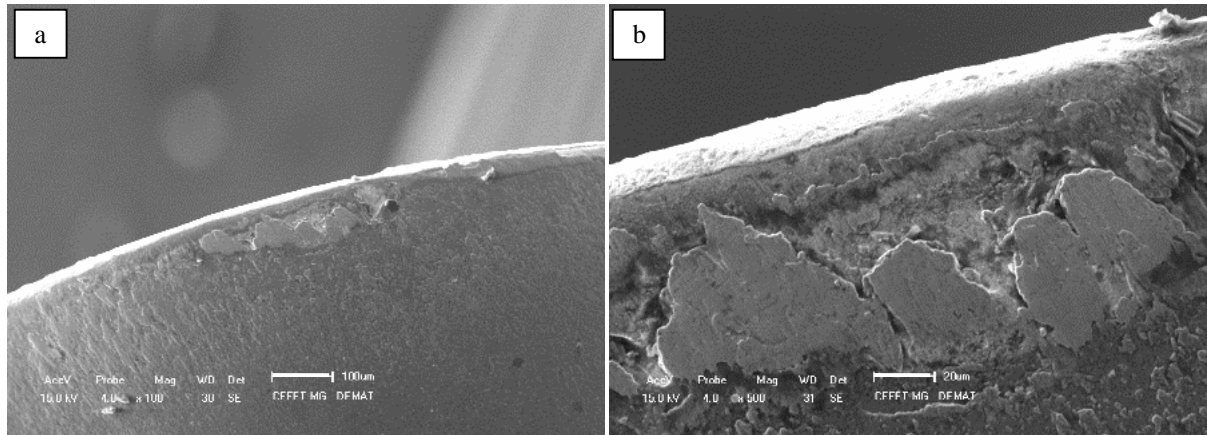


Figura 31 – Micrografias do inserto da peça 23 para a condição 8 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

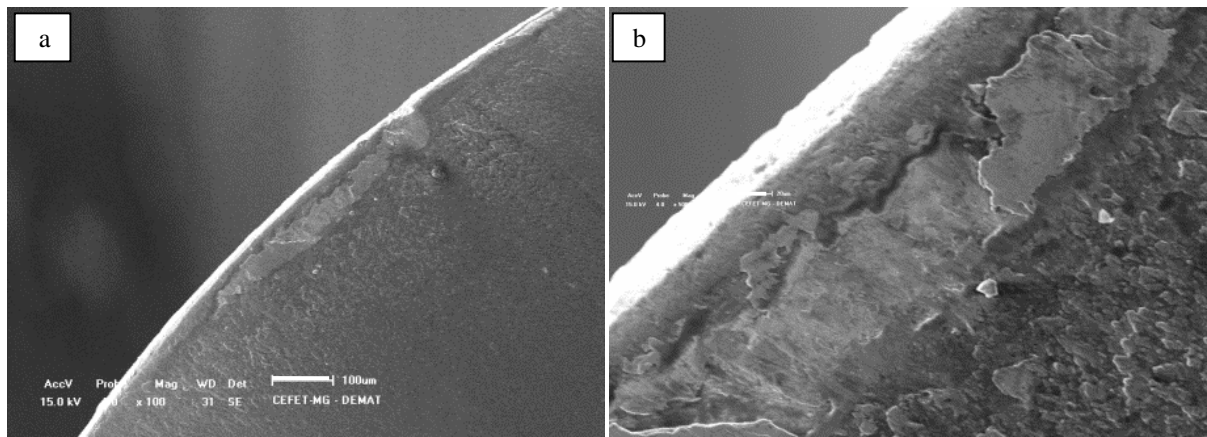


Figura 32 – Micrografias do inserto da peça 27 para a condição 9 ($v_c = 450$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

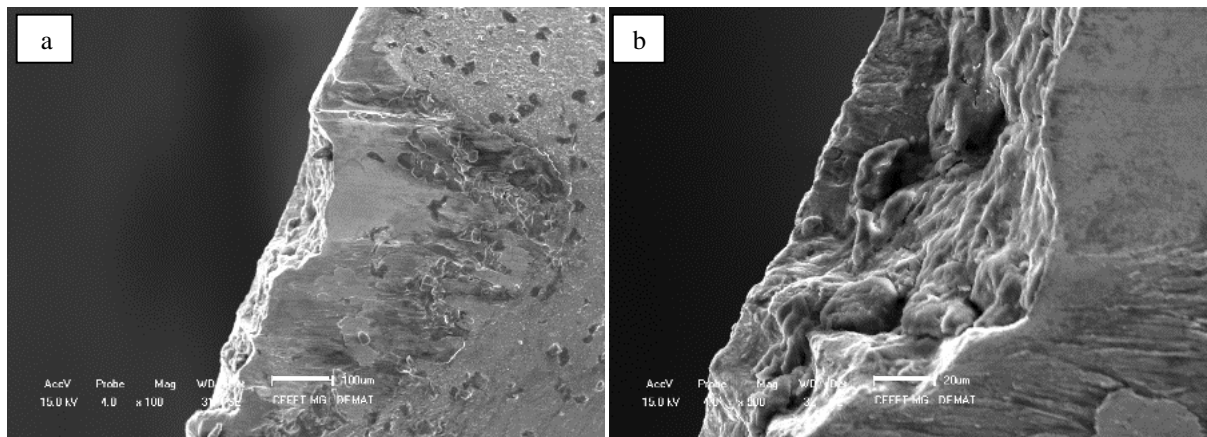


Figura 33 – Micrografias do inserto da peça 29 para a condição 10 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,05$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

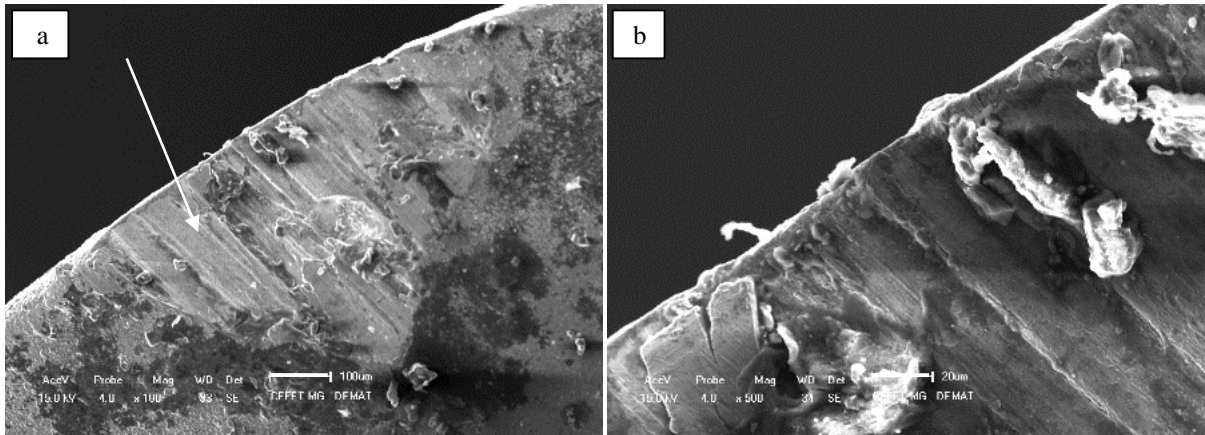


Figura 34 – Micrografias do inserto da peça 33 para a condição 11 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,1$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.

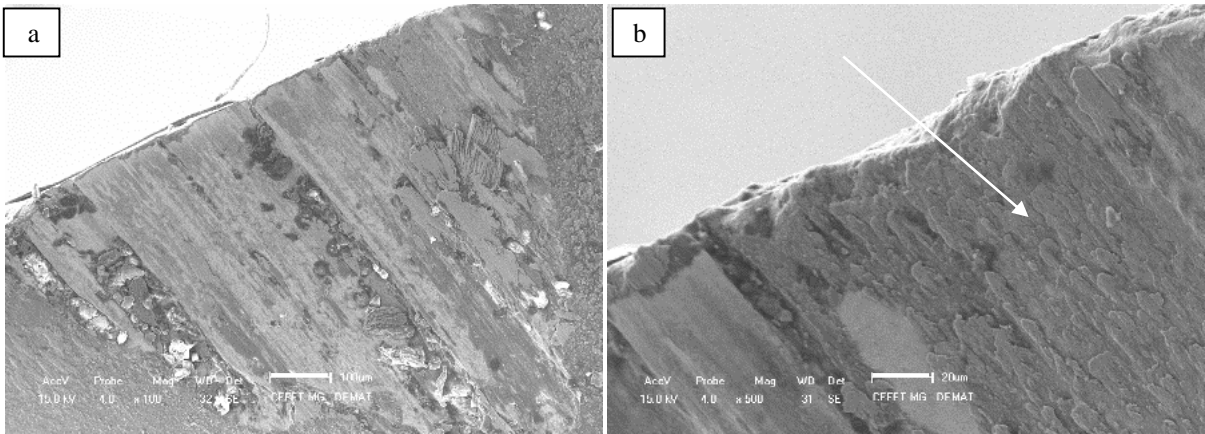
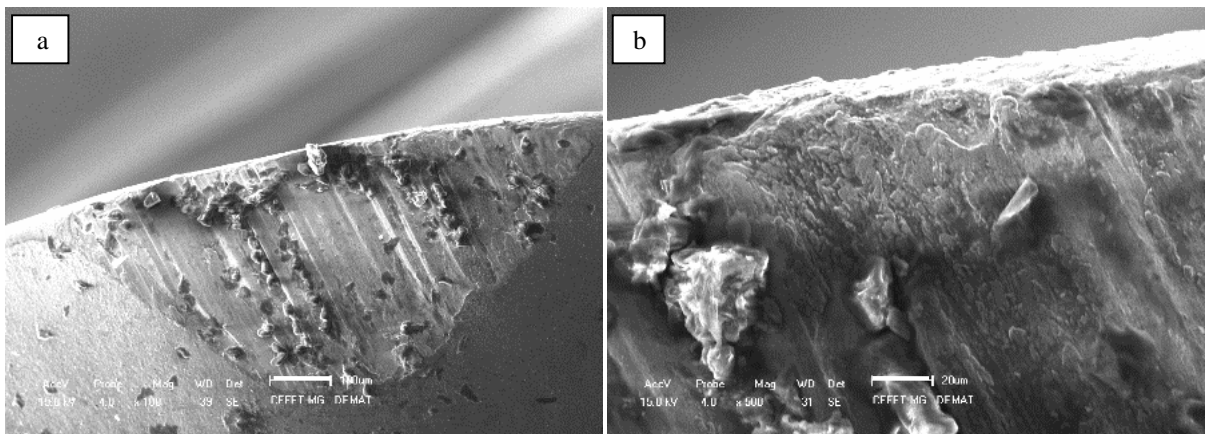


Figura 35 – Micrografias do inserto da peça 35 para a condição 12 ($v_c = 600$ m/min e $f_z = 0,2$ mm), a) aumento de 100x e b) aumento de 500x.



No geral, todas as ferramentas apresentaram bons resultados, pois apresentaram baixos valores de desgaste e algumas sequer apresentaram qualquer tipo de desgaste, uma explicação para este fato seriam as condições de ensaio utilizadas. É possível perceber que houve a combinação de vários mecanismos que atuaram juntos no inserto e não separadamente. Observou-se que não houve indícios de falha catastrófica nas ferramentas analisadas.

As ferramentas apresentaram o desgaste de flanco com o mecanismo atuante predominante sendo a abrasão. A abrasão é o mecanismo mais comum encontrado no desgaste de flanco das ferramentas e é um mecanismo que oferece certa estabilidade à peça permitindo previsibilidade em sua vida útil. Este mecanismo provém de partículas duras que se soltam da peça usinada e que ficam na interface ferramenta-peça ocasionando tanto o desgaste da ferramenta quanto o desgaste da peça.

As ferramentas que apresentaram este tipo de desgaste foram as amostras 2, 9, 13, 18, 19, 23, 29, 33 e 35. Nelas é possível perceber o clássico formato do desgaste por abrasão em que o ângulo de folga diminui assim a área de contato da ferramenta com a peça aumenta, o que faz aumentar o atrito e conseqüentemente o desgaste do inserto. Algumas imagens contem setas para facilitar a identificação da região onde ocorre este desgaste.

É possível dizer que outro mecanismo atuante nestas amostras é o desgaste de ruptura por choque mecânico em que este geralmente ocorre primeiro causando a quebra da ferramenta e na seqüência o desgaste por abrasão começa a atuar.

O desgaste por ruptura se inicia com pequenos lascamentos na ferramenta que se desenvolvem até que ocorra a falha da ferramenta. Este tipo de desgaste afeta negativamente o desempenho da ferramenta, pois com a ruptura a ferramenta perde a aresta de corte, o que exige maior pressão de corte, dificultando o mesmo e causando muitos problemas. Para amenizar este efeito deve-se reafiar a ferramenta.

Os insertos 4 e 11 não apresentaram desgaste aparente, assim não é possível identificar o mecanismo de desgaste atuante nos mesmos.

O inserto da peça 27 apresentou aparência diferente das outras ferramentas analisadas. Sua aparência leva a pensar que o mecanismo de desgaste predominante nesta condição foi a ruptura somente e que não foi seguido pelo desgaste de abrasão. Sua superfície apresenta picos e vales e leva a crer que a aresta cortante quebrou e se rompeu, assim parou de atuar na peça e somente

o outro inserto realizou o fresamento. A causa para isto ocorrer pode ser o choque mecânico do inserto com algum nitreto presente na amostra ou até mesmo choque com o cavaco.

6 CONCLUSÕES

Em relação às medidas de desgaste feitas com a lupa, pode-se dizer que as melhores condições testadas foram com velocidade de corte de 300 m/min e $f_z = 0,05$ mm e velocidade de corte de 150 m/min e $f_z = 0,1$ mm. A primeira condição respectivamente contraria as expectativas, pois esperava-se que a menor velocidade de corte apresentaria o menor desgaste e na realidade a segunda menor velocidade apresentou tal resultado.

Já em relação ao avanço por dente, os menores avanços apresentaram desgaste nulo em dois dos testes realizados, como era de se esperar, pois quanto menos agressiva é a condição menos se exige da ferramenta e assim seus danos conseqüentemente são menores.

A velocidade de corte de 600 m/min e $f_z = 0,1$ mm chegou a ultrapassar o limite de desgaste estabelecido de 0,6 mm com volume removido da peça de 32.512 mm^3 . A velocidade de corte de 600 m/min e $f_z = 0,2$ mm pode ser testada com apenas 2.032 mm^3 removidos da peça e o desgaste apresentado já ficou próximo do limite (0,48 mm). A velocidade de 600 m/min e $f_z = 0,05$ apresentou desgaste de 0,48 mm com 32.512 mm^3 removidos da peça e o ensaio foi interrompido. Desta maneira, pode-se dizer que estas foram as condições mais agressivas para a ferramenta de corte.

Em relação às imagens do MEV realizadas nos insertos os resultados mostraram que praticamente todos os insertos analisados apresentaram o mecanismo de desgaste por abrasão como resultado.

Somente o inserto da condição 9 apresentou aparência diferente e ao que tudo indica o mecanismo de desgaste atuante foi a ruptura, porém sem ser seguido de abrasão. A presença de picos e vales em sua superfície comprovam este fato e indica que houve fratura do inserto.

Os insertos das condições 2 e 4 que na medição não apresentaram desgaste, quando analisadas no MEV este fato se concretizou e as mesmas não apresentaram desgaste aparente, sendo que o pouco desgaste apresentado é mínimo e dificilmente pode ser medido, assim sendo considerado nulo. Por estes fatos pode-se dizer que as duas condições testadas são as mais indicadas para fresamento de alta velocidade de corte do aço ferramenta H13 utilizando insertos de metal duro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, H. C. G. **Contribuição ao estudo do torneamento do aço inoxidável superduplex empregando ferramentas de metal duro com revestimentos.** 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000876063>>. Acesso em: 3 ago. 2014.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3791?locale=pt_BR>. Acesso em: 02 ago. 2014.
- BASSO, R. L. O. **Efeito do carbono no processo de nitrocarburização com plasma pulsado da liga metálica AISI H13.** 2007. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Departamento de Instituto de Física "Gleb Wataghin", Unicamp, Campinas, 2007. Disponível em: <<http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/apresentacao.php?filename=IF151>>. Acesso em: 2 jul. 2014.
- DEWES, R.C.; ASPINWALL, D. K. **A review of ultra high speed milling of hardened steels.** *Journal of Materials Processing Technology*.1997; 69: 1-17.
- ERDEL, B. P. **Characteristics of High-speed Machining.** In: _____. *High-speed machining*. Estados Unidos: SME, 1997. p. 21-24.
- FERREIRA, G. E. F. **Avaliação da resistência à fadiga térmica do aço AISI H13 nitretado pelos processos gasoso e por plasma.**2001. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/80332>>. Acesso em: 7 jul. 2014.
- GABARDO, J. F. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13.** 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_100_Joao_fredolim_gabardo.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2014.
- GRZESIK, W. **Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools.** *Wear*. 2008; 265 :327-335.
- GUENZA, J. E. **Análise do desempenho do fresamento em altas velocidades de corte do ferro fundido GG25 em aplicação industrial.** 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <<http://www.ppgem.ct.utfpr.edu.br/dissertacoes/GUENZA,JorgeEduardo.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2014.
- HIOKI, D. **Influência dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o desempenho tribológico do aço AISI H13 endurecido.** 2006. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, 2006. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-12032007-005828/pt-br.php>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

ISO 3685. *Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools*, 1993.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. 371 p.

MESQUITA, R. A.; LEIVA, D. R.; BARBOSA, C. A. **Efeito das condições de tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas de aços ferramenta**. Sumaré:

Villares Metals, 2013. 15 p. Disponível em:

<<https://www.yumpu.com/pt/document/view/14327955/efeito-das-condicoes-de-tratamento-termico-villares-metals>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

OLIVEIRA, A. J. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com alta velocidade de aços endurecidos**. 2007. 205 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica,

Unicamp, Campinas, 2007. Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000415721>>. Acesso em: 02 ago. 2014.

PAULA, L. J.; LEITE, M. V.; SINATORA, A. **Influência do tempo e temperatura de nitretação a plasma na microestrutura do aço ferramenta ABNT H13**. In: IX

ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO LFS, 9., 2008, São Paulo. Artigo científico. São Paulo: IX Encontro de Iniciação Científica do Lfs, 2008. v. 1, p. 52 - 61.

Disponível em: <http://www.lfs.usp.br/IC/IC2008/artigos/ic2008_art_de_paula.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2014.

PEREIRA, E. C. **Tratamento superficial por refusão a laser em aços AISI H13 e AISI 420**. 2006. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Materiais, Unicamp, Campinas, 2006. Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000381716>>. Acesso em: 22 jul. 2014.

ROHLOFF, R. C. **Efeito dos parâmetros de corte no fresamento do aço inoxidável AISI 420 para moldes e matrizes**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Tupy - Ist, Joinville, 2012. Disponível em:

<www.sociesc.org.br/download/?tipo=anx&count=1&id=13704>. Acesso em: 4 jul. 2014.

ROSA, S. N. **Avaliação da superfície modificada de brocas de metal duro revestidas pelo processo de deposição física de vapor**. 2013. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 2013. Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000909470>>. Acesso em: 18 jun. 2014.

SANDVIK COROMANT (São Paulo). Disponível em:

<<http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx?country=br>>. Acesso em: 02 jul. 2014.

SILVA, L. R. et al. **Desgaste de ferramentas no torneamento com alta velocidade de corte da superliga “waspaloy”**. Ouro Preto: Rem - Revista Escola de Minas, v. 1, abr. jun. 2004. Trimestral. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672004000200007>. Acesso em: 10 ago. 2014.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. 2007. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27>>. Acesso em: 12 jul. 2014.

VILLARES METALS (São Paulo). **AÇOS PARA TRABALHO A QUENTE**. Sumaré: Villares Metals, 2006. 2 slides, color. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_12_VH13ISO.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2014.

VILLARES METALS (Sumaré). **Aços para ferramentas**. Sumaré, 2012. 12 slides, color. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/Cat_Acos_Fer.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2014.

VILLARES METALS (Sumaré). **VIM, ESR e VAR**. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/988_PTB_HTML.htm>. Acesso em: 07 jul. 2014.

WILKINSON, P.; REUBEN, R. L.; JONES, J. D. C.; BARTON, J. S.; HAND, D. P.; ROLAN, T.A., Surface Finish Parameters as Diagnostics of Tool Wear in Face Milling. *Wear*, v. 205, n.1-2, 1997, p. 47-54.