

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

P P G E M

**ESTUDO DA NITRETAÇÃO A PLASMA APLICADA EM
FERRAMENTAS PARA FRESAMENTO**

CARLOS ALBERTO FADUL CORRÊA ALVES

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia

P O R T O A L E G R E

2 0 0 2

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ESTUDO DA NITRETAÇÃO A PLASMA APLICADA EM
FERRAMENTAS PARA FRESAMENTO

Carlos Alberto Fadul Corrêa Alves

Engenheiro de Produção

Trabalho realizado no Laboratório de Metalurgia Física do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS e no Laboratório de Mecânica de Precisão – da UFSC.

Área de Concentração: Ciência dos Materiais

Porto Alegre, Novembro de 2002

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Ciência dos Materiais, e foi aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

Prof. Dr. Augusto Oscar Kunrath Neto
ORIENTADOR

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Prof. Dr. Vilson João Batista

Dr. Mario Wolfart Jr

Prof. Dr. Jair Koppe
COORDENADOR do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Expresso sinceros agradecimentos para:

- Meus Pais, pelo apoio, carinho e orações durante toda a minha jornada;
- À minha Esposa pelo companheirismo e incentivo nos momentos difíceis;
- O Professor Dr. Eng. Augusto Kunrath pela excelente orientação, pelas importantes contribuições ao trabalho e pelo companheirismo.
- O Professor Dr. Eng. Telmo Roberto Strohaecker, pelo convite para ingressar no mestrado, pela atenção e recursos despendidos;
- O Professor Dr. Eng. Rolf Bertran Schroeter pelas contribuições e recursos disponibilizados quanto ao processo de usinagem;
- O Professor Dr. Eng. Cleiton Rodrigues Teixeira pelo acompanhamento e orientações quanto ao uso de fluídos de corte;
- À toda Equipe do Laboratório de Metalurgia Física – LAMEF/UFRGS e a do Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP/UFSC, pelo acompanhamento técnico e recursos despendidos durante o tratamento superficial (LAMEF) e os ensaios de usinagem (LMP).

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
SUMÁRIO	V
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 FRESAMENTO	4
<i>2.1.1 Métodos de Fresamento</i>	<i>6</i>
<i>2.1.2 Fresas</i>	<i>8</i>
2.2 AÇOS RÁPIDOS	12
<i>2.2.1 Histórico</i>	<i>12</i>
<i>2.2.2 Classificação dos Aços Rápidos</i>	<i>13</i>
<i>2.2.3 Propriedades dos Aços Rápidos</i>	<i>15</i>
2.3 DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE	17

2.3.1 Tipos de Desgaste	17
2.3.2 Mecanismos de Desgaste	18
2.4 FLUÍDOS DE CORTE.....	20
2.4.1 Função dos Flúidos de Corte.....	21
2.4.2 Tipos de Flúidos de Corte.....	22
2.4.3 Usinagem a Seco.....	23
2.4.4 Usinagem com Minimização de Flúido de Corte	25
2.5 NITRETAÇÃO.....	26
2.5.1. Nitretação Gasosa	26
2.5.2. Nitretação Líquida ou em Banhos de Sais.....	27
2.5.3. Nitretação a Plasma	27
2.5.3.1 Descarga Elétrica Incandescente	29
2.5.3.2. Mecanismo de Formação da Camada Nitretada	32
2.5.3.3. Microestrutura da Camada Nitretada.....	37
2.5.4. Nitretação de Aços Rápidos.....	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	41
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	42
3.1.1 Fresas.....	42
3.1.2 Material Usinado.....	44
3.2- NITRETAÇÃO A PLASMA	45
3.3- ENSAIO DE USINAGEM	48
3.3.1- Medição de Força.....	49
3.3.2- Medição do Desgaste	51
3.3.3- Flúido de Corte.....	55
3.3.4- Procedimento Adotado no ensaio de Usinagem.....	56
3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO E DE MICRODUREZA.....	60

4 RESULTADOS	61
4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL.....	61
4.2 ENSAIO DE USINAGEM	62
<i>4.2.1 Resultados do Ensaio de Usinagem na Face.....</i>	<i>63</i>
<i>4.2.2 Resultados do Ensaio de Usinagem no Flanco</i>	<i>66</i>
4.3 MEDIÇÕES DE FORÇA	69
4.4 ANÁLISE METALGRÁFICA	73
4.5 ENSAIO DE DUREZA	74
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
5.1 ENSAIO DE USINAGEM.....	75
5.2 MEDIÇÕES DE FORÇA.....	76
6 CONCLUSÕES.....	78
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	80
8 BIBLIOGRAFIA.....	81

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência do tratamento superficial, através da técnica de nitretação a plasma, no processo de fresamento com fresas de aço rápido AISI M2. Foram investigados os efeitos deste tratamento superficial no processo de corte, variando-se a forma de refrigeração/lubrificação das fresas com fluido de corte convencional (emulsão) em abundância, com minimização e sem fluido (lubrificação a seco).

Na nitretação, a composição da mistura de gases utilizada nos experimentos foi de 5% N₂ e 95% H₂ em volume, a uma pressão de tratamento de 5 mbar (3,8 Torr). A temperatura utilizada foi de 440°C, durante um tempo de tratamento de 30 minutos, resultando em uma camada nitretada com uma zona de difusão com aproximadamente 8µm de profundidade.

As ferramentas empregadas no processo de fresamento foram investigadas através de medição de forças de usinagem, medições de desgaste na superfície de incidência (flanco) e na superfície de saída (face), sendo as camadas nitretadas caracterizadas por metalografia óptica e microdureza. Foi observado um desempenho superior das fresas nitretadas apenas para as condições de corte a seco.

ABSTRACT

In this work the influence of plasma nitriding on the milling process by milling cutters of high speed steel AISI M2 was studied. The effects of the surface treatment were investigated in the cutting process under different cooling/lubricating conditions: flooding with emulsion, misting (Minimum Quantity of Fluid) and without cutting fluids (dry cutting).

In the plasma nitriding process, the gas mixture composition used contained 5% N₂ and 95% H₂ in volume, with a treatment pressure of 5 mbar (3,8 torr). The treatment temperature was of 440°C, for a time of treatment of 30 minutes, resulting in a nitrided layer with a diffusion zone with approximately 8µm of depth.

The tools were submitted to milling tests and their performance was evaluated through the measurement of the machining forces and wear measurement at the clearance and face surfaces. The nitrided layers were characterized by optical metallography and microhardness tests. The performance of the nitrided tools was improved only for the dry cutting conditions.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição e Características dos Aços Rápidos	14
Tabela 02– Tratamento e Forma de Lubrificação Empregada	41
Tabela 03 - Ensaio Realizados	42
Tabela 04 - Valores Encontrados:	43
Tabela 05 - Geometria das Fresas de Topo, Tipo N, segundo DIN 844A.....	43
Tabela 06 – Composição Química do Material Usinado.....	44
Tabela 07 – Valores Encontrados nas Medições Dimensionais	61
Tabela 08 - Resultados do Ensaio de Usinagem.....	62
Tabela 09 - Resultados das Medições de Forças	69
Tabela 10 – Valores de Microdureza para as Fresas Analisadas.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Processos de Fresamento.....	5
Figura 02 – Máquinas Ferramenta.....	6
Figura 03 - Métodos de Fresamento	7
Figura 04 - Elementos Dimensionais e Ângulos Principais	10
Figura 05 – Implicações da usinagem a seco	24
Figura 06 - Reator de Nitretação a Plasma	28
Figura 07 – Tipos de Descarga Elétrica.....	30
Figura 08 - Colisões e Seus Produtos	33
Figura 09 - Pulverização (Sputtering)	34
Figura 10 - Formação e Cinética de Crescimento da Camada Nitretada.....	36
Figura 11 – Fotografia Digital da Fresa Original do Fabricante sem Tratamento e da Fresa Nitretada a Plasma	42

Figura 12 – Corpos de Prova de Usinagem	45
Figura 13 - Equipamento de Nitretação Plasma Utilizado	45
Figura 14- Foto do Equipamento Aberto	47
Figura 15- Sistema de Medição de Forças.....	49
Figura 16- Corpo de Prova Utilizado Para a Medição de Força.....	50
Figura 17- Sentidos das Forças de Usinagem no Sistema de Medição	50
Figura 18 – Marca do Desgaste no Flanco	52
Figura 19 – Marca do Desgaste na Face	52
Figura 20 - Sistema de Aquisição de Imagens.....	53
Figura 21 - Regiões de Medição do Desgaste	54
Figura 22 - Sistema de Minimização	55
Figura 23 – Ensaio de Usinagem.....	58
Figura 24 - “VB _{máx} ”	58
Figura 25 – “KB _{máx} ”	59
Figura 26 – Variação do Desgaste da Face - Seco	64
Figura 27 – Variação do Desgaste da Face - Emulsão	64

Figura 28 – Variação do Desgaste da Face - Minimizado.....	64
Figura 29 –Fresas Sem Tratamento – Face.....	65
Figura 30 –Fresas Tratadas – Face	65
Figura 31 – Variação do Desgaste do Flanco – Seco	67
Figura 32 –Variação do Desgaste do Flanco - Emulsão.....	67
Figura 33 –Variação do Desgaste do Flanco- Minimizado	67
Figura 34 –Fresas Sem Tratamento – Flanco	68
Figura 35 –Fresas Tratadas – Flanco.....	68
Figura 36 – Variação da Força Resultante - Seco	71
Figura 37 – Variação da Força Resultante - Emulsão	71
Figura 38 – Variação da Força Resultante - Minimizado.....	71
Figura 39 – Variação da Força Resultante - Fresas Sem tratamento.....	72
Figura 40 – Variação da Força Resultante - Fresas Tratadas	72
Figura 41– Micrografia Obtida Junto à Superfície da Fresa Nitretada a Plasma.	73
Figura 42 – Micrografia Obtida na Superfície do Dente da Fresa Nitretada a Plasma.	73

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de aumentar os níveis de produção dos atuais processos de fabricação e da redução de seus custos produtivos motivam o desenvolvimento de diversos trabalhos nas diferentes áreas de conhecimento. Neste contexto, o aumento da vida das ferramentas de corte e o desenvolvimento de ferramentas cada vez mais resistentes, proporcionam aos processos de usinagem um significativo ganho tecnológico.

Para diversas ferramentas de usinagem tais como: brocas, machos, alargadores, brochas, cortadores de dentes de engrenagem e alguns tipos de fresas, a aplicação de materiais mais resistentes ao desgaste que o aço rápido, como o metal duro ou material cerâmico, é muito restrita, devido à forma e dimensões destas ferramentas e às condições das operações de usinagem que as empregam^{1}. Neste sentido, o desenvolvimento destas ferramentas tem caminhado na melhoria das condições do próprio aço rápido, através de tratamentos de endurecimento superficial como a nitretação a plasma, visando entre outros, produzir superfícies com alta dureza e conseqüentemente melhor resistência ao desgaste.

A nitretação a plasma é um tratamento termo-físico-químico de endurecimento superficial no qual, através da ação de um ambiente nitrogenoso, o nitrogênio atômico é introduzido na superfície de substratos ferrosos (geralmente) a uma temperatura adequada para difusão. O nitrogênio adsorvido reage com o ferro e os elementos de liga da peça

formando nitretos de alta dureza e alta resistência ao desgaste. A fonte de nitrogênio para o processo é obtida usando-se um plasma.

Aliado a estes constantes avanços tecnológicos conseguidos nos materiais de ferramentas, o uso otimizado e racional de fluídos de corte, específicos a cada operação de usinagem, apresenta também resultados econômicos significativos, além de ir ao encontro da crescente preocupação com o meio ambiente e legislações trabalhistas mais rigorosas, tornando-se assim, fundamental aos processos de fabricação.

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência de um tratamento superficial, através da técnica de nitretação a plasma, no processo de fresamento com fresas de aço rápido AISI M2. Foram investigados os efeitos deste tratamento superficial no processo de corte, variando-se a forma de refrigeração/lubrificação das fresas com fluído de corte convencional (emulsão), com minimização e sem fluído (lubrificação a seco).

Após serem submetidas ao desgaste pelo processo de fresamento, as ferramentas foram investigadas através de medição de forças de usinagem, medições do desgaste na superfície de incidência (flanco) e na superfície de saída (face), sendo as camadas nitretadas caracterizadas por metalografia óptica e microdureza.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS e no Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC, onde foram desenvolvidos o tratamento superficial e a usinagem das amostras, respectivamente.

O capítulo 2 – Revisão Bibliográfica, apresenta um levantamento resumido sobre os aspectos relevantes relacionados com o objetivo deste trabalho. No item inicial, 2.1, aborda o processo de fresamento, seus métodos e tipos de fresas. O item 2.2- aços rápidos,

aborda desde seu histórico, classificação até suas propriedades. No item seqüente, 2.3, trata do desgaste em ferramentas de corte, seus tipos e mecanismos de formação. O fluido de Corte é abordado no item 2.4, onde são relatados suas principais funções e tipos utilizados. Com maior destaque o item 2.5, trata do tratamento superficial de Nitretação, mais especificamente a Nitretação a Plasma. Neste item, o objetivo foi descrever o processo de tratamento, seus princípios, vantagens, variantes e equipamentos necessários.

O capítulo 3, trata dos materiais e métodos experimentais utilizados, desde os corpos de prova, preparação das amostras, equipamentos utilizados no tratamento superficial, ensaios e medições, até as condições de lubrificação. No capítulo 4 são relatados os resultados obtidos na forma de tabelas e gráficos e estes são discutidos e relevados no capítulo 5. Finalmente o capítulo 6 apresenta as principais conclusões resultantes desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FRESAMENTO

Fresamento é um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante, isto é, com múltiplos dentes de corte.

Convencionalmente, a peça efetua o movimento de avanço, de baixa velocidade (na faixa de 10 a 500 mm/min), enquanto a fresa tem velocidade de corte relativamente alta (da ordem de 10 a 150 m/min para ferramentas de aço rápido), mantendo o eixo de giro numa posição fixa. De modo geral, tanto a peça como a ferramenta podem assumir movimentos relativos, independentes ou combinados, permitindo a geração de diversos tipos de superfícies.

As vantagens do processo residem na variedade de formas que podem ser produzidas, na qualidade dos acabamentos superficiais, nas altas taxas de remoção de cavaco (alta produtividade) e na disponibilidade de ampla variedade de geometrias e tamanho de ferramentas, que podem ser construídas ou associadas para produzir superfícies bastante complexas^{2}.

O processo de fresamento é subdividido, conforme a norma DIN 8589, em função da superfície gerada, da forma da ferramenta (perfil) e da cinemática de corte, em:

fresamento plano, fresamento circular, fresamento de forma e fresamento de geração, conforme figura 1 a seguir.

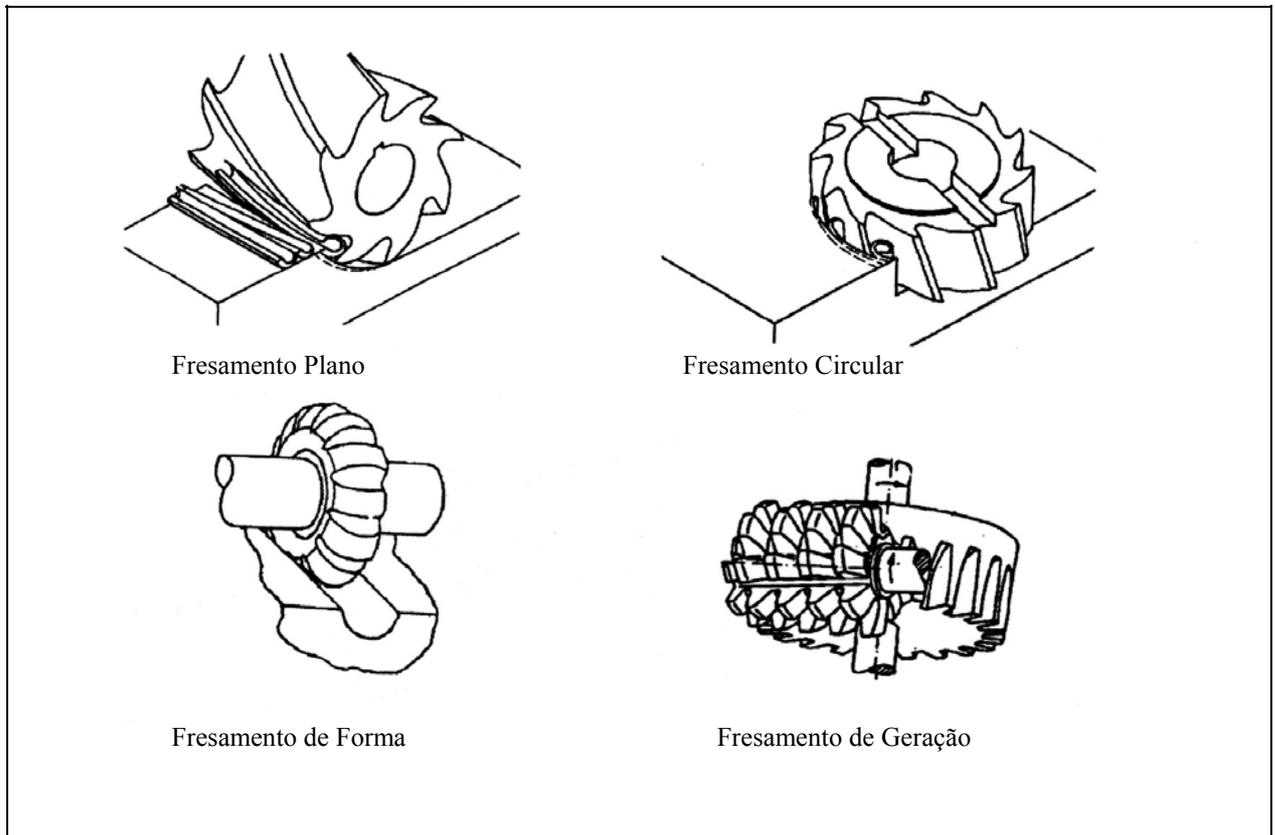


FIGURA 01 – PROCESSOS DE FRESAMENTO^{2}

No processo de fresamento são utilizadas máquinas-ferramenta, denominadas de fresadoras (figura 02), construídas especialmente para assegurar os movimentos relativos da peça e da ferramenta.

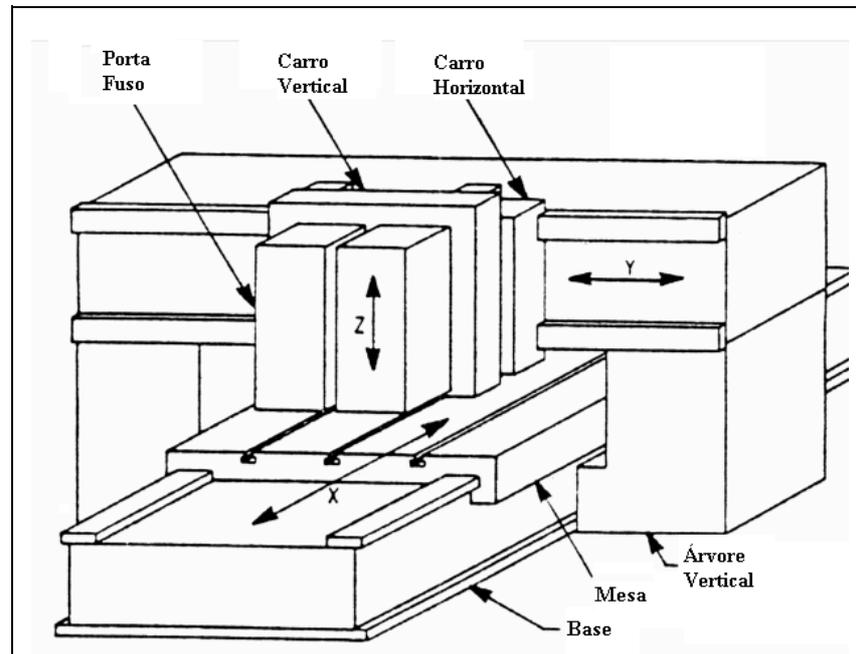


FIGURA 02 – MÁQUINAS FERRAMENTA^{3}

2.1.1 MÉTODOS DE FRESAMENTO

De acordo com as direções de corte e de avanço, distinguem-se o fresamento em concordante e discordante.

No fresamento concordante os movimentos de corte da ferramenta e de avanço da peça têm o mesmo sentido, iniciando-se o corte com a espessura máxima do cavaco. Neste método a força de usinagem é direcionada para a peça, forçando-a contra a mesa.

No fresamento discordante os movimentos de corte e de avanço têm sentidos opostos, iniciando-se o corte com a espessura mínima do cavaco. Neste método, a força de usinagem tende a levantar a peça, fazendo com que as peças finas percam seu apoio na mesa ou vibrem. No caso do eixo da fresa interceptar o material da peça, tem-se

simultaneamente, fresamento concordante e discordante, ou seja fresamento combinado. A figura 03 representa estes métodos.

O fresamento concordante tem como vantagens uma vida mais longa da ferramenta, melhor acabamento superficial, menor força e potência para o avanço e caminho mais curto do gume, durante o corte. Já o fresamento discordante tem como vantagens tirar folgas de sistemas de avanço menos rígidos e penetração do gume abaixo de superfícies indesejáveis, tais como: superfícies de peças com resíduos de areia, escamas e irregularidades grandes^{2}.

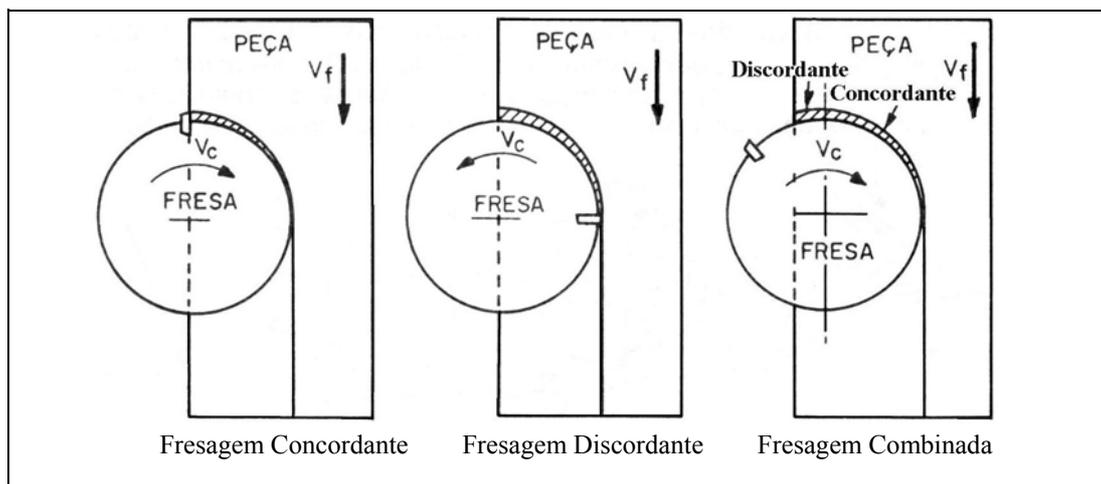


FIGURA 03 - MÉTODOS DE FRESAMENTO ^{2}

2.1.2 FRESAS

São ferramentas rotativas de usinagem, providas usualmente de múltiplos gumes (excepcionalmente um só), dispostos simetricamente ao redor do seu eixo axial, com objetivo de remover intermitentemente material da peça. A palavra fresa vem do francês "fraise" que significa morango. Correspondia inicialmente a uma ferramenta manual primitiva, em forma de uma bola, na qual, antes da têmpera se levantavam, com uma talhadeira, numerosas rebarbas. Esta ferramenta, pelo seu aspecto e forma geral, lembrava a fruta que lhe deu o nome ^{2}.

As fresas são classificadas segundo dois critérios: quanto à forma geométrica e quanto à construção.

a) Quanto à forma geométrica podemos classificar as fresas em:

- Fresas cilíndricas
- Fresas de disco
- Fresas angulares
- Fresas detalonadas ou de forma
- Fresas de haste ou de topo

Por serem utilizadas neste trabalho, trataremos somente das fresas de topo, mais especificamente das fresas de topo de haste cilíndrica.

FRESAS DE TOPO

As fresas de topo são usadas para facear, ranhurar, executar bolsões, rebaixos, matrizes, gravações, rasgos de todos os tipos e tamanhos, fresar contornos, etc. Este tipo de fresa corta tanto na periferia como na parte frontal, podendo ser usado em fresadoras horizontais e verticais. Estas fresas podem ser de corte à direita ou à esquerda, com ranhuras retas, em hélice direita ou hélice esquerda. Se o corte se efetua simultaneamente na periferia e na parte frontal, a direção de corte e da hélice deve ter nomes iguais (usualmente corte à direita e hélice direita), pois dessa forma, os cavacos são puxados para cima, gerando-se porém uma força axial que tende a tirar a ferramenta de seu suporte (cone ou mandril).

FRESAS DE TOPO DE HASTE CILÍNDRICA

Conforme a norma DIN 844, estas fresas apresentam de 2 a 10 gumes, dependendo do diâmetro. Os elementos dimensionais e os ângulos principais estão indicados na figura 04:

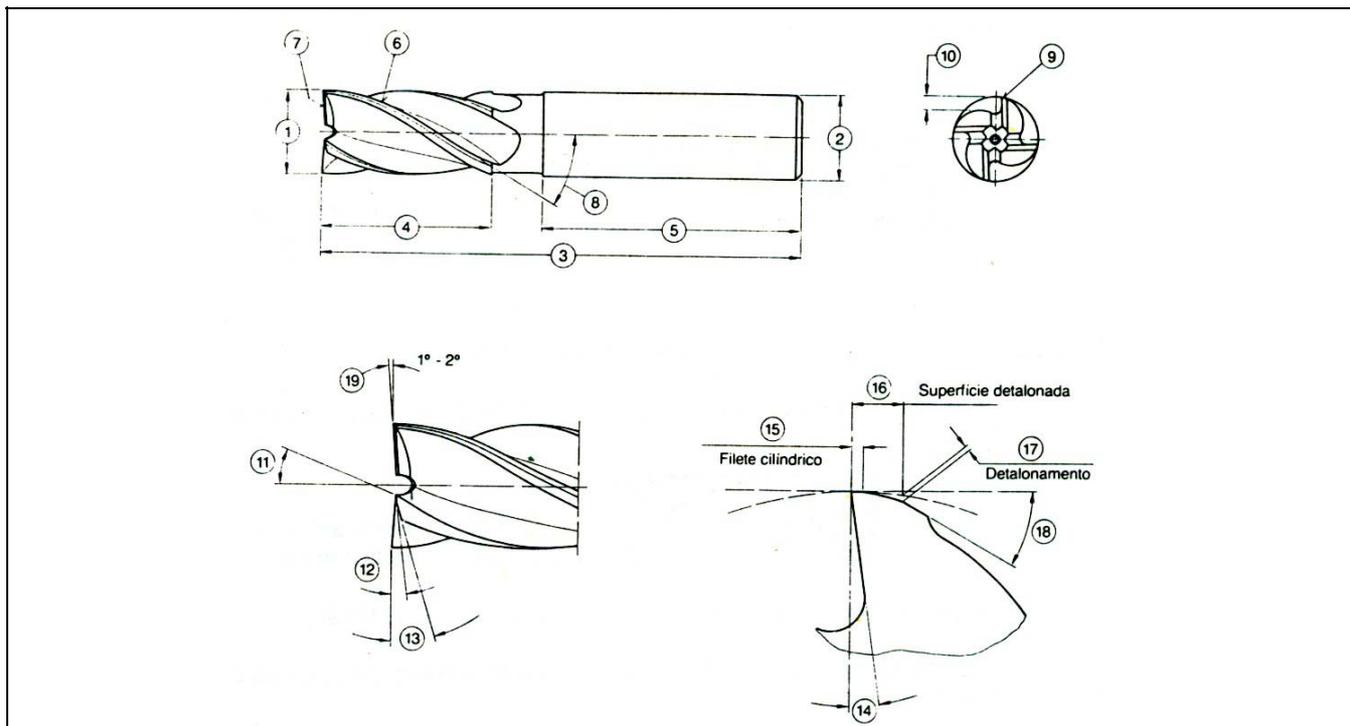


FIGURA 04 - ELEMENTOS DIMENSIONAIS E ÂNGULOS PRINCIPAIS^{2}

Onde:

- | | |
|---|--|
| 1. d_1 – diâmetro dos gumes | 11. γ'_p – ângulo de saída passivo do gume secundário |
| 2. d_2 – diâmetro da haste | 12. $\alpha_{p1} - 1^\circ$ ângulo de incidência passivo do gume secundário |
| 3. l_1 – comprimento total | 13. $\alpha_{p2} - 2^\circ$ ângulo de incidência passivo do gume secundário |
| 4. l_2 – comprimento dos gumes | 14. γ° – ângulo de saída ortogonal do gume principal |
| 5. l_3 – comprimento da haste | 15. $\beta\alpha_1$ – largura do 1º flanco cilíndrico - $\alpha_{o1} = 0$ |
| 6. gume principal – periférico | 16. $\beta\alpha_2$ – largura do 2º flanco detalonado |
| 7. gume secundário – de topo | 17. valor do detalonamento |
| 8. λ - ângulo de hélice do gume principal | 18. $\alpha_{o3} - 3^\circ$ ângulo de incidência ortogonal do gume principal |
| 9. dente | 19. k'_r – ângulo de direção do gume secundário |
| 10. altura do dente | 20. z – número de gumes ^{2} |

b) Quanto à construção podemos dividir as fresas em:

Fresas indexadas ou intercambiáveis, que são constituídas de um corpo de aço no qual são montados os insertos do material atuante no corte. Este sistema permite utilizar os mais variados tipos de insertos intercambiáveis, nos mais diferentes tamanhos e geometrias. Há possibilidade de ajuste de posição dos gumes e fácil troca dos gumes danificados;

Fresas soldadas, que são constituídas de um corpo de aço, em cujos dentes são brasadas “pastilhas” do material de corte, podendo estas ser de aço rápido, metal duro, cerâmica, entre outros. Estas fresas têm como vantagem, em relação as fresas inteiriças, o reaproveitamento de seu corpo após o desgaste dos dentes cortantes;

Fresas inteiriças, são feitas de uma peça só, geralmente de aço rápido, que, devido ao seu menor custo inicial, são muito utilizadas em pequenas produções e para uso geral em ferramentarias.

No âmbito deste trabalho utilizou-se fresa inteiriça, especificamente uma fresa de topo de haste cilíndrica, tendo como material da ferramenta o aço rápido, cujas características e propriedades são relatadas no item a seguir.

2.2 AÇOS RÁPIDOS

Os aços rápidos são assim designados pois quando do seu desenvolvimento, no início do século passado, eram os materiais para ferramenta que suportavam as maiores velocidades de corte. Atualmente é a principal classe de aços utilizados em ferramentas de usinagem, tais como machos, alargadores, cossinetes, fresas e brocas. Isto se deve a sua alta dureza no estado temperado/revenido e, principalmente, pela capacidade de operar em certas condições que elevam excessivamente a temperatura da ferramenta. A eficiência de uma ferramenta de aço rápido não se altera mesmo quando a temperatura do gume, por efeito do atrito provocado pelo trabalho, atinge 550°C ^{4}. Nesta temperatura, esses aços praticamente retêm a dureza, o que lhes permite continuar ainda na operação de usinagem. Outro fator importante dos aços rápidos é na sua utilização como matéria prima na fabricação de ferramentas especiais produzidas pela indústria, fato este não possível quando se trata de ferramentas de metal duro.

2.2.1 HISTÓRICO

Os aços rápidos começaram a ser utilizados a partir do resultado do trabalho de Taylor e White, em 1900^{5}, que estudaram o efeito do tungstênio sobre a dureza a quente dos aços. Originalmente eles encontraram um aço com a composição de 14% de W, 4% Cr e 0,3 de V. Sua composição foi posteriormente sendo modificada até chegar ao aço comumente chamado de “18-4-1”, com 18%W, 4%Cr e 1%V. No decorrer dos anos foram introduzidas algumas modificações na composição deste aço rápido oferecendo ligas de maior resistência à abrasão ou ao choque, todas simbolizadas pela letra “T” (normas AISI e SAE) seguido de um número de classificação. Como exemplo, podemos citar o “18-4-1”, que atualmente é simbolizado pelas normas AISI e SAE como T1.

Em 1942 em virtude da escassez de tungstênio provocada pela guerra, passaram a ser utilizadas ligas em que o mesmo era substituído total ou parcialmente por molibdênio^{1}, sendo seus diversos sub-tipos classificados segundo as normas AISI e SAE pelos símbolos M1, M2, etc. Estes aços rápidos são de forjamento mais difícil e de tratamento térmico mais complexo. No entanto, o menor preço do molibdênio, e pelo fato de participar com metade da percentagem em peso do tungstênio (por ter aproximadamente a metade do peso específico do tungstênio) faz com que os aços rápidos ao molibdênio sejam mais baratos do que os aços ao tungstênio^{1}. Segundo Wendell^{5}, 85% dos aços rápidos produzidos atualmente são dos aços ao molibdênio, ou grupo “M”, do tipo M1, M2 e M10. Apesar do motivo da troca dos aços T1, ou aços ao tungstênio, pelos aços ao molibdênio ter sido por fator econômico, atualmente os aços do grupo “M” são superiores aos do grupo “T” na maioria das aplicações para ferramentas de corte, quando convenientemente tratados.

2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS RÁPIDOS

Existem duas classes de aços rápidos classificados segundo as normas AISI e SAE. Aços rápidos ao molibdênio, ou grupo “M”, e ao tungstênio, ou grupo “T”. Estes grupos, por sua vez, são divididos em dois subgrupos contendo cobalto. Tem-se desta forma, os tipos ao W e os tipos ao W-Co, indicados nesta classificação com a letra “T”, os tipos ao Mo e ao Mo-Co, ambos indicados nas classificações AISI e SAE com a letra “M”. A tabela 01 apresenta a composição e características dos aços rápidos^{6}.

TABELA 01 – COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS AÇOS RÁPIDOS (4)

Tipo de Aço	Classificação SAE	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Tenacidade*	Resistência ao Desgaste*	Dureza a Quente*							
													%						
ao W	T1	0,70	<u>0,30</u>	<u>0,25</u>	<u>4,00</u>	1,00	18,00	—	—	Baixa	Muito Boa	Muito Boa							
	T2	0,85				2,00	18,00												
	T3	1,00				3,00	18,00												
	T7	0,80				2,00	14,00												
ao W-Co	T9	1,20				4,00	18,00	—	—				5,00	8,00	Baixa	Muito Boa	Excelente		
	T4	0,75				1,00	18,00												
	T5	0,80				2,00	18,00												
	T6	0,80				1,50	20,00												
ao Mo	T8	0,80				2,00	14,00	5,00	—				8,00	5,00			Baixa	Muito Boa	Muito Boa
	M1	0,80				1,00	1,50	8,00											
	M2	<u>0,85</u>				<u>2,00</u>	<u>6,00</u>	<u>5,00</u>											
	M3	1,00				2,75	6,00	5,00											
	M4	1,30	4,00	5,50	4,50														
ao Mo-Co	M10	0,85	2,00	—	8,00	—	8,00	12,00	Baixa	Muito Boa	Excelente								
	M6	0,80	1,50	4,00	5,00														
	M30	0,85	1,25	2,00	8,00														
	M34	0,85	2,00	2,00	8,00														
	M35	0,85	2,00	6,00	5,00														
	M36	0,85	2,00	6,00	5,00														

* As observações quanto a propriedades de tenacidade, resistência ao desgaste e dureza a quente são comparadas com as propriedades dos aços carbono usados para ferramentas.

Os aços rápidos ao molibdênio contêm molibdênio, tungstênio, cromo, vanádio e cobalto como principais elementos de liga. A principal vantagem do grupo “M” é o menor custo e isso justifica a sua maior utilização. Nesses aços elevando-se o conteúdo de carbono e vanádio melhora-se a resistência ao desgaste. Um maior teor de cobalto aumenta a dureza a quente sacrificando, no entanto, a tenacidade. A dureza máxima que pode ser obtida varia com a composição. Para aqueles com menor conteúdo de carbono, como M1, M2, M30, M33, M34 e M36, a dureza máxima está em torno de 65 HRC, enquanto que nos aços com teores de carbono mais elevados, incluindo M3 e M4, a dureza máxima é de 67 HRC, contudo são restritas as suas aplicações industriais quando apresentam este nível de dureza.

Os aços rápidos ao tungstênio, além deste contém cromo, vanádio, cobalto e carbono como principais elementos de liga. Possuem tenacidade levemente menor do que o grupo “M”, mas apresentam dureza a quente um pouco superior.

Ambos os grupos são equivalentes em performance e outros aspectos, incluindo a capacidade de endurecimento. As aplicações típicas para ambas as categorias incluem ferramentas de corte de todos os tipos como brocas, alargadores, fresas e machos. Algumas classes são satisfatórias para trabalho a frio como matrizes de corte, punções e matrizes de laminação de roscas.

2.2.3 PROPRIEDADES DOS AÇOS RÁPIDOS

As propriedades mais importantes para a eficiência de corte são:

- Dureza a quente;
- Tenacidade e
- Resistência ao desgaste.

Dureza a quente - É a capacidade do aço de resistir ao “amolecimento” em elevadas temperaturas. Ocorre devido à precipitação muito fina de carbonetos de elementos de liga durante o revenido e pela resistência dos mesmos a coalescerem quando no trabalho da ferramenta. Essas partículas finas endurecem o aço por bloquear o movimento das discordâncias dificultando assim o deslizamento. Átomos de alguns elementos, principalmente W e Mo, tem dimensões maiores que os outros presentes nos aços rápidos, apresentando velocidades de difusão muito baixas. Desde modo o coalescimento é dificultado resultando na manutenção da dureza em elevadas temperaturas.

Tenacidade – É a combinação adequada de resistência mecânica e ductilidade do aço da ferramenta. Uma ferramenta tenaz resiste bem aos choques inerentes do processo. É influenciada, principalmente, por três fatores:

a) Dureza- Para ferramentas temperadas a diminuição de dureza aumenta a tenacidade. Por outro lado, tem-se o inconveniente de redução de resistência ao desgaste.

b) Tamanho de grão - Este é o único fator com o qual se pode melhorar a tenacidade e resistência ao desgaste simultaneamente. Com a diminuição do tamanho de grão tem-se um leve aumento de dureza e uma melhora da tenacidade.

c) Distribuição dos carbonetos - Para uma boa tenacidade deve-se possuir uma distribuição homogênea de carbonetos. Uma região muito concentrada de carbonetos incentivar a formação e propagação de trincas, enquanto que regiões de baixa concentração vão apresentar menor resistência ao desgaste.

Resistência ao desgaste - É a capacidade da ferramenta de suportar o desgaste promovido por diversos fenômenos advindos do atrito entre peça ou cavaco e ferramenta. Esta propriedade depende da natureza e da composição da matriz, dos carbonetos precipitados, responsáveis pela dureza secundária, da quantidade e natureza dos carbonetos de liga. Os melhores resultados são obtidos mediante o aumento da quantidade de carboneto de vanádio, que é extremamente duro.

No item a seguir será detalhado o comportamento do material da ferramenta de corte em situação de desgaste.

2.3 DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

Desgaste é o dano produzido em uma superfície, causado pela interação com outra superfície. Geralmente envolve a perda progressiva de material devido à carga e deslocamento entre as mesmas. O comportamento do material em situação de desgaste depende do tipo de contato, do nível de tensão, da temperatura resultante e da natureza do ambiente. Deste modo, para ser mantido dentro de limites aceitáveis, deve-se controlar o fluxo de força e energia através da melhoria do projeto, da lubrificação e do emprego de materiais mais resistentes.

2.3.1 TIPOS DE DESGASTE

Diversos são os tipos de desgaste que acontecem em uma ferramenta de corte. Entre os principais podemos citar o desgaste frontal e o de cratera.

a) Desgaste Frontal

O desgaste frontal ou de flanco é o tipo de desgaste mais comum. Este desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça, porque modifica totalmente a forma da aresta de corte original e faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância.

b) Desgaste de Cratera

É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. Pode ser reduzido em alguns processos de usinagem, principalmente quando se utilizam ferramentas de metal duro recobertas, ferramentas de

cerâmicas e quando o material da peça é frágil. O crescimento deste desgaste irá acarretar a quebra da ferramenta quando do encontro com o desgaste frontal.

2.3.2 MECANISMOS DE DESGASTE

O aparecimento de desgaste em ferramentas de corte pode ocorrer em função de diferentes mecanismos^{7}. Rabinowicz^{8} identifica quatro tipos principais de desgaste: adesão, abrasão, corrosão e fadiga de contato. No entanto, segundo Eyre^{9} a abrasão é responsável por 50% dos casos presentes na indústria, enquanto a adesão é classificada em segundo lugar com 15% dos problemas. Desta forma, trataremos dos dois primeiros por serem os de maior ocorrência e interesse neste trabalho.

Mecanismo de Abrasão

O desgaste por abrasão é uma das principais causas de falha de ferramentas. Tanto o desgaste frontal, quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela se faz mais proeminente no desgaste frontal, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco. O desgaste gerado pela abrasão é incentivado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta^{1}. Assim, quanto maior a “dureza a quente” da ferramenta, maior sua resistência ao desgaste abrasivo.

Mecanismo de Adesão

Se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, forma-se entre elas um subproduto metálico que provoca aderência. A resistência deste subproduto é elevada a tal ponto que, na

tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte (APC), mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação da APC.

Tem grande influência na diminuição deste tipo de desgaste, a utilização adequada do fluido de corte, principalmente com efeito lubrificante, e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio. Em geral, a zona de escorregamento, o corte interrompido, profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez promovem o fluxo irregular de cavaco e, portanto, facilitam o mecanismo de desgaste adesivo.

Uma forma de reduzir o dano produzido na ferramenta de corte causado pela interação com outra superfície é o emprego de lubrificação durante o processo de usinagem. Deste modo, o próximo item tratará dos fluidos de corte, suas funções e suas variações.

2.4 FLUÍDOS DE CORTE

O emprego de fluídos nas operações de corte para melhorar as características de usinagem das peças e reduzir seus custos têm sido extensos. Há cerca de 100 anos atrás, W.H. Northcott foi provavelmente o primeiro a escrever sobre o significativo aumento da produtividade causada pelo uso de fluídos durante o corte dos materiais. Em 1868, Northcott publicou sua pesquisa em Londres, no livro intitulado "A Treatise on Lathes and Turning". Cerca de 15 anos mais tarde, F.W. Taylor mostrou que através da inundação da interface peça/ferramenta com um forte fluxo de água, a velocidade de corte poderia ser aumentada de 30 a 40%. Desde então, o desenvolvimento dos fluídos de corte tem sido crescente para melhorar o desempenho das operações de corte nos materiais^{10}.

Nos últimos anos, a crescente preocupação com o meio ambiente associada a uma legislação trabalhista mais rigorosa, despertou ainda mais a atenção de especialistas para os fluídos de corte^{11}. Dentre os processos de manufatura do setor metal-mecânico, a usinagem é seguramente o mais amplamente utilizado e a quantidade e variedade de materiais residuais e emissões é significativa. Os fluidos de corte apresentam-se como agentes de melhoria dos aspectos tecnológicos da usinagem, entretanto no momento em que devem ser descartados após serem deteriorados pela sua utilização, tais produtos provocam de uma forma ou de outra, algum tipo de agressão ao meio ambiente^{12}.

Simultaneamente à evolução tecnológica (aditivção química), foram iniciados então, estudos para investigar as reais influências dos fluídos na saúde do trabalhador e no meio ambiente, uma vez que o consumo de fluído de corte empregado nas linhas de produção cresce proporcionalmente ao aumento de produção (aumento de consumo).

Desta forma, os constantes avanços tecnológicos conseguidos nos materiais de ferramentas, aliados a competitividade industrial acirrada e a legislações mais rigorosas,

conduzem a uma criteriosa análise no emprego racional dos fluídos de corte. O uso otimizado de fluídos de corte, específicos a cada operação de usinagem, apresenta resultados econômicos significativos, tornando-se fundamental aos processos de fabricação^{10}.

2.4.1 FUNÇÃO DOS FLUÍDOS DE CORTE

Os fluídos de corte desempenham várias funções simultaneamente num processo de corte de material. As funções básicas e que evidenciam a importância dos fluídos nos processos são:

- Refrigeração da peça/ferramenta;
- Lubrificação peça/ferramenta e cavaco/ferramenta;
- Expulsar o cavaco da zona de corte;
- Evitar a formação do gume postiço;

Como funções secundárias podem ser citadas:

- Proteger a peça da corrosão;
- Reduzir as forças e a potência de corte;
- Melhorar o acabamento superficial da peça;
- Aumentar a vida da ferramenta;
- Aumentar a eficiência de remoção de material.

2.4.2 TIPOS DE FLUÍDOS DE CORTE

Existem centenas de formulações especiais para refrigerar e lubrificar as operações de corte, porém todas podem ser classificadas em um dos quatro tipos básicos:

Óleos de Corte - são obtidos de óleos minerais com ou sem a mistura de aditivos.

Óleos Emulsionáveis - consistem na mistura de água, óleo, agentes emulsificantes e aditivos de modo a produzir o fluido com as características necessárias.

Fluídos Sintéticos e Químicos - estão nesta classe, geralmente, os fluídos de corte que não contém óleo mineral. Consistem de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão entre outros, adicionados a água.

Fluídos Gasosos - consistem no emprego de meios gasosos como fluido de corte. O ar é o fluido gasoso mais comumente utilizado, estando presente até mesmo na usinagem a seco. O ar comprimido é utilizado para melhorar a retirada de calor e a expulsão do cavaco da zona de corte. Outros gases como o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono também são utilizados para proteção contra a oxidação e refrigeração, porém apenas em casos específicos (custo).

A aplicação de um ou de outro tipo de fluido de corte, em determinada operação, deve seguir uma relação de compromisso entre certos fatores do processo (tipo de operação, tempo de usinagem, qualidade exigida, materiais da peça e ferramenta, máquina-ferramenta, etc.). De modo geral, uma das relações usualmente predominante nos processos industriais é a relação "custo-benefício"^{11}.

2.4.3 USINAGEM A SECO

Como o próprio nome sugere, neste caso a usinagem é efetuada sem a utilização de fluidos de corte e, portanto, o processo não é refrigerado, lubrificado e nem se beneficia de um sistema mais eficiente de retirada de cavaco.

A falta de fluído de corte ocasiona maiores atritos e adesões entre a ferramenta e o material e cargas térmicas mais elevadas nas ferramentas e também na peça. Tais condições podem levar a grandes desgastes da ferramenta, mas podem também, resultar em aspectos positivos, como a diminuição do choque térmico, com conseqüente diminuição da formação de fissuras em ferramentas que trabalham com corte interrompido.

As temperaturas elevadas de usinagem influenciam na formação dos cavacos, podendo resultar em cavaco na forma de fita ou emaranhados. Também podem influir sobre a estabilidade dimensional da peça, assim como modificar a microestrutura próxima à superfície das peças usinadas.

A figura 5 mostra as implicações decorrentes da falta do fluído de corte (usinagem a seco) no processo de usinagem com geometria definida, e também aponta algumas alternativas compensatórias.

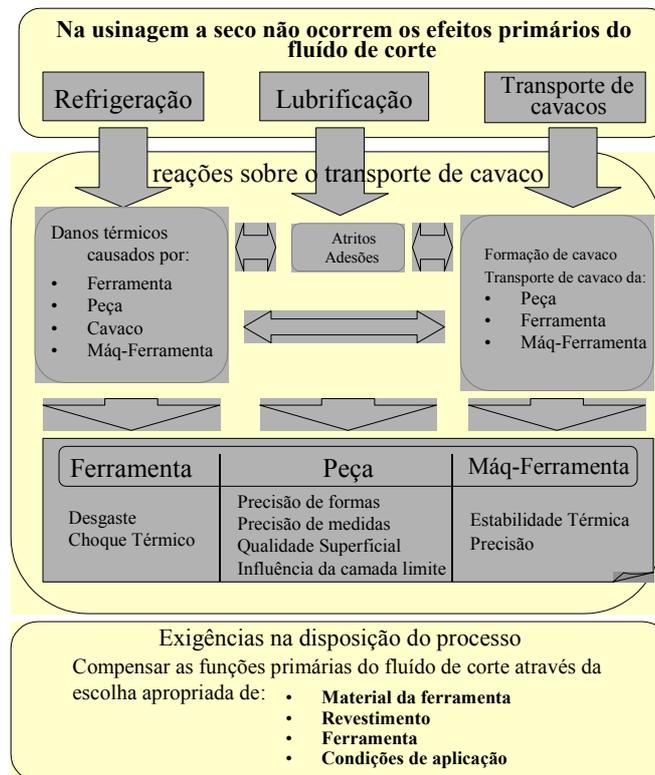


FIGURA 05 – IMPLICAÇÕES DA USINAGEM A SECO {13}

Isto mostra que a usinagem a seco exige a introdução de medidas adequadas que compensem a falta das funções primárias do fluido de corte.

Há a necessidade de se fazer uma análise pormenorizada nas condições de competitividade, assim como o entendimento das complexas relações que unem o processo, a ferramenta, a peça e a máquina-ferramenta.

2.4.4 USINAGEM COM MINIMIZAÇÃO DE FLUÍDO DE CORTE

Ainda não existe um termo técnico que defina claramente um processo (classificação em função da quantidade de fluido de corte empregada) que utilize quantidades mínimas e/ou reduzidas de fluido de corte na zona de usinagem. Na literatura existem várias designações, como quantidade mínima de fluido de corte, quantidade reduzida de fluido de corte e usinagem quase a seco, entre outros. Neste texto será utilizada a nomenclatura adotada pelo Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie - IPT - Aachen, origem da maior parte da literatura atualizada sobre este assunto.

Quantidade Reduzida de Fluido de Corte - QRFC: este termo deve ser utilizado quando o volume de fluido empregado no processo de usinagem com geometria definida for menor que 2 l/min, ou menor que 1 l/min por mm de largura de rebolo, para a retificação.

Quantidade Mínima de Fluido de Corte - QMFC: Entende-se um sistema de névoa com consumo menor que 50 ml/h de fluido de corte.

Pesquisas mostram que em certos casos a utilização do sistema QMFC, devido à sua ação lubrificante, leva a uma drástica redução do desgaste causado pelo atrito e pela adesão na ferramenta^{11}.

A demanda constante por melhor desempenho e a eficiência nos processos de usinagem requerem não só o uso otimizado de fluidos de corte, mas também o emprego de materiais mais resistentes. Neste sentido o próximo item tratará do uso do tratamento superficial de nitretação, tendo em vista que as ferramentas tratadas por este processo tendem a ter desempenho superior às ferramentas convencionais.

2.5 NITRETAÇÃO

A nitretação é um tratamento termo-químico de endurecimento superficial no qual, através da ação de um ambiente nitrogenoso, o nitrogênio é introduzido na superfície de substratos ferrosos (geralmente) a uma temperatura adequada para difusão.

O nitrogênio adsorvido vai reagir com ferro e os elementos de liga da peça formando nitretos de alta dureza e alta resistência ao desgaste. A fonte de nitrogênio para processo é obtida utilizando-se um meio gasoso, líquido ou plasma.

Qualquer que seja o método utilizado na nitretação, os seus objetivos são os seguintes:

- produzir superfície de alta dureza, com melhor resistência ao desgaste;
- melhorar a resistência à fadiga;
- melhorar a resistência à corrosão;

2.5.1. NITRETAÇÃO GASOSA

A nitretação gasosa, que é o processo clássico ou convencional de nitretação, consiste em submeter as peças a serem nitretadas à ação de um meio gasoso contendo nitrogênio, geralmente amônia, à temperatura determinada. O processo é realizado em uma faixa de temperaturas de 500 a 570 °C de modo que ocorra a dissociação da amônia (pelo menos 500 °C) e não ocorra nenhuma mudança de fase (temperatura máxima de 570 °C).

O nitrogênio na forma atômica é produzido pela decomposição da amônia quando entra em contato com a superfície aquecida do material. O nitrogênio assim produzido é o nitrogênio ativo que irá difundir-se no material a ser nitretado. Quando a superfície atinge um determinado nível de saturação de nitrogênio, nitretos são formados através do

mecanismo de nucleação e crescimento, requerendo um determinado tempo de incubação^{14}.

Para um tempo de tratamento determinado, a profundidade da camada e a da zona de compostos (camada branca) dependem da velocidade de dissociação da amônia (que por sua vez depende da velocidade do fluxo de amônia e temperatura) e da temperatura da peça. A difusão do nitrogênio é muito lenta, de modo que a operação é muito demorada, durando de 48 a 72 horas podendo chegar à cerca de 90 horas.

2.5.2. NITRETAÇÃO LÍQUIDA OU EM BANHOS DE SAIS

A nitretação líquida ou em banhos de sais é quase tão antiga quanto método original de nitretação gasosa. Para iniciar o processo, uma mistura de sais, em geral cianeto de sódio e cianeto de potássio, é fundida. O banho é oxidado e o cianeto é convertido em cianato, que é o responsável pela produção de nitrogênio atômico que vai ser absorvido pelo componente. A nitretação e banho de sais, contudo, sofre fortes restrições devido a sua alta toxidez^{7}.

2.5.3. NITRETAÇÃO A PLASMA

A nitretação a plasma, também conhecida como nitretação iônica ou nitretação por descarga incandescente, é um processo termo-físico-químico onde o meio que contém e promove a transferência do nitrogênio é um plasma. O processo é realizado em um reator, que consiste de uma câmara, onde o ar é substituído por uma atmosfera nitretante (mistura de N_2-H_2) a baixa pressão (tipicamente 1 a 10 Torr), que é ionizado por meio da aplicação de uma diferença de potencial elétrico (400 a 1000V) entre dois eletrodos imersos no reator. O componente a ser tratado fica acoplado ao cátodo e a câmara do reator pode ser usada como ânodo, conforme a Figura 06 .

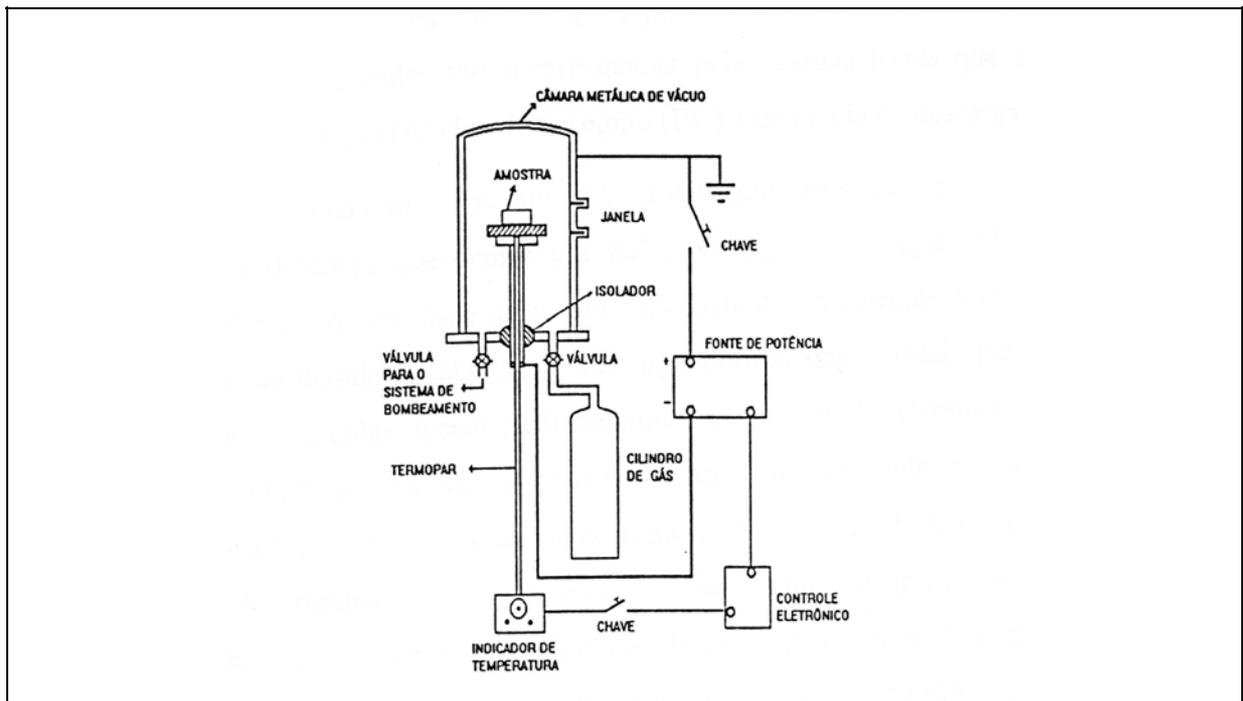


FIGURA 06 - REATOR DE NITRETAÇÃO A PLASMA

Desta forma, por meio de uma descarga elétrica, é gerado e mantido um meio plasmático, através do qual íons são acelerados pelo campo elétrico e bombardeiam a peça (cátodo) com considerável energia cinética.

Este meio plasmático consiste de partículas eletricamente carregadas (íons e elétrons) e átomos neutros. O estado do plasma é alcançado pela ionização dos átomos ou moléculas do gás. Num processo puramente térmico, este estado pode ser estabelecido somente pelo aquecimento até algumas centenas de milhares de graus Celsius. Se, no entanto, a eletricidade é empregada, este estado pode ser facilmente alcançado, como na chamada descarga elétrica incandescente ou descarga elétrica a baixa pressão^{14}.

Os íons formados no plasma são complexos e embora não seja necessário conhecer a composição iônica para obter sucesso na nitretação, o conhecimento dos parâmetros que controlam as características do plasma como composição da mistura do gás, pressão e

voltagem juntamente com densidade de corrente e temperatura do cátodo assegura a reprodutibilidade do tratamento.

Comparativamente a processos convencionais, a nitretação a plasma proporciona um melhor controle da composição das camadas formadas e da profundidade atingida. Os tempos de tratamento são reduzidos, tem-se menor distorção de peças e capacidade de geração de camadas homogêneas. O tratamento é limpo, não poluente, e tem um controle fácil, pois é monitorado unicamente por parâmetros elétricos como corrente e voltagem. Também um grande número de parâmetros como composição gasosa, temperatura e pressão, permitem produzir camadas com diferentes estruturas. A possibilidade de se processar componentes em temperaturas inferiores a 500°C é outra característica importante^{15}.

2.5.3.1 DESCARGA ELÉTRICA INCANDESCENTE

Uma descarga incandescente, isto é, descarga elétrica em um gás a baixa pressão, é o resultado da excitação por choques dos átomos e moléculas em um campo elétrico grande o suficiente para produzir elétrons e íons livres. Os pré-requisitos para o estabelecimento de uma descarga elétrica incandescente são a presença de um gás a baixa a pressão e a aplicação de uma diferença de potencial a partir de aproximadamente 300V^{14}. A Figura 07 mostra os diferentes tipos de descargas em função das características de corrente e tensão.

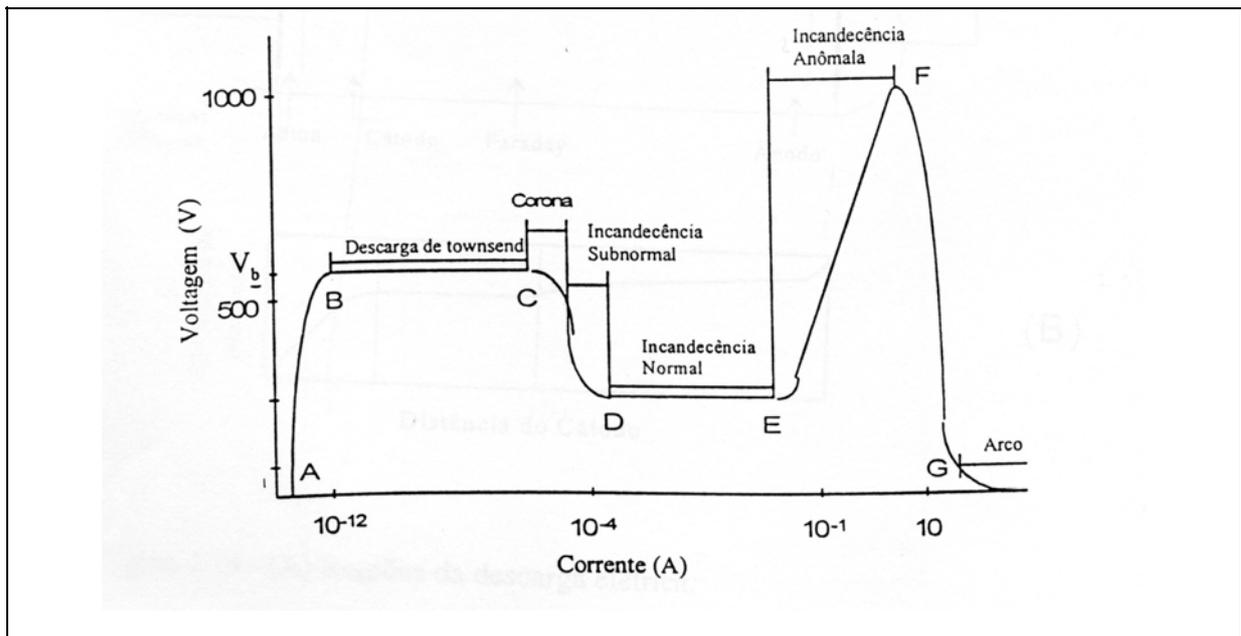


FIGURA 07 – TIPOS DE DESCARGA ELÉTRICA

O valor de V_b (tensão necessária para a ignição da descarga) para um processo de nitretação típico é da ordem de 500 a 650 Volts a uma pressão de 150 Pa em N_2-H_2 . A partir desse ponto a descarga torna-se auto-sustentada e suas propriedades são determinadas pelas cargas líderes que são geradas por colisões no espaço entre os eletrodos. Esta região (BC) é chamada de descarga de townsend. Com o aumento da corrente acima de C, a tensão decresce e a descarga começa a se tornar visível.

A descarga que ocorre em baixa tensão, na região DE, é chamada de incandescente normal. A densidade de corrente é constante e a corrente aumenta à medida que uma maior área de contato é coberta. A descarga normal não é usada para a nitretação pois possui baixa energia e cobre apenas parte da superfície do cátodo. Depois que a superfície do cátodo estiver completamente coberta com a descarga incandescente, o aumento de corrente resulta em um acréscimo na densidade de corrente e na tensão. Essa é a região da descarga anômala (EF).

A nitreção por plasma está associada com alta densidade de corrente da região de descarga anômala. Neste regime de operação a manutenção da descarga depende, basicamente, da relação entre o número de elétrons emitidos do cátodo pelo bombardeio de espécimens, e do número de íons produzidos por colisão de elétrons com as moléculas de átomos do gás. Assim, os elétrons quando de sua passagem pelo gás produzem íons positivos, os quais colidem com substrato (cátodo) liberando um novo elétron e, deste modo, o processo torna-se contínuo.

Acima de um valor crítico (F) o aumento da corrente causa o colapso da descarga com a abertura de arco que produz severos danos no componente tratado. Óxidos superficiais e contaminantes aumentam o risco de danos causados por um arco e, portanto, os componentes devem ser limpos e desengraxados antes de tratados ^{7}.

2.5.3.2. MECANISMO DE FORMAÇÃO DA CAMADA NITRETADA

Na nitretação a plasma, a introdução de nitrogênio atômico em substratos ferrosos ocorre principalmente devido ao bombardeio iônico, adsorção e difusão. O bombardeio iônico produz nitrogênio atômico por dois mecanismos: No primeiro, os íons de nitrogênio gerados na região do plasma são acelerados para o cátodo, colidem e podem ser implantados. No outro, os íons moleculares dissociam-se na colisão com partículas do gás de descarga ou, através de colisões com a superfície, produzindo nitrogênio atômico que pode ser adsorvido e difundir-se no substrato. Como resultado da interação de uma partícula energética (íon ou átomo neutro) com a superfície do metal, tem-se os seguintes fenômenos:

- O íon incidente pode ser refletido, provavelmente neutralizado no processo;
- O impacto do íon pode causar a emissão de um elétron (secundário) da superfície;
- O íon pode ficar implantado no substrato;
- O bombardeio pode dar início a uma série de colisões entre os átomos da rede cristalina do alvo, conduzindo a ejeção de um ou mais destes átomos (pulverização);
- O impacto do íon pode provocar colisões em cascata, causando um grande número de rearranjos estruturais da superfície do alvo (substrato).

Estas modificações resultam em alterações das camadas superficiais e, juntamente com o bombardeio, produzem uma instabilidade termodinâmica juntamente com alterações químicas na região superficial. Um resumo qualitativo pode ser visto na figura 08 a seguir, onde estão apresentados as colisões e seus produtos.

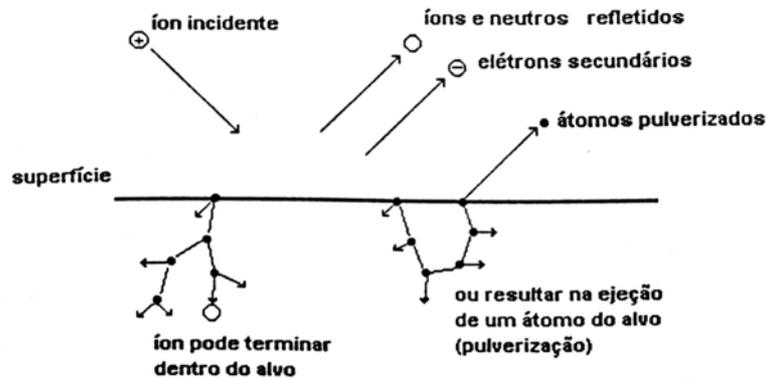


FIGURA 08 - COLISÕES E SEUS PRODUTOS

Durante o bombardeio, não existe um equilíbrio termodinâmico e químico, pois a rede é alterada continuamente (desintegrada na pulverização e integrada na retropulverização). A corrente de partículas energéticas no substrato é responsável pela interação física entre a nuvem de íon da incandescência negativa com a superfície do metal e pelos efeitos causados na rede cristalina e na composição química superficial. Esses efeitos conjugados com alta mobilidade da rede cristalina, influenciarão na dinâmica do processo nitretante. Os principais mecanismos afetados são: a pulverização, a composição química, a adsorção e difusão^{16}.

PULVERIZAÇÃO (SPUTTERING)

A pulverização catódica se dá por transferência de momento entre a partícula incidente e os átomos superficiais, seguida de colisões sucessivas no interior do sólido próximo a superfície. A figura 09 ilustra o fenômeno.

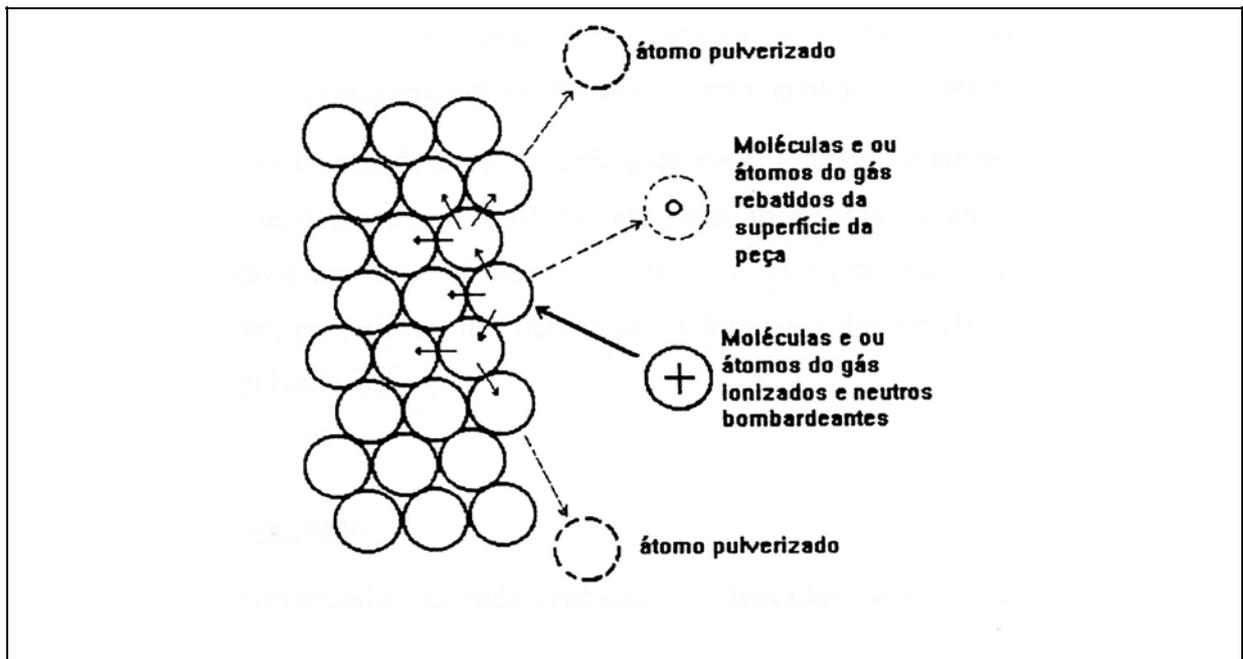


FIGURA 09 - PULVERIZAÇÃO (SPUTTERING)

Observa-se que o momento é transferido na direção dos átomos que estão em contato direto, resultando na ejeção destes ao longo dessas direções. A série de colisões no substrato (íon-átomo, átomo neutro-átomo) é conhecida como “colisões em cascata”. Estas colisões provocam a ejeção de átomos em estado excitado, neutro e raramente (menos de 5%) na forma de íons da superfície quando a energia fornecida a estes é maior que a energia de ligação do sólido^{17}.

Os materiais empregados na produção de componentes são agregados policristalinos, com uma distribuição randômica dos cristais individuais (grãos), com a qual são indiferentemente orientados. Isso provoca uma randomização de trajetórias de ejeção e uma pulverização com diferentes taxas dos elementos constituintes do substrato. Os átomos ejetados originam-se, predominantemente, do topo da camada superficial^{18}.

Quando os íons bombardeiam a superfície da peça, átomos metálicos (Fe, Cr, Al, etc.) podem ser arrancados. Assim, a pulverização da superfície do cátodo é um dos fenômenos responsáveis pela nitretação do metal, pois estes átomos ejetados vão, posteriormente, participar da formação dos nitretos, dando origem ao fenômeno da retropulverização.

RETROPULVERIZAÇÃO

Os átomos ejetados no substrato em estado excitado, neutro e ionizado são lançados para a zona do cátodo. Nesta região, eles podem migrar para outras partes do sistema, reagir com o nitrogênio e formar nitretos, os quais podem depositar-se na superfície do substrato por um processo denominado retropulverização^{18}.

Em levantamentos quantitativos observou-se que os átomos pulverizados e os nitretos concentram-se na região do cátodo. Relacionando esta concentração em função da distância do cátodo, observa-se um decaimento exponencial da concentração com o aumento da distância. Nessas condições, gera-se um gradiente de potencial químico na região do cátodo, que, aliado ao fluxo de partículas que se dirigem para o mesmo, permitem que a maior parte dos nitretos retorne ao substrato pelo fenômeno de retropulverização. Os nitretos depositados na superfície são adsorvidos e são responsáveis pelo crescimento da camada de nitretos na peça^{19}.

Quanto maior a queda de tensão no espaço escuro maior será a aceleração dos íons e o aumento da taxa de produção de átomos ejetados e elétrons secundários. Desse modo aumenta-se a probabilidade de reações químicas formadoras de nitretos e a retropulverização. Portanto, a taxa de formação da camada de nitretos no substrato

depende do montante de pulverização que, por sua vez, é dependente da corrente de partículas e da tensão da descarga.

ADSORÇÃO

Muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de elucidar os mecanismos de formação e cinética de crescimento da camada nitretada no tratamento por plasma. O modelo mais aceito é o proposto por Kolbel e ratificado por Edenhofer^{14} que está apresentado na figura 10.

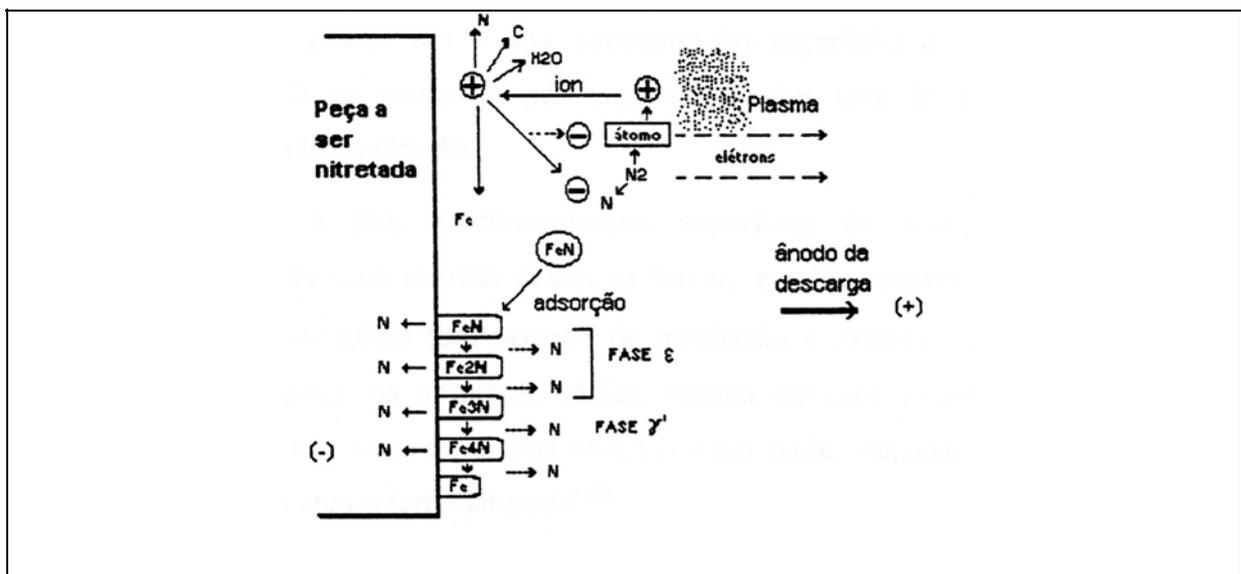


FIGURA 10 - FORMAÇÃO E CINÉTICA DE CRESCIMENTO DA CAMADA NITRETADA

Os átomos de Fe pulverizados da superfície combinam-se com o nitrogênio ativo do plasma (N, N₂^{*}, N₂⁺) formando FeN. Os nitretos formados são retroespalhados, devido às colisões no material pulverizado com as partículas do gás e se condensam na superfície do cátodo. Esses nitreto são instáveis na temperatura em que se encontra o cátodo (350 - 600 °C) e se decompõem em nitretos com menor teor de nitrogênio (Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N).

Parte do nitrogênio que é liberado neste processo irá se difundir na estrutura do material e parte voltará novamente ao plasma. Portanto, o crescimento da camada superficial de nitretos depende da capacidade da rede cristalina adsorver o nitrogênio, e da retropulverização dos nitretos formados na região do cátodo, que se acumulam durante o tempo de tratamento.

DIFUSÃO

O nitreto de ferro, depositado pela retropulverização e adsorvido na superfície, ao decompor-se, aumenta a concentração de nitrogênio, produzindo um gradiente de concentração na interface (camada alterada-substrato base), o qual promoverá um fluxo difusível de matéria desta região para as camadas interiores. Além disso, durante o bombardeamento iônico, os átomos do topo da superfície são continuamente removidos deixando vazios interatômicos. Conjuntamente, um grande número de lacunas e interstícios migram do corpo do substrato para superfície. Assim, a região superficial encontra-se em estado de alta mobilidade atômica e vibracional^{20}.

2.5.3.3. MICROESTRUTURA DA CAMADA NITRETADA

Metalurgicamente, o processo de nitretação produz modificações superficiais no aço através da formação de camadas metalograficamente distintas da microestrutura original. Estas camadas são denominadas zona de compostos (também chamada de “camada branca” por não ser atacada no ensaio metalográfico) e zona de difusão.

ZONA DE COMPOSTOS

A zona de compostos se desenvolve de acordo com o sistema Fe-N, podendo apresentar diferentes estruturas. Estas estruturas podem apresentar uma única fase Fe_4N (fase- γ') ou $\text{Fe}_{2-3}(\text{C-N})_2$ (fase- ϵ), ou ainda uma composição destas duas ($\gamma' + \epsilon$), caso isto seja desejável. A formação das respectivas estruturas pode ser controlada pela composição do gás de tratamento, i.e., pela magnitude do potencial de nitrogênio e de carbono do plasma. É possível, quando desejado, eliminá-la completamente pela redução da razão de nitrogênio e hidrogênio na mistura durante a nitretação^{20}.

Na nitretação a plasma ela também pode desenvolver-se na superfície do substrato se a taxa de deposição do nitrogênio nesta for maior do que a sua adsorção e difusão para o interior da peça.

ZONA DE DIFUSÃO

Durante a nitretação, átomos de nitrogênio difundem através da camada de compostos para o interior do componente ficando em solução na matriz ou formando precipitados de nitretos de ferro ou de elementos de liga. Esta região, onde ocorre o processo anteriormente descrito, é denominada de zona de difusão.

2.5.4. NITRETAÇÃO DE AÇOS RÁPIDOS

Os aços rápidos contêm Cr, Mo, W e V, elementos formadores de nitretos e, desta forma, a nitretação produz uma camada de elevada dureza, alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de fricção, com um mínimo de distorção.

Essas propriedades aumentam a vida da ferramenta de dois modos: A alta dureza proporciona menor perda de material por ação abrasiva do cavaco e o menor coeficiente de atrito diminui o calor gerado evitando a adesão e a soldagem do cavaco na superfície de saída da ferramenta. Segundo Ozbaysal et al^{21} o carbono presente no aço exerce grande influência durante a nitretação. O carbono ao formar carbonetos com os elementos de liga, torna esses elementos indisponíveis para o nitrogênio e, desta forma, retarda as reações de formação de nitretos. De acordo com Ozbaysal alguns carbonetos como carboneto de cromo se transformam em nitretos de cromo durante a nitretação enquanto outros, mais estáveis, como carbonetos de tungstênio, não são convertidos em nitretos.

Os procedimentos de nitretação são similares àqueles usados para aços de baixa liga com exceção do tempo que é menor. O ciclo de nitretação para aços rápidos é de curta duração e dificilmente excede 1 hora. A temperatura de tratamento em geral é inferior a temperatura de revenido do material, aproximadamente 550 °C e, desta forma, não ocorre redução da dureza do substrato. A elevada dureza do substrato, em torno de 850 HV apresenta uma boa sustentação para camada nitretada e, desta forma, não são necessárias camadas espessas.

Bejar^{22} publicou resultados de um estudo da influência da nitretação a plasma na vida de ferramentas de corte do aço AISI M2 mostrando que o tratamento pode aumentar significativamente a vida de ferramenta operando em corte contínuo e intermitente. Em trabalho anterior, conseguiu-se um aumento de 80% na vida de fresas nitretadas, enquanto

Edenhofer^{23} apresenta resultados indicando a melhora da resistência ao desgaste de aço rápido especialmente em fresas.

Especificamente para aço AISI M2, Rocha^{{20}{24}} apresenta estudos comprovando a eficiência da nitretação a plasma. Este e outros trabalhos foram efetuados mostrando as vantagens da nitretação a plasma em aços rápidos. Contudo o processo ainda não foi testado extensivamente^{7}.

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é apresentado o procedimento utilizado para estudar a influência do tratamento superficial, através da técnica de nitretação a plasma, no processo de fresamento com fresas de aço rápido AISI M2. Foram investigados os efeitos deste tratamento superficial no processo de corte, variando-se a forma de lubrificação das fresas, conforme Tabela 02:

TABELA 02– TRATAMENTO E FORMA DE LUBRIFICAÇÃO EMPREGADA

	Fresa Sem Tratamento Superficial	Fresa Nitretada a Plasma
Lubrificação Convencional	3 fresas	3 fresas
Lubrificação Minimizada	3 fresas	3 fresas
Lubrificação a Seco	3 fresas	3 fresas

Após serem submetidas ao ensaio de usinagem pelo processo de fresamento as ferramentas foram analisadas através de medição de forças de usinagem, medições de desgaste na superfície de incidência (flanco) e na superfície de saída (face), sendo as camadas nitretadas caracterizadas por metalografia óptica e microdureza das regiões do núcleo e do dente da fresa, conforme Tabela 03 a seguir:

TABELA 03 - ENSAIOS REALIZADOS

Ensaio	Material Usinado	Fresa Mercado	Fresa Nitretada
composição química	✓	✓	
metalografia óptica	✓	✓	✓
medição de camada			✓
dureza	✓	✓	
microdureza			✓
dimensional		✓	
desgaste da ferramenta		✓	✓
forças de usinagem		✓	

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 FRESAS

Para o ensaio de usinagem foram utilizadas fresas de topo segundo a norma DIN 844 A, do tipo N, haste cilíndrica, corte à direita, hélice à direita, diâmetro de 10 mm, com 4 dentes, conforme ilustrado na figura 11 a seguir. O material das fresas foi o aço rápido AISI M2.

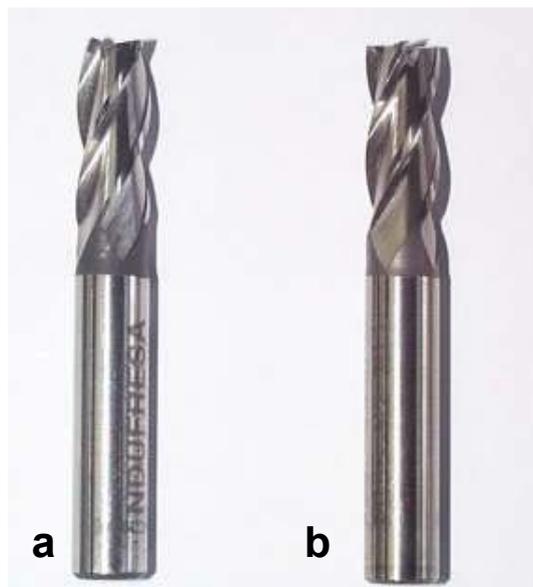


FIGURA 11 – FOTOGRAFIA DIGITAL DA FRESA ORIGINAL DO FABRICANTE SEM TRATAMENTO (A) E DA FRESA NITRETADA A PLASMA (B)

A composição química do substrato e a geometria das fresas estão indicadas nas tabelas 04 e 05.

TABELA 04 - VALORES ENCONTRADOS:

Classificação	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Fe
AISI	%							
M2	0,85	0,41	2,30	4,29	2,01	6,83	4,96	Bal.

TABELA 05 - GEOMETRIA DAS FRESAS DE TOPO, TIPO N, SEGUNDO DIN 844A

Diâmetro (mm)		N. Dentes	Geometria do Corte			
Acima	Até	Z	α_{p1}	α_{o3}	γ_p	λ
1,9	20,0	4	5° à 7°	12° à 16°	10° à 15°	25° à 32°

Para verificação dimensional das fresas do fabricante foram realizadas medições de ângulo em cada dente, do batimento facial e radial entre dentes e do diâmetro entre dentes opostos em 10 fresas selecionadas aleatoriamente. Para medição de ângulos, batimentos e diâmetros foram utilizados como instrumentos de medição um microscópio óptico de ferramentaria, um relógio comparador e um paquímetro digital, respectivamente, calibrados.

Os resultados encontrados nestas medições estão apresentados na tabela 07 do Capítulo 4 – Resultados.

3.1.2 MATERIAL USINADO

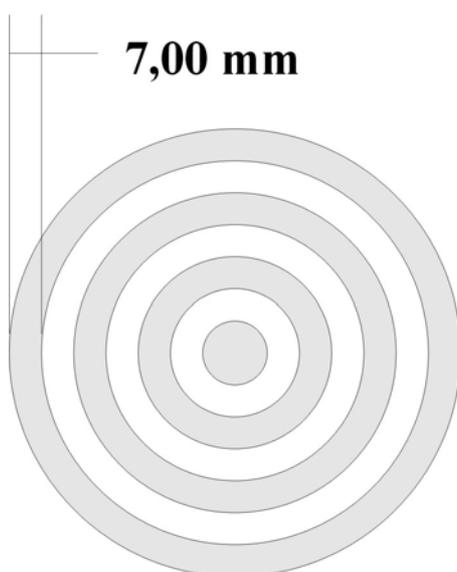
Aço ABNT 1040, tarugo de 101,8 mm, laminado, com dureza de 32 HRC e composição química conforme tabela 06:

TABELA 06 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL USINADO

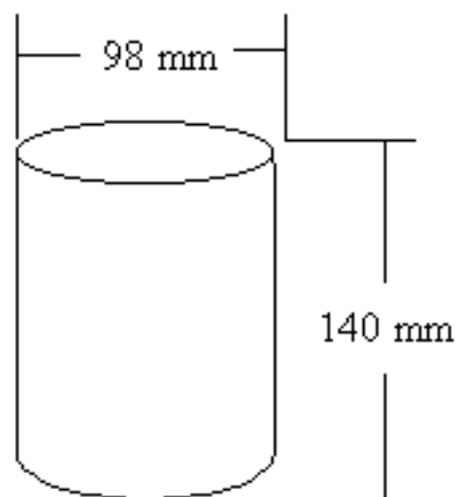
AÇOS CARBONO				
SAE/AISI	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)			
	C	Mn	P _{Max}	S _{Max}
1040	0,37 – 0,44	0,60 – 0,90	0,030	0,050

Formato do corpo de prova

Os corpos de prova usinados possuíam o formato da figura 12 (b) conforme ilustrado a seguir:



a) vista superior do tarugo com indicações das penetrações



b) formato do tarugo a ser desgastado

FIGURA 12 – CORPOS DE PROVA DE USINAGEM**3.2- NITRETAÇÃO A PLASMA**

As fresas de aço rápido AISI M2 foram nitretadas na câmara de nitretação de um dos reatores do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, constituído de uma câmara metálica, com volume de 18 litros, com duas partes principais, um casco metálico que é o ânodo e uma mesa que é o cátodo. O casco metálico possui conexões com a fonte de potência, cilindros de gases, válvulas de admissão e equipamentos de monitoramento e controle, conforme figura 13 a seguir:

**FIGURA 13 - EQUIPAMENTO DE NITRETAÇÃO PLASMA UTILIZADO**

As fresas de aço rápido foram nitretadas no equipamento de nitretação a plasma com os seguintes parâmetros para todas as amostras:

A composição da mistura de gases utilizados nos experimentos foi de 5% N₂ e 95% H₂ em volume, a uma pressão de tratamento de 5 mbar (3,8 torr), com uma tensão variando entre 435V a 440V e uma variação de corrente entre 430mA a 515 mA, resultando em uma temperatura de 440°C, durante um tempo de tratamento de 30 minutos. Esta temperatura foi definida em função da temperatura de revenimento do aço AISI M2 (550-580°C).

Todos os parâmetros definidos foram baseados em experiências anteriores de otimizações dos processos de nitretação, adquiridas e desenvolvidas no LAMEF - UFRGS.

PROCEDIMENTO ADOTADO

O processo de nitretação foi realizado em dois estágios. O primeiro estágio consistiu na preparação das peças a fim de se obter superfícies limpas e livres de óxidos. Requisito este fundamental para o sucesso do tratamento. A limpeza realizada compreendeu, em uma primeira etapa, o desengraxe das fresas em um banho de acetona, submetido à vibração por ultra-som durante um período de 20 minutos. Em uma segunda etapa, as ferramentas foram colocadas sobre a base do cátodo, conforme figura 14, iniciando-se um processo de limpeza física por *sputtering*, através de descarga elétrica em hidrogênio a baixa pressão, com o objetivo de reduzir óxidos e ajudar na eliminação de impurezas, além de pré-aquecer as amostras. Esta etapa foi realizada a uma pressão de 0,7 mbar, aplicando-se uma tensão de 700V e uma corrente de 102 mA, durante 20 minutos.

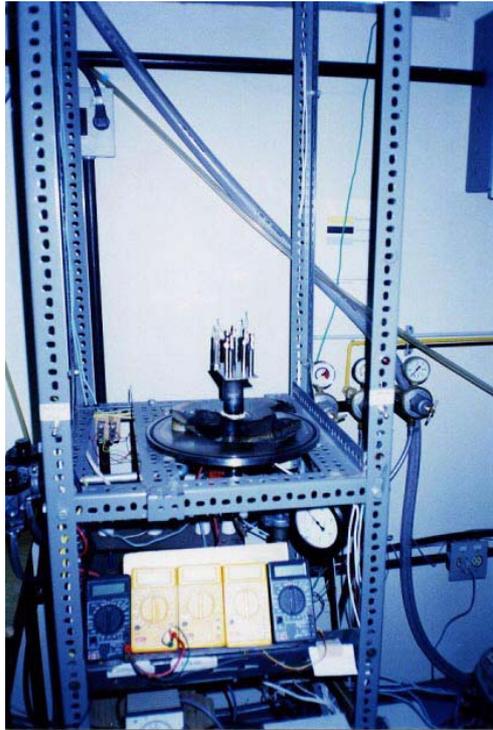


FIGURA 14- FOTO DO EQUIPAMENTO ABERTO

Logo após deu-se início ao segundo estágio com a admissão da mistura de gases para a nitretação e o ajuste da pressão de trabalho, que para as fresas foi de 5 mbar. Em seguida iniciou-se a aplicação gradual da tensão elétrica resultando desta forma em um aquecimento crescente da peça até a temperatura de tratamento, 440°C para este trabalho. Após as amostras atingirem esta temperatura, monitorou-se todas as variáveis a fim de se conseguir uma condição estável durante o tempo de tratamento utilizado, de 30 minutos.

Após este tempo, o plasma gerado foi cortado, iniciando-se o resfriamento das fresas no interior do reator até a temperatura ambiente, sob o fluxo de gás e com o auxílio de fluxo de água dentro do cátodo para uma troca térmica mais rápida. Somente após atingirem a temperatura ambiente, as fresas eram retiradas do interior do reator, evitando assim a sua oxidação.

Durante todo o processo de nitretação o monitoramento da temperatura foi realizado como o auxílio de um termopar do tipo K – cromel/alumel, que foi soldado em um furo central ao eixo de uma fresa “cobaia”. Esta posição, apesar de não ser diretamente a região de interesse da nitretação, foi a mais viável possível, tendo em vista a dificuldade de se medir a temperatura na região do dente da fresa, imposta pela sua geometria.

3.3- ENSAIO DE USINAGEM

No ensaio de usinagem, realizados no Laboratório de Mecânica de Precisão-LMP/UFSC, as fresas aço rápido AISI M2 foram submetidas a usinagem dos corpos de prova descritos no item 3.1, em uma fresadora vertical Romi CNC Polaris F400, conforme Figura 02 anteriormente ilustrada.

Os parâmetros de corte utilizados foram obtidos baseados em equações de bibliografias e de otimizações desenvolvidas pelo LMP/UFSC, os quais estão descritos a seguir:

Rotação - n	954 rpm
Avanço por Dente - f_z	0,025 mm
Velocidade de Corte - v_c	30 m/min
Velocidade de Avanço - v_f	95 mm/min
Profundidade de Corte Radial - a_e	7 mm
Profundidade de Corte - a_p	5 mm

3.3.1- MEDIÇÃO DE FORÇA

A medição das forças durante a usinagem foi efetuada com uma plataforma piezelétrica, um amplificador de sinais, um conversor analógico digital e um microcomputador. Este sistema foi calibrado anteriormente, por um calibrador do tipo peso morto, a fim de se determinar a sua tendência e incerteza de medição .

Esta plataforma piezelétrica transforma os esforços aplicados na usinagem do corpo de prova em um sinal elétrico. Esse sinal é amplificado, convertido de analógico para digital e armazenado no microcomputador. Após a análise dos dados, através de programas convenientes de computador, pode-se obter os valores dos esforços de usinagem em unidades de engenharia. As Figuras 15, 16 e 17 ilustram o sistema de medição de forças de usinagem, o corpo de prova utilizado para a medição de força e os sentidos das forças no sistema de medição, respectivamente.

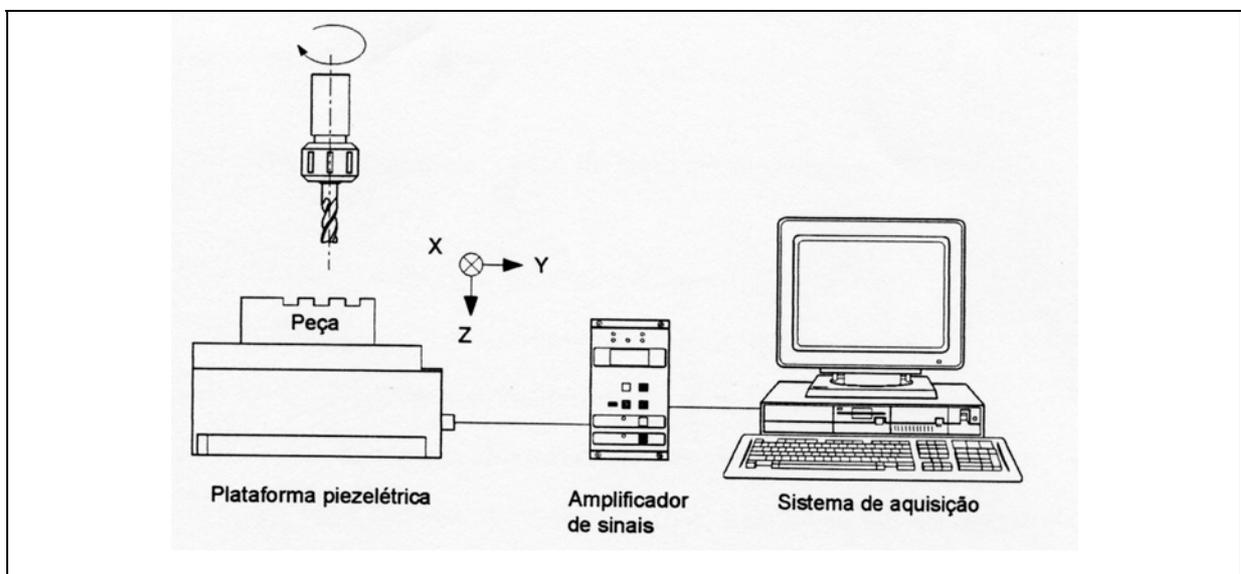


FIGURA 15- SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS

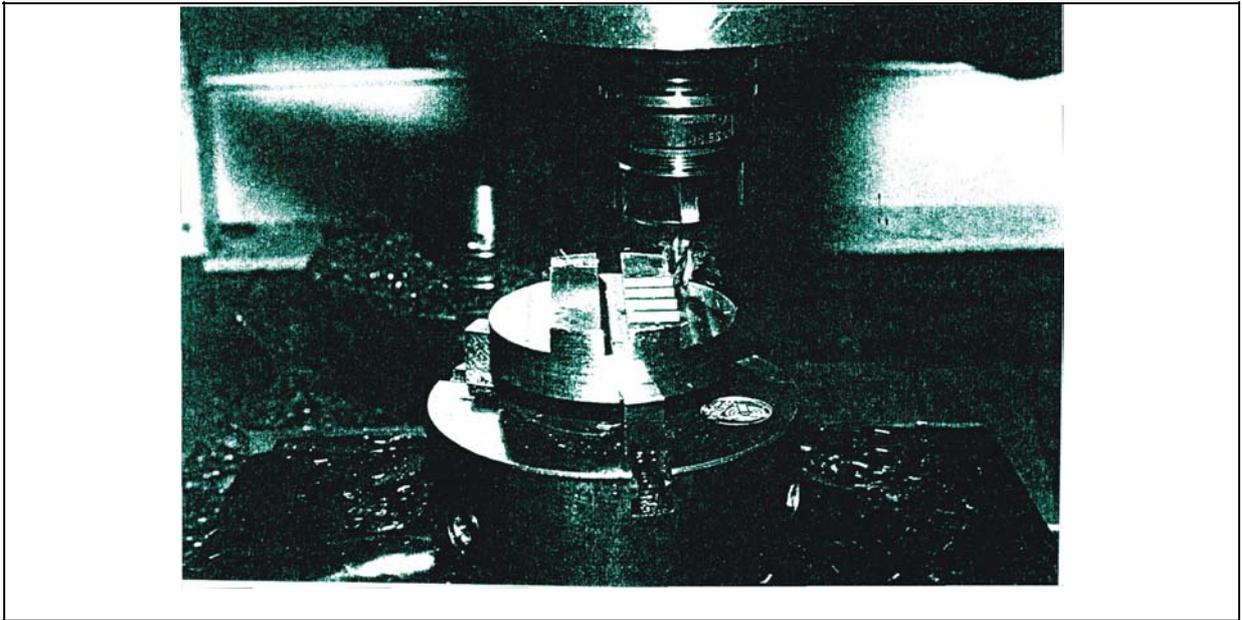


FIGURA 16- CORPO DE PROVA UTILIZADO PARA A MEDIÇÃO DE FORÇA

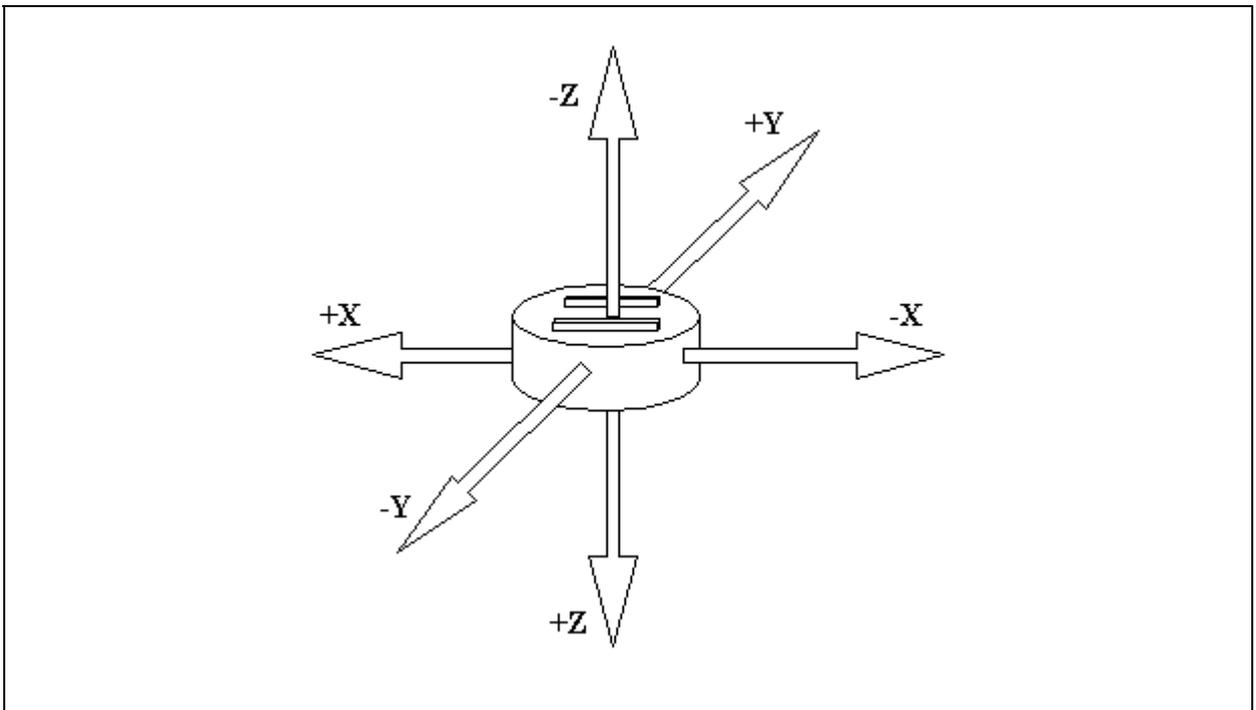


FIGURA 17- SENTIDOS DAS FORÇAS DE USINAGEM NO SISTEMA DE MEDIÇÃO

3.3.2- MEDIÇÃO DO DESGASTE

Durante o ensaio de usinagem foram realizadas medições do desgaste na superfície de incidência (flanco secundário) e na superfície de saída (face), e nas demais regiões, do gume e da quina da ferramenta, foram feitas observações quanto à integridade física como trincas, lascamentos, fraturas, etc.

PARÂMETROS EMPREGADOS NA MEDIÇÃO DO DESGASTE

Flanco da Ferramenta – O desgaste ocorrido no flanco é quantificado através de medições da marca do desgaste, que aparecem nesta superfície por ocasião da perda de material da ferramenta ao longo de seu uso, conforme figura 18. Esta região da ferramenta é normalmente utilizada para monitorar o desgaste, visto que apresenta uma superfície regular (lisa), facilitando a medição. Esta perda de material não é constante ao longo de toda a extensão do gume, o que provoca uma alteração desigual na geometria da ferramenta. O gume principal deixa de ser reto (ou com curvatura uniforme) e passa a ter ondulações. A perda não uniforme no flanco também ocasiona alteração nos ângulos de trabalho em cada ponto da parte ativa do gume. Com o uso progressivo, este processo é acentuado até que o gume perca a sua capacidade para trabalho e a ferramenta é dita "gasta"^{25}.

O desgaste no flanco permite estabelecer um critério bastante preciso para prever a retirada da ferramenta de aço rápido^{26}.

O acompanhamento do desgaste no flanco foi realizado pelo parâmetro “VBmáx”, que corresponde à largura máxima da marca do desgaste na parte ativa do gume, conforme figura 18 a seguir:

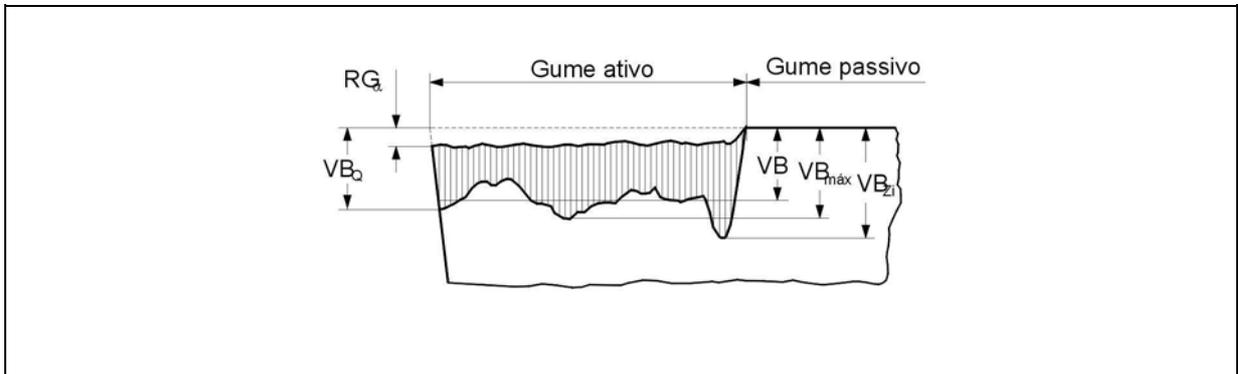


FIGURA 18 – MARCA DO DESGASTE NO FLANCO^{27}

Face da Ferramenta – Os desgastes ocorridos na face da ferramenta são usualmente quantificados através da marca do desgaste ou da cratera produzida nessa superfície pela ação do cavaco formado durante o trabalho da ferramenta. Esta região, por normalmente apresentar uma forma irregular (quebra-cavacos), dificulta as medições, não sendo muito empregada para monitorar o desgaste. Normalmente os parâmetros da face são utilizados para complementar os resultados medidos no flanco^{25}.

O acompanhamento do desgaste na face foi realizado pelo parâmetro “KBmáx:”, que corresponde à largura máxima da marca do desgaste na parte ativa do gume, conforme figura 19 a seguir:

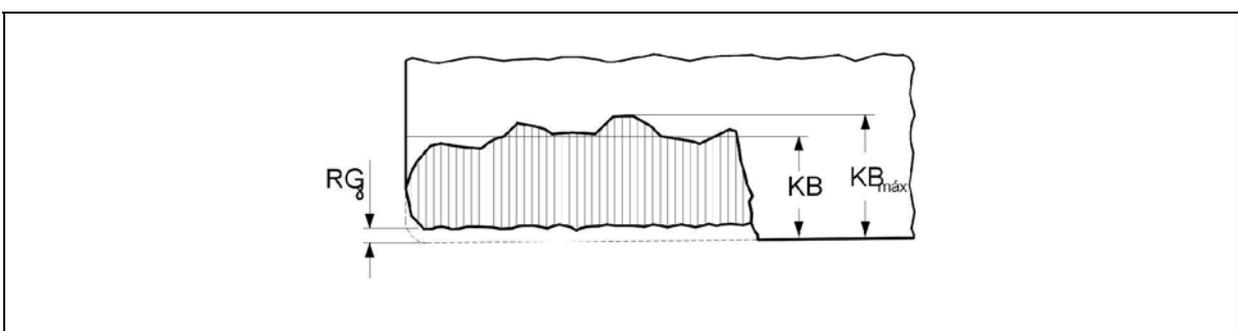


FIGURA 19 – MARCA DO DESGASTE NA FACE^{27}

MÉTODO ADOTADO NA MEDIÇÃO DO DESGASTE

O procedimento utilizado na medição do desgaste do flanco e da face foi através da utilização de um sistema de imagem composto por um conjunto de lentes, câmera CCD e um microcomputador com placa de aquisição de imagem. A câmera e as lentes são montadas em uma estrutura de modo que a ferramenta a ser avaliada possa ser convenientemente posicionada no campo focal do sistema, isto é, de modo que as superfícies com as respectivas marcas de desgaste fiquem perpendiculares ao eixo das lentes. Para a obtenção de uma boa qualidade nas imagens são necessários ajustes no posicionamento da superfície, na iluminação e na distância focal.

Depois de registrada a imagem digitalizada do desgaste, foi utilizado um programa gráfico comercial para obter as dimensões desejadas. Para o ajuste da escala das imagens e do programa foram utilizadas imagens padrão (com três diferentes dimensões) de um padrão de referência dimensional calibrado. O sistema de aquisição de imagens e as regiões de medição dos desgastes são ilustrados nas figuras 20 e 21.

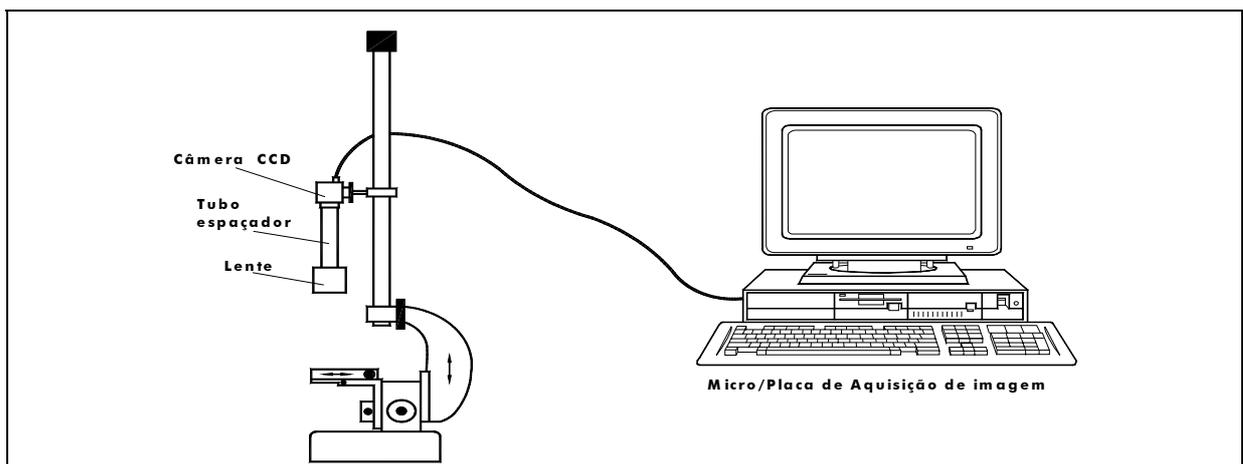


FIGURA 20 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

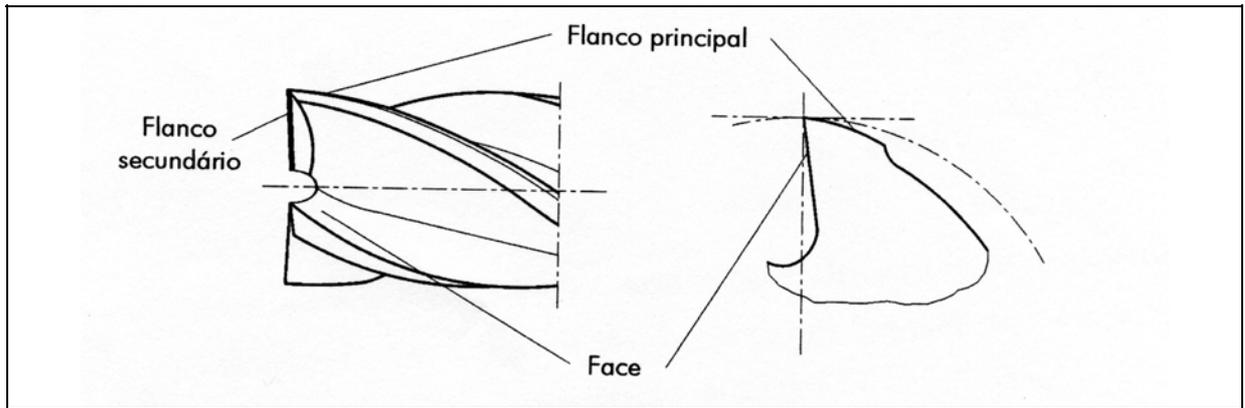


FIGURA 21 - REGIÕES DE MEDIÇÃO DO DESGASTE

3.3.3- FLUÍDO DE CORTE

Os sistemas de refrigeração/lubrificação utilizados durante o fresamento foram: o fluido convencional, minimizado e a seco, conforme descrito na tabela 02 do item 3.

Para o processo convencional foi utilizado um fluido de corte sintético, totalmente solúvel em água, da marca Bardahl - Maxlub Recut 2, com vazão de 2,8 l/min, diluído a 5% em água, aplicado pelo sistema de lubrificação de ferramentas da fresadora.

Na lubrificação minimizada foi utilizado como fluido um óleo vegetal da marca I. Terstegen – Micro 4300, com pressão de trabalho de 3,5 bar e vazão de 50 ml/h (25 ml/h por bico), aplicado através de um sistema conforme ilustrado na Figura 22.

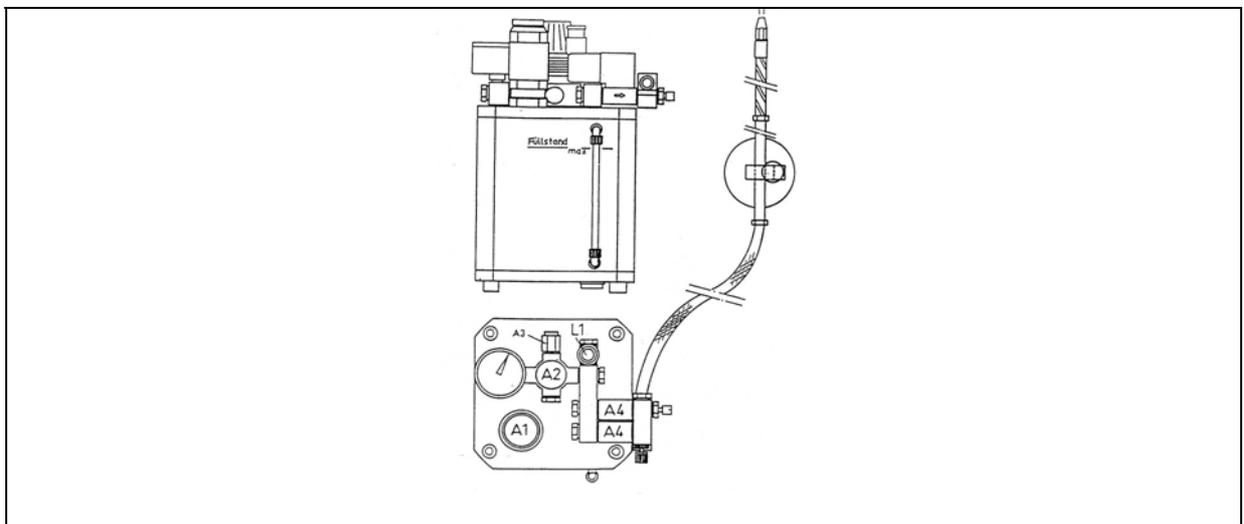


FIGURA 22 - SISTEMA DE MINIMIZAÇÃO

3.3.4- PROCEDIMENTO ADOTADO NO ENSAIO DE USINAGEM

O procedimento para ensaio de usinagem seguiu as seguintes etapas:

- 1) Fixação da fresa a ser ensaiada no mandril da máquina-ferramenta, posicionando-a sempre em uma mesma altura de balanço no mandril (distância da ponta da fresa ao ponto de fixação), com auxílio de um paquímetro.
- 2) A seguir o conjunto fresa/mandril é posicionado em um dispositivo de fixação da base câmara CCD, sendo realizados os ajustes de foco e de luminosidade, e executadas as fotografias de referência da fresa a ser ensaiada nas regiões da superfície de incidência (flanco secundário) e da superfície de saída (face), identificando-as e armazenando-as no microcomputador.
- 3) Logo após é realizada a fixação do corpo de prova de desbaste, na placa de 3 castanhas da mesa da máquina, e do corpo de prova para medições de forças, na placa de 3 castanhas na plataforma piezométrica. Ambas as peças são centradas com auxílio de um relógio comparador.
- 4) Com o corpo de prova de medição de força fixado e centrado é realizada a abertura do primeiro canal para medições e registros das forças de referência F_x , F_y e F_z , conforme Figura 15, do item 3.3.1. Os dados registrados são armazenados no microcomputador.
- 5) Após as medições de força inicia-se a usinagem de 3 “fatias” do corpo de prova de usinagem, de dentro para fora, nas condições de usinagem pré-estabelecidas, com uma profundidade de corte (a_p) de 5 mm para cada fatia pré-determinada, penetrando o tarugo até a profundidade de corte radial (a_e) de

7 mm (conforme figura 16 do item 3.1.2). Depois de atingido este valor, a fresa rotaciona em torno do tarugo, retirando uma camada. Ao final desta camada, ela interrompe o movimento de rotação em torno do tarugo, e reinicia uma nova penetração (radial) de 7 mm, conforme figura 23. O processo vai se repetindo, até que a ferramenta retire a sétima e última camada, completando assim uma primeira fatia. Logo a seguir, a ferramenta retorna ao início para a retirada de mais duas fatias, completando assim, uma primeira passada, totalizando 3,45 metros lineares (1,45m / fatia) de fresamento. É importante salientar que todo o processo de usinagem é controlado por comando numérico visando não só agilidade como também a repetibilidade dos ensaios.

- 6) Após a primeira passada, composta de três fatias, é retirado o conjunto fresa / mandril da máquina-ferramenta, montando-o no suporte da câmara CCD para a execução das fotos das regiões da superfície de incidência e da superfície de saída, para cada dente, totalizando oito fotos, que serão identificadas e armazenadas no microcomputador.
- 7) A seguir inicia-se um novo ciclo onde serão, na seqüência, medidos novamente os valores de força no corpo de prova e realizada uma nova passada da fresa no corpo de prova de usinagem, com a retirada de mais três fatias e logo após, a execução das fotos do flanco e da face de cada dente. Este processo se repete até o fim da vida da ferramenta, que foi estipulado como sendo: O alcance de 15m lineares de fresamento ou trepidação da ferramenta excessiva ou quebra da mesma.

- 8) Finalmente, é medido o desgaste “VBmáx” e “KBmáx”, conforme descrito no item 3.3.2, para cada dente e para cada passada suportada pela fresa. As figuras 24 e 25 ilustram estas medições:

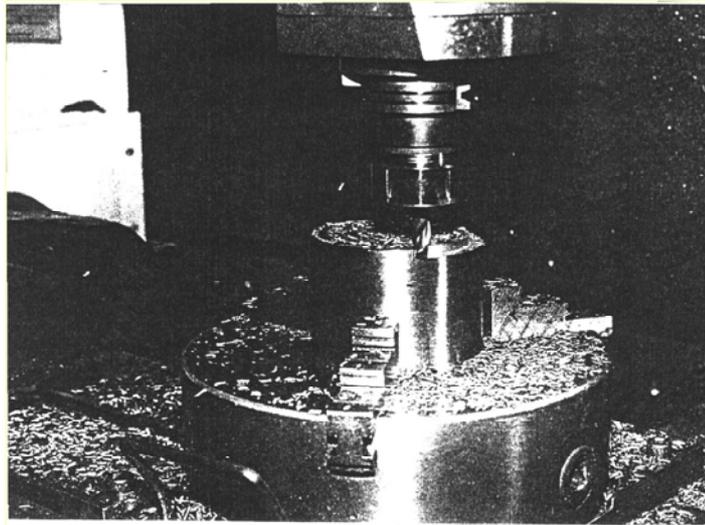


FIGURA 23 – ENSAIO DE USINAGEM

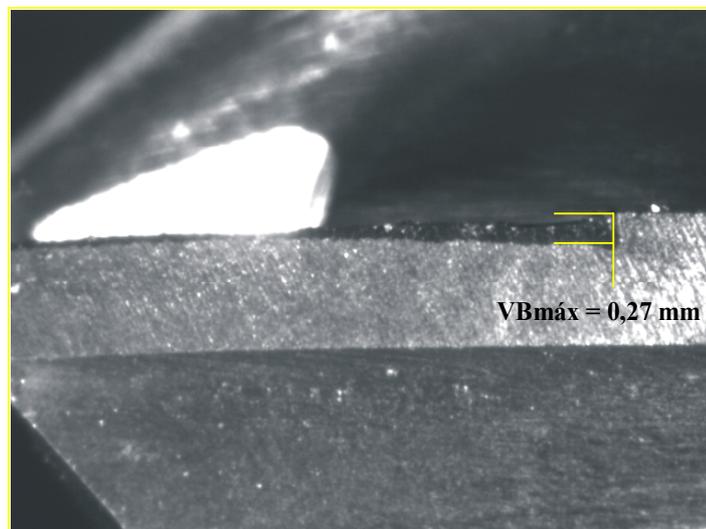


FIGURA 24 - “VBMÁX”

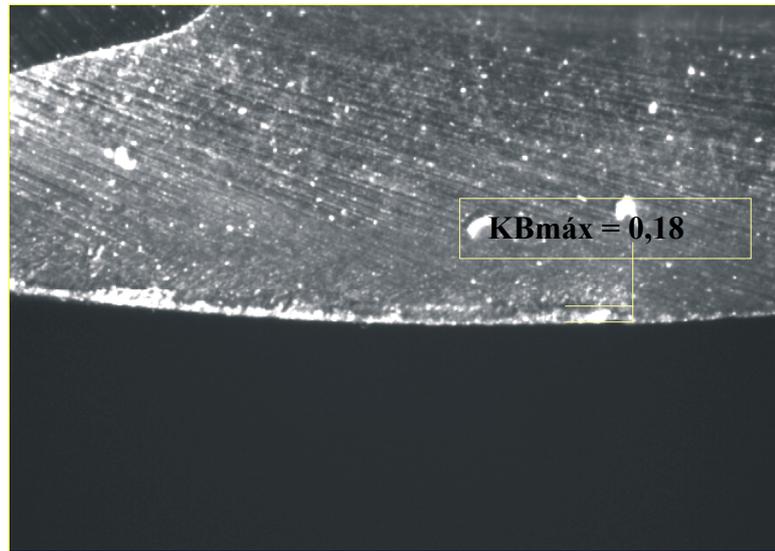


FIGURA 25 – “KBMÁX”

3.4 ENSAIO METALOGRÁFICO E DE MICRODUREZA

Os ensaios de metalografia óptica e de microdureza Vickers foram utilizados para a caracterização das camadas nitretadas conforme metodologia abaixo:

Inicialmente, as fresas foram seccionadas no sentido transversal e as amostras obtidas foram preparadas conforme procedimentos padrões em metalografia que consistem em: lixamento até granulometria 1000, polimento com pasta de diamante de 4 e 1 μ m respectivamente e ataque químico com reagente nital 3% .

A seguir as amostras foram observadas no microscópio óptico onde foram obtidas fotomicrografias da região próxima à superfície para observação das camadas formadas no processo de nitretação a plasma.

Os ensaios de microdureza foram realizados utilizando indentador Vickers. Na região do núcleo a carga utilizada foi de 500 gf, enquanto que próximo ao dente à carga foi de 100 gf. Devido à fina espessura da camada nitretada, não foram realizadas microdureza nesta região.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

A tabela 07 apresenta os valores encontrados nas medições dimensionais (diâmetros, ângulos e batimentos). Os resultados destas medições foram comparados com os valores normalizados pela DIN 844 A (tabela 05). Os valores apresentados em negrito na tabela 07, representam uma não conformidade com esta norma.

TABELA 07 – VALORES ENCONTRADOS NAS MEDIÇÕES DIMENSIONAIS

Característico	Dente	Fresa									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α_{03} (12° à 16°)	Média d_1, d_2, d_3, d_4	18°	17°	19°	17°	16°	17°	18°	19°	16°	18°
γ_p (10° à 15°)	Média d_1, d_2, d_3, d_4	12°	9°	11°	12°	14°	10°	10°	12°	12°	12°
λ (25° à 32°)	Média d_1, d_2, d_3, d_4	27°	27°	27°	28°	27°	27°	27°	28°	28°	27°
α_{p1} (5° à 7°)	Média d_1, d_2, d_3, d_4	7°	7°	8°	8°	7°	8°	7°	7°	8°	8°
Batimento facial – (mm)	máximo	0,02	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01	0,06	0,09
Batimento radial – (mm)	máximo	0,000	0,010	0,005	0,005	0,010	0,000	0,000	0,050	0,005	0,000
Diâmetro (mm)	Média d_1, d_2	9,98	9,97	9,97	9,96	9,98	9,97	10,00	10,00	9,95	10,00
	Média d_3, d_4	9,98	9,96	9,97	9,98	9,98	9,97	10,00	10,00	9,93	10,00

Obs.: Microscópio óptico com ampliação de 25x para α_{03} e γ_p e 10x para λ e α_{p1} ; ver nomenclatura na figura 04

4.2 ENSAIO DE USINAGEM

A tabela 08 apresenta os resultados do ensaio de usinagem para as fresas não tratadas, identificadas pela letra “F” de fabricante, e tratadas, identificadas pelas letras “T” de Nitretação Iônica, com as variantes no tocante ao fluido de corte, identificadas pelas letras “S”, “N” e “M” para a lubrificação a seco, normal (emulsão) e minimizada, respectivamente, sendo os desgastes medidos em cada dente na posição do flanco e da face, a cada 3,45m de comprimento linear de fresamento.

Observa-se que no processo a seco, o fim da vida da ferramenta ocorreu entre os 6,90m e 10,35m. Que corresponde a três passes antes dos demais processos alcançarem os 14,92m lineares de fresamento estipulado como término do ensaio.

TABELA 08 - RESULTADOS DO ENSAIO DE USINAGEM

Ferramenta	Posição	Média dos Máximos Desgastes - mm						
		Comprimento Linear de Fresamento - metros					Máximo	Diferença fresa sem tratamento
		3,45	6,9	10,35	13,8	14,92		
Seco								
FS		0,21	0,33				0,33	
IS	Face	0,21	0,32				0,32	3%
		0%	3%					
FS		0,14	0,45				0,45	
IS	Flanco	0,13	0,33				0,33	27%
		7%	27%					
Emulsão								
FN		0,19	0,25	0,28	0,31	0,33	0,33	
IN	Face	0,13	0,22	0,28	0,31	0,31	0,31	6%
		29%	13%	1%	0%	6%		
FN		0,16	0,18	0,21	0,26	0,30	0,30	
IN	Flanco	0,11	0,18	0,26	0,37	0,47	0,47	-53%
		28%	4%	-23%	-41%	-53%		
Minimizado								
FM		0,23	0,25	0,30	0,33	0,33	0,33	
IM	Face	0,22	0,25	0,26	0,29	0,30	0,30	9%
		6%	3%	11%	12%	9%		
FM		0,06	0,10	0,14	0,17	0,18	0,18	
IM	Flanco	0,05	0,08	0,12	0,16	0,21	0,21	-20%
		16%	14%	17%	6%	-20%		

Obs.: Incerteza na determinação da diferença entre tratadas e não tratadas = +/- 3%

4.2.1 RESULTADOS DO ENSAIO DE USINAGEM NA FACE

No processo a seco, sob a óptica da face, as fresas tratadas com nitretação a plasma tiveram uma melhor performance, de 3%, porém não significativa (dentro da própria incerteza na determinação da diferença entre as fresas IS e FS).

Quando da utilização de emulsão como fluido de corte, o desempenho na face das fresas tratadas foi significativamente melhor. Nos dois primeiros passes as fresas “IN” tiveram uma redução do desgaste de 29% e 13% em relação às “FN”. Porém nos demais passes esta diferença foi reduzida, resultando em um desgaste final de 6% menor em relação às fresas não tratadas.

Com o uso da minimização, a diferença do desgaste medido na face entre “FM” e “IM” resultou em um desempenho melhor para as fresas tratadas em todos os passes, com um desgaste final 9% menor do que as fresas não tratadas.

Os gráficos ilustrados nas figuras 26, 27, 28, 29 e 30 mostram a variação do desgaste da face do dente da ferramenta em função do tratamento e em função dos fluidos de corte.

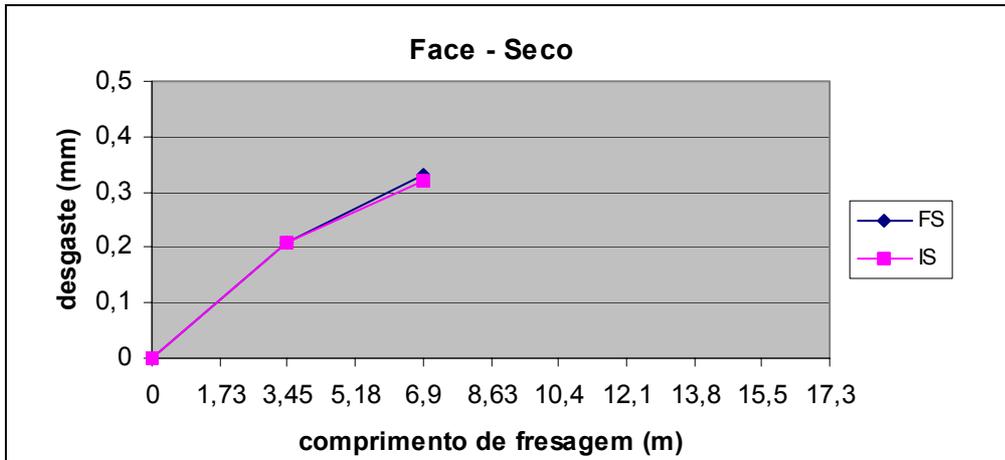


FIGURA 26 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DA FACE - SECO

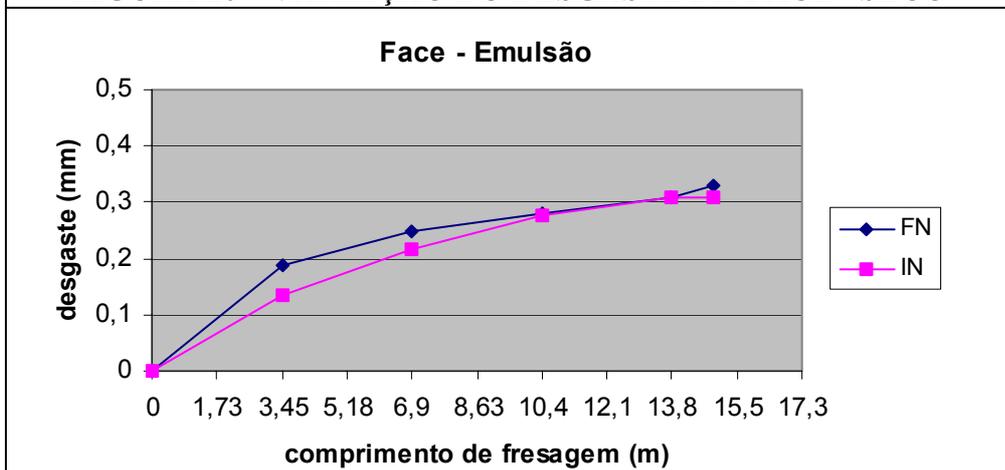


FIGURA 27 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DA FACE - EMULSÃO

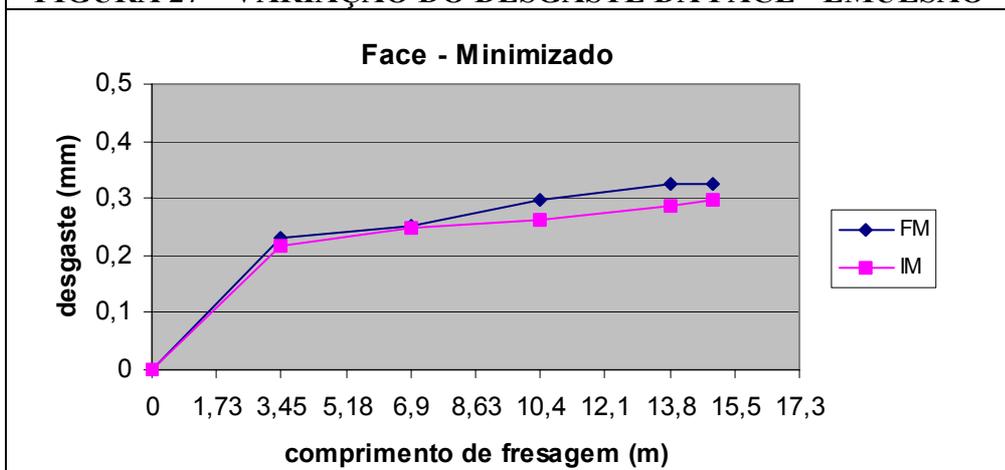
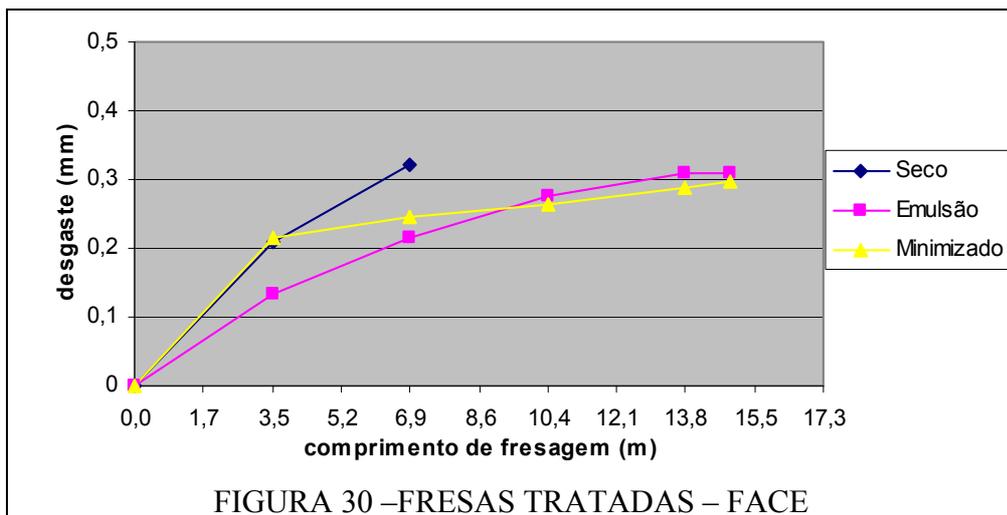
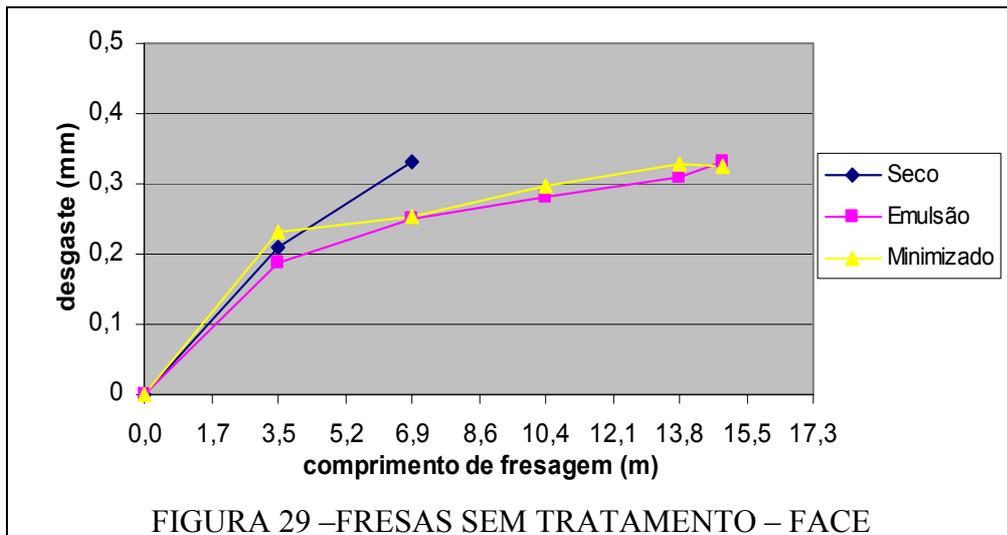


FIGURA 28 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DA FACE - MINIMIZADO



4.2.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE USINAGEM NO FLANCO

Os gráficos ilustrados nas figuras 31, 32, 33, 34 e 35 mostram a variação do desgaste do flanco do dente da ferramenta em função do tratamento e dos fluídos de corte.

Observa-se que na ausência de fluído de corte, processo a seco, as fresas tratadas “IS” apresentaram os menores desgastes, de 7% e 27%, em relação às fresas não tratadas “FS”, apesar de todas as fresas terem suportado o mesmo comprimento final de fresagem, de 6,90 metros. Este melhor desempenho foi bem mais significativo do que o obtido na face da ferramenta (3%).

Apesar de na face às fresas tratadas apresentarem desgaste final em torno de 6% menor do que as não tratadas, quando da utilização de emulsão como fluído, no flanco houve uma inversão neste desempenho.

No início as fresas tratadas “IN”, com o uso de fluído convencional, apresentaram uma diferença de desgaste menor após o término da primeira e da segunda passada, de 28% e 4% respectivamente. No entanto, no final do ensaio de usinagem as fresas “IN” apresentaram desgaste bem maior que as “FM”, de -53% .

A redução do desgaste no flanco, quando utilizado a minimização de fluído de corte, foi em média de 15% nos três primeiros passes para as fresas “IM” em relação às “FM”. No entanto, no final do ensaio, houve uma inversão de desempenho de 6% para -20%, do 4º passe para o último passe.

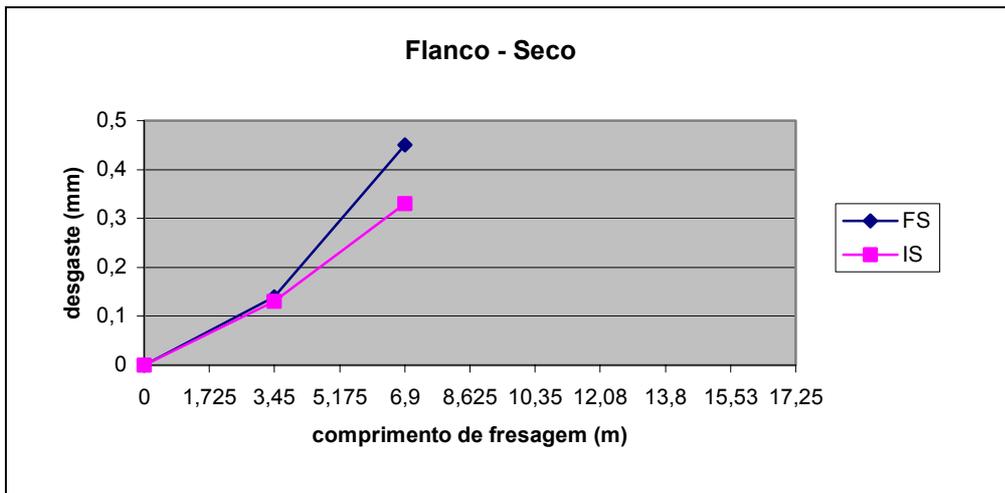


FIGURA 31 – VARIAÇÃO DO DESGASTE DO FLANCO – SECO

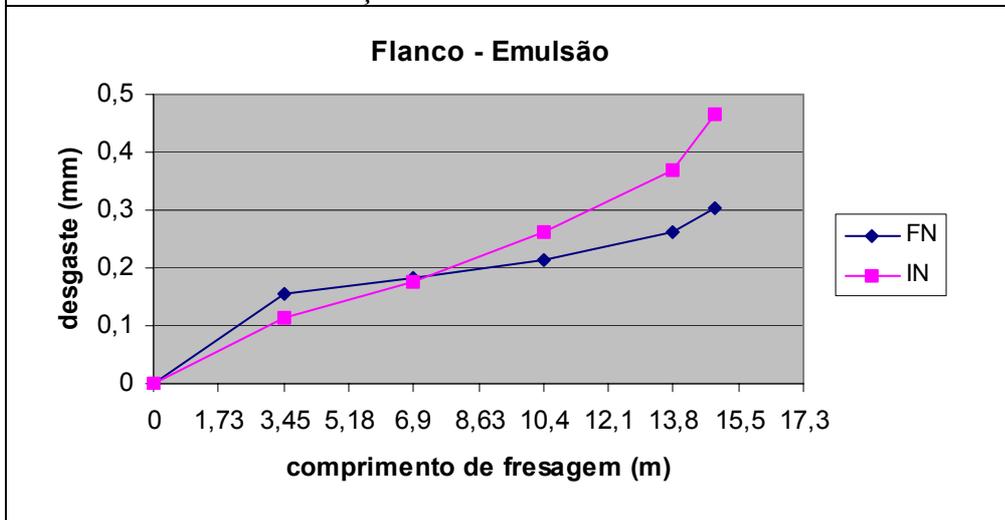


FIGURA 32 –VARIAÇÃO DO DESGASTE DO FLANCO - EMULSÃO

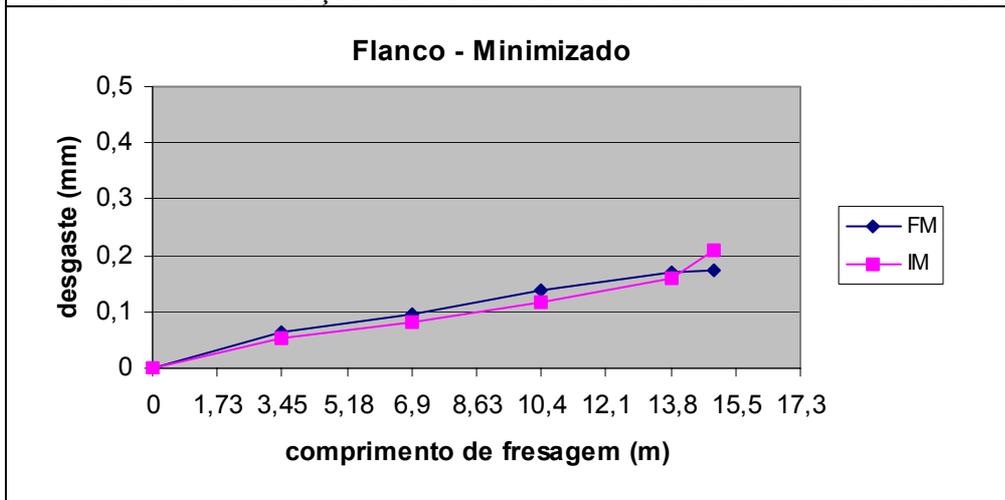
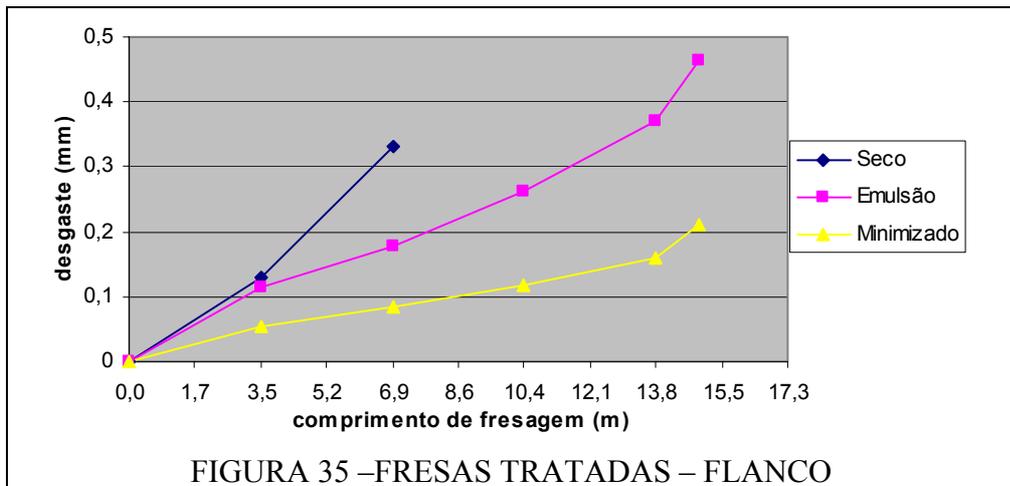
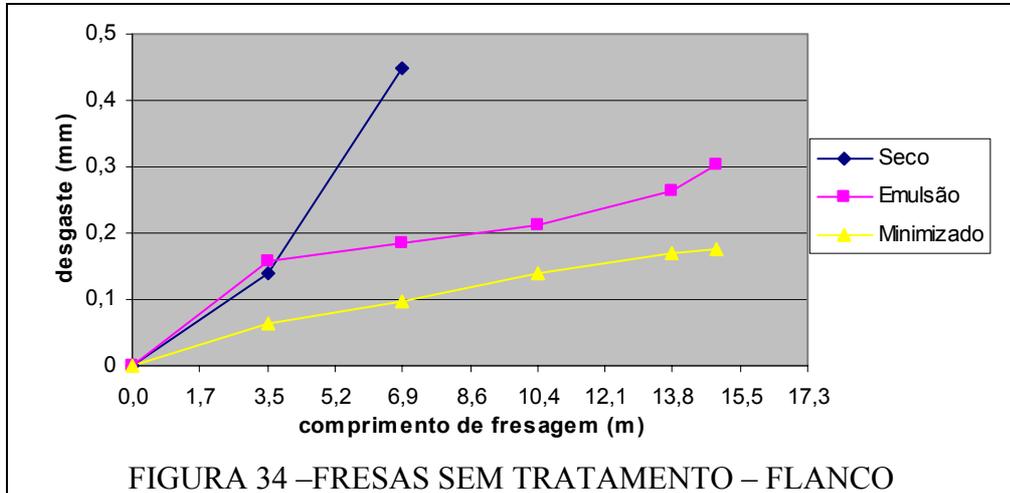


FIGURA 33 –VARIAÇÃO DO DESGASTE DO FLANCO-
MINIMIZADO



4.3 MEDIÇÕES DE FORÇA

A tabela 09 apresenta os resultados das medições de forças em função do tipo de fluido de corte. Os valores correspondem a força resultante dos esforços nos eixos X e Y, medidos antes de iniciar o processo de desgaste (comprimento 0,0m) e a cada 3,45m de comprimento linear de fresamento. Os valores em percentual na tabela 09 referem-se ao desempenho da fresa tratada em relação a fresa não tratada.

TABELA 09 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE FORÇAS

Força Resultante X-Y (N)						
Comprimento Linear de Fresamento - metros						
Ferramenta	0,0	3,5	6,9	10,4	13,8	14,9

Seco						
FS	432	505	909			
IS	387	442	543			
	-10%	-12%	-40%			

Emulsão						
FN	435	536	604	686	874	
IN	397	576	743	859	962	
	-9%	7%	23%	25%	10%	

Minimizado						
FM	256	409	461	484	484	
IM	345	443	456	520	616	
	35%	8%	-1%	7%	27%	

Obs.: Incerteza na determinação da diferença entre tratadas e não tratadas = +/- 5%

Os gráficos ilustrados nas figuras 36, 37 e 38 ilustram a variação da força resultante em função dos tratamentos e dos fluídos de corte.

Observa-se, assim como no ensaio de usinagem, que no ensaio de força as fresas tratadas tiveram melhor desempenho na usinagem a seco. Apresentando valores de força resultante de 40% menores para a nitretação a plasma em relação às fresas não tratadas.

Já na utilização da emulsão como fluído de corte, observa-se inicialmente que as fresas tratadas apresentaram um valor de força inicial em torno de 10% menor do que as não tratadas. No entanto, no final do ensaio a força resultante das fresas tratadas foi em torno de 10% maior.

No processo minimizado, observa-se inicialmente que as fresas tratadas apresentaram um valor de força em torno de 35% maior do que as não tratadas antes do início do ensaio de usinagem (0,0m). Este valor superior da força resultante para as fresas tratadas se mantém até o final do ensaio quando o mesmo alcança o valor de força resultante “IM” de 30% superior em relação a “FM”.

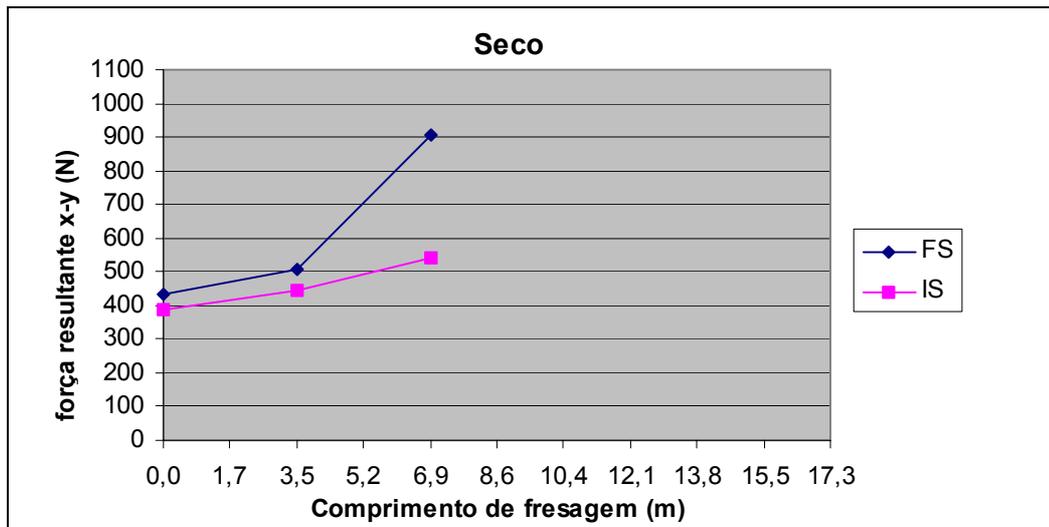


FIGURA 36 – VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE - SECO

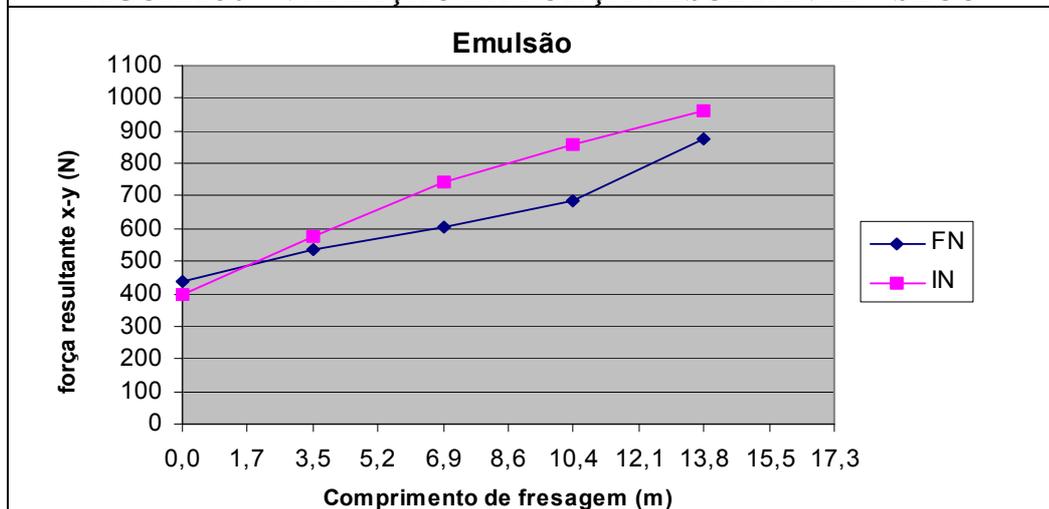


FIGURA 37 – VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE - EMULSÃO

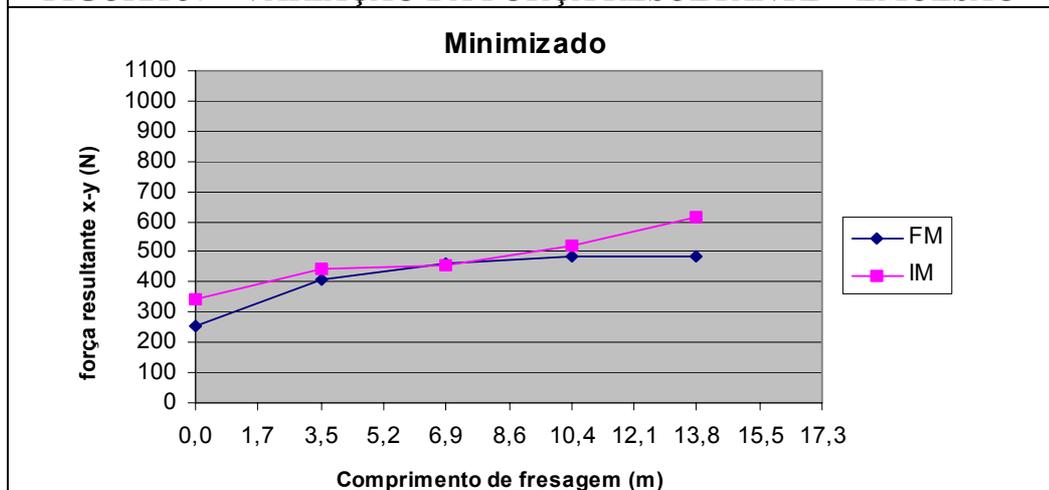
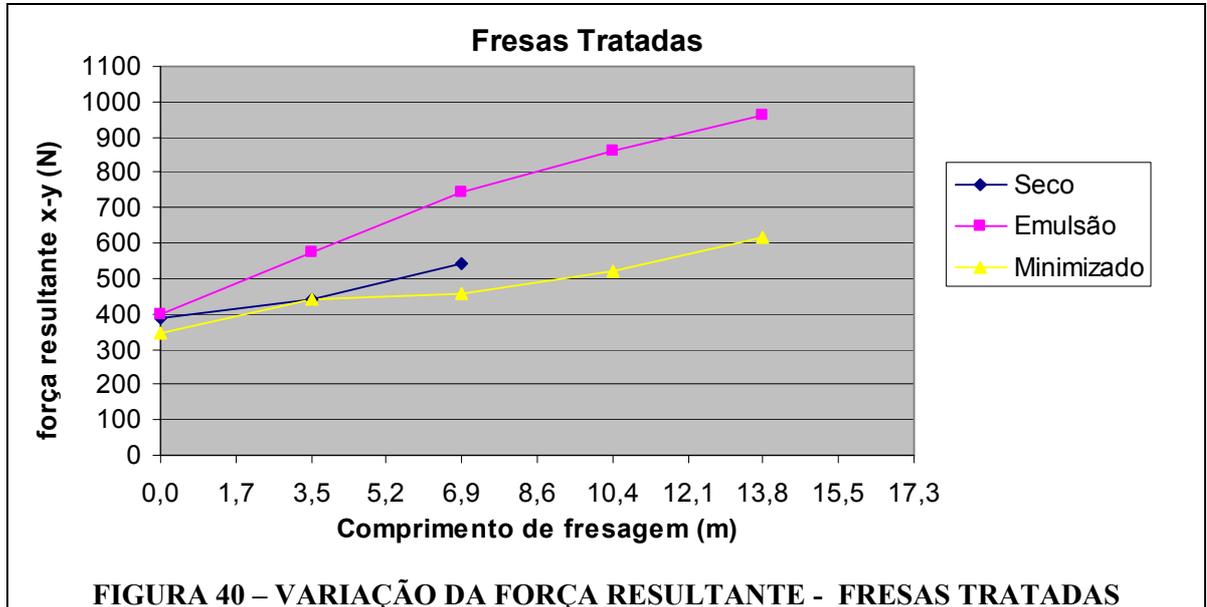
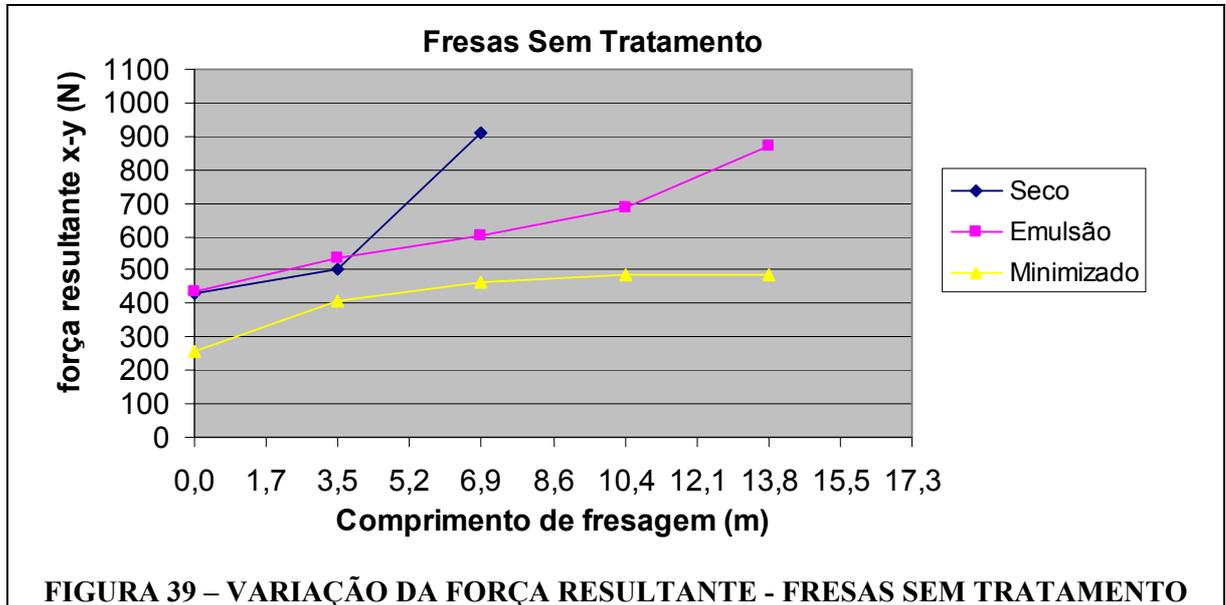


FIGURA 38 – VARIAÇÃO DA FORÇA RESULTANTE - MINIMIZADO



4.4 ANÁLISE METALGRÁFICA

Nas figuras 41 e 42 podem ser observadas as fotomicrografias obtidas junto à superfície da fresa nitretada. A microestrutura do núcleo é composta de martensita e carbonetos precipitados. A camada nitretada formada consiste de uma zona de difusão com aproximadamente $8\mu\text{m}$ de profundidade.

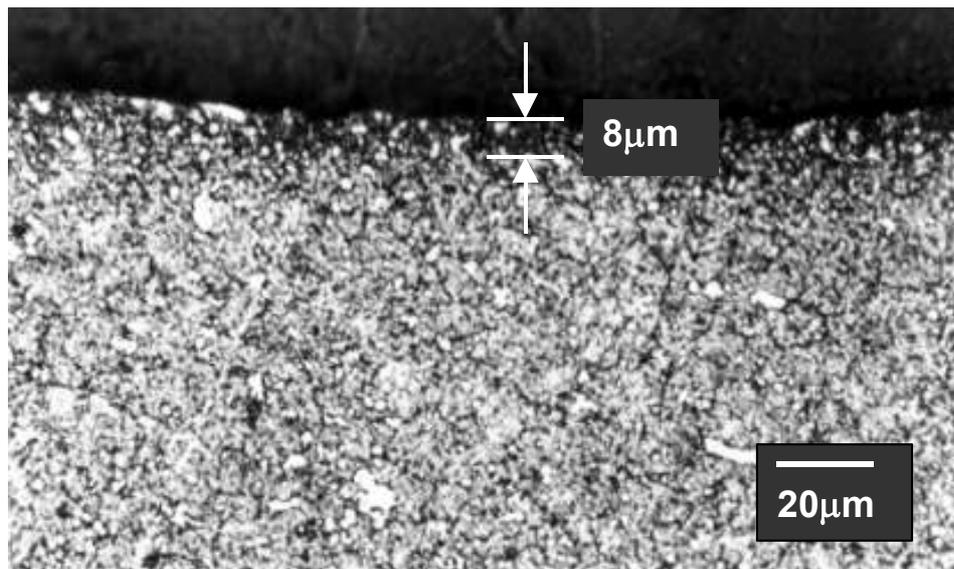


FIGURA 41– MICROGRAFIA OBTIDA JUNTO À SUPERFÍCIE DA FRESA NITRETADA A PLASMA.

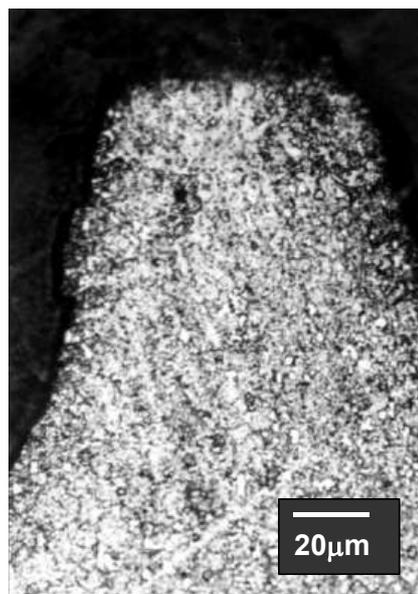


FIGURA 42 – MICROGRAFIA OBTIDA NA SUPERFÍCIE DO DENTE DA FRESA NITRETADA A PLASMA.

4.5 ENSAIO DE DUREZA

A tabela 10 apresenta os valores de microdureza obtidos no núcleo e próximo ao dente das fresas original “A” e na nitretada a plasma “B”, conforme figura 11.

TABELA 10 – VALORES DE MICRODUREZA PARA AS FRESAS ANALISADAS

	Microdureza média no núcleo (HV_{0.5})	Microdureza média no dente (HV_{0.1})
Fresa “A” - Fabricante	786	770
Fresa “B” - Nitretação a plasma	801	814

Estes resultados indicam que não houve perda de dureza de núcleo como consequência do tratamento de nitretação.

Os valores de microdureza superficial não foram determinados tendo em vista que devem ser obtidos em corpos de prova polidos submetidos às condições de tratamento semelhantes às das fresas.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 ENSAIO DE USINAGEM

Pode-se observar que na utilização de usinagem sem fluido de corte, a seco, o tratamento superficial proporcionou um melhor desempenho das fresas tratadas, funcionando com ação “lubrificante”, compensando as funções primárias do fluido de corte, reduzindo o coeficiente de atrito e a adesão entre a ferramenta e o material usinado, e conseqüentemente o desgaste.

No uso de emulsão, inicialmente houve um ótimo desempenho em relação ao desgaste das fresas tratadas, porém a partir de um determinado ponto (6,9m) houve uma inversão significativa neste desempenho. Resultando, no caso do flanco, em torno de 53% inferior ao desempenho das fresas não tratadas. Isto pode ter ocorrido devido à perda da camada nitretada tratada, e conseqüentemente perda dos benefícios do tratamento, proporcionando um resultado pior do que a fresa convencional.

Esta perda da camada nitretada pode ter sido devido à mesma ser mais susceptível ao choque térmico causado pela utilização da emulsão, promovendo a quebra da aresta por fadiga térmica e, a partir deste ponto, o desempenho inferior da fresa nitretada.

No processo utilizando fluido de corte na condição minimizado, houve um bom desempenho das fresas tratadas, tanto na face como no flanco, durante 93% do tempo do

ensaio de usinagem (até 13,75m). No entanto este não se manteve no último 7%, no caso do flanco. No entanto no flanco vislumbra-se (figuras 34 e 35) os menores níveis desgastes para todas as fresas ($\cong 0,2\text{mm}$), se comparado com outras formas de lubrificação ($\cong 0,4\text{mm}$ em 6,9m quando a seco, $\cong 0,5\text{mm}$ em 14,9m quando da emulsão).

De modo geral, observa-se que o desempenho das fresas tratadas não veio ao encontro com o relatado em algumas literaturas, como por exemplo: o aumento de 80% da vida da ferramenta nitretada citado por Bejar^{22} e o aumento da vida de ferramentas de corte de duas a dez vezes citado por Löffler^{28}, quando do uso de processos de tratamento superficial de ferramentas. Isto indica a necessidade de maiores estudos a fim de encontrar pontos ótimos para o tratamento de fresas, quanto à espessura de camada, estrutura, condições de tratamento, entre outros.

Um grande destaque ocorreu quando analisamos sob a ótica do fluido de corte. Verifica-se que o processo com minimização de fluido de corte proporcionou menores desgastes que os demais processos utilizados neste trabalho, chegando a se obter uma redução no desgaste entorno de 100% em relação ao uso de emulsão.

5.2 MEDIÇÕES DE FORÇA

A avaliação das forças resultante (x-y) medidas justifica o melhor desempenho, em relação ao desgaste, obtido pelas fresas tratadas na ausência de lubrificação (a seco). Pode-se observar que estas fresas tiveram um valor de força resultante em relação às não tratadas de até 40% menor, quando a seco.

No entanto, assim como no ensaio de usinagem, destaca-se novamente o processo minimizado de uso de fluido de corte (figuras 39 e 40), onde os patamares de força resultante foram 49% menores do que as forças resultantes quando a seco e de 45%

menores quando do uso de emulsão. Estes valores estão de acordo com resultados de pesquisas que mostram a grande ação lubrificante do sistema minimizado, o que acarreta na drástica redução do desgaste causado pelo atrito e pela adesão na ferramenta^{11}.

6 CONCLUSÕES

Os experimentos realizados para estudar a influência do tratamento superficial, através das técnicas de Nitretação a Plasma, no processo de fresamento com fresas de aço rápido AISI M2, variando-se a forma de uso do fluido de corte, demonstraram maior eficiência das fresas tratadas quando da ausência de fluido.

Com o uso de fluido de corte (emulsão e minimizado) foi evidenciado um desempenho superior das fresas tratadas em relação às de referência, geralmente na primeira metade do ensaio. Porém, este desempenho superior se manteve na segunda metade somente na face, onde o “ataque” à esta região da ferramenta não é tão intenso quanto no flanco.

Em nenhum momento obteve-se um desempenho dos tratamentos tão significativos quanto os citados nas literaturas consultadas.

No tocante a execução dos processos de tratamento superficiais de nitretação a plasma, foi possível obter uma boa reprodutibilidade e adequado controle dos mesmos.

A variação da forma de lubrificação durante o experimento pôde comprovar não só a eficiência dos tratamentos quando da utilização a seco, mas também a eficiência do método minimizado de fluido de corte QMFC, que com seu alto poder lubrificante

proporcionou uma grande redução dos esforços de usinagem, em todos tipos de fresas utilizadas. Desta forma, o processo minimizado pode se constituir em uma grande alternativa quando se necessita de uma lubrificação eficiente e ecologicamente correta.

A combinação do uso racional de fluídos de corte como um tratamento superficial otimizado para os aços rápidos em processo intermitente, pode gerar uma grande aplicação nos processos de fresamento, onde se requer um mínimo de desperdício, eficiência operacional, com baixo impacto ambiental.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Utilização de tratamento duplex (nitretação + PVD) para ferramentas de corte, quando da exigência de trabalhos sem fluídos de corte.
- Estudo para melhorar a eficiência dos tratamentos superficiais quando do uso de quantidade mínima de fluido de corte - QMFC.
- Estudo da vida outras ferramentas de corte, quando exigidas em condições severas, a fim de se atender requisitos ambientais.
- Estudo em ferramentas tratadas com a técnica de PVD, verificando a adesão dos revestimentos depositados, em trabalhos intermitentes, como por exemplo: variando-se a espessura da camada depositada e verificando a sua influência no desempenho da ferramenta de corte em processos intermitentes.
- Estudo da vida de ferramentas de corte intermitente, avaliando a forma do gume da ferramenta e a influência do seu estado superficial (medição de rugosidade).

8 BIBLIOGRAFIA

- 1 DINIZ, Anselmo. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. MM editora. OAD.
- 2 STEMMER, C.E. Ferramentas de Corte II. Editora da UFSC. 2ª edição: 141-216, 1995.
- 3 ELECTRIC, General Co. Milling Handbook of High-Efficiency Metal Cutting, Detroit, 10-17, 1980.
- 4 STEMMER, C.E. Ferramentas de Corte I. Editora da UFSC. 4ª edição: 78-98, 1995.
- 5 WENDELL, C.B. Metallurgical factors Affecting the Service of tool Steels. in: ASM - Tool and Die Failures - Source Book. 32-39, 1982.
- 6 CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. ABM. 1981.
- 7 TIER MD. Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, PPGEM-UFRGS. 1998.
- 8 RABINOWICZ, Ernest. Friction and Wear of Materiais. John Wiley & Sons, 1965.
- 9 EYRE, TS. The Mechanisms of Wear. Tribology International, 10, 1976.
- 10 DROZDA, T.J.; WICK, C. Cutting Fluids and Industrial Lubricants. Tool and Manufacturing Engineers Handbook, I Machining. 1983.
- 11 TEIXEIRA, Cleiton R., Minimização da Quantidade de Fluido de Corte em Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida. Exame de Qualificação para Doutorado - UFSC. 1997.
- 12 DIAS, Alexandre M.P.; Avaliação Ambiental de Fluidos de Corte Utilizados em Processos Convencionais de Usinagem. Dissertação de Mestrado - UFSC, 2000. 102 f.
- 13 F KLOCKE and K. GERSCHWILER. Tronckenbearbeitung Grundlagen. Grenzen, PersDektiven. . VDI Berichte, No. 1240. 1-40, 1996.
- 14 B. EDENHOFER. Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding. Heat Treatment of Metals. 1974.
- 15 STROHAECKER, T.R.; ROCHA, A.S.; ALMAZAN M.E.; SANTOS G.R.; PIANA L.A., Desgaste de Brocas HSS Nitretadas a Plasma. LAMEF – UFRGS, 2001.
- 16 HOCHMAN, R.F.. Effects of Nitrogen in Metal Surfaces. Proceedings of an international Conference on Ion Nitriding. 23-30, 1986.
- 17 JONES, C.K. et al. Ion Nitriding. The Metals Society. 71-77, 1975.

- 18 KUNRATH, Neto. Tratamentos Térmicos em Plasma. LAMEF-UFRGS. 1995.
- 19 MICHEL, H et al. Progress in Analysis of the Mechanism of Ion Nitriding. Surface and Coatings Technology. 103-111, 1995.
- 20 ROCHA, A.S Estudo de Nitretação iônica Aplicada aos Aços Rápidos. Dissertação de Mestrado - PPGEMM-UFRGS. 1996.
- 21 OZBAYSAL, K, INAL, OT; ROMIG Jr, AD. ion-Nitriding Behavior of Several Tool Steels. Materials Science and Engineering. 179-191, 1986.
- 22 BEJAR, MA. On the Life of an Ion Nitrided HSS Cutting Tools. Journal of Materials Processing Technology. 1992.
- 23 EDENHOFER, B. Improving Tool Surface Quality by Ionitriding. Translated from Werkstatt und betrieb 109 No 5. 1976.
- 24 ROCHA, A.S.; Influência do estado superficial prévio na nitretação a plasma do aço AISI M2. Tese de doutorado- PPGEMM-UFRGS. 2000.
- 25 SCHROETER, Rolf Bertrand; TEIXEIRA, Cleiton R. Proposta de Metodologia para Medição do Desgaste em Ferramentas de Corte de Geometria Definida. CONEM 2000. 2000.
- 26 FERRARESI, Dino. Fundamentos da Usinagem de Metais, Edgard Blücher, 1995.
- 27 KÖNIG, W., Weigaertner, W.L. Tornear, Fresar e Furar , 471, UFSC, 1990.
- 28 LÖFFLER, Frank H.W. Systematic Approach to Improve the Performance of PVD Coatings for Tool Applications. Surface and Coatings Technology. 1994
- 29 MOVHAN, B.A.; DEMCHICHIN, A.V.. Phys. Met. Metallogr. 83-90, 1969.
- 30 PIZZOLATTI, J.. Nitretação de Substratos Ferrosos em Aços em Descargas elétricas. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS. 1988.
- 31 RAUTER RO. Aços Ferramentas. Livros Técnicos e Científicos. 1974.
- 32 TEIXEIRA, Cleiton R., Benefícios Ecológicos Através da Redução do Uso de Fluidos de Corte. Tese de Doutorado – UFSC, 153, 2001.
- 33 STROHAECKER, T.R.; ROCHA, A.S.; ALMAZAN M.E.; SANTOS G.R.; PIANA L.A., Desgaste de brocas HSS nitretadas a plasma. LAMEF – UFRGS, 2001.
- 34 VALLE, Pablo Deivid. Avaliação da Influência da Minimização e Eliminação do Fluido de Corte no Processo de Fresamento de Topo Reto. Dissertação de Mestrado; UFSC, 2001.
- 35 ALVES JR C. Nitretação de Aços Assistida por Plasma. Metalurgia, ABM. Vol. 47, 1981.
- 36 MATTHEWS, A; Developments in Ionization Assisted Processes. J. VAO.Sci. Technol. A3. 1985.