

RICARDO RIBEIRO MOURA

**FRESAMENTO DE AÇO PARA MATRIZES VP20ISOF
COM FERRAMENTAS REAFIADAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2012

RICARDO RIBEIRO MOURA

**FRESAMENTO DE AÇO PARA MATRIZES VP20ISOF COM
FERRAMENTAS REAFIADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Uberlândia – MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

M929f Moura, Ricardo Ribeiro, 1986-
 Fresamento de aço para matrizes VP20ISOF com ferramentas rea-
 fiadas / Ricardo Ribeiro Moura. - 2012.
 105 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

Dissertação (mestrado) □ Universidade Federal de Uberlândia, Pro-
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fresagem (Trabalhos em metal) -
Teses. I. Machado, Álisson Rocha, 1956- II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

“Nunca te orgulhes de haver vencido a um adversário, ao que venceste hoje poderá derrotar-te amanhã. A única vitória que perdura é a que se conquista sobre a própria ignorância.”

(Jigoro Kano)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia/Faculdade de Engenharia Mecânica/Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, pela infraestrutura essencial à realização desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pelo incentivo, amizade e orientação, imprescindíveis à realização do presente trabalho.

Ao professor Éder Silva Costa pela dicas práticas necessárias para realização dos testes de usinagem.

Aos amigos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, Cláudio Gomes do Nascimento, Daniel Fernandes da Cunha, Marcelo do Nascimento Sousa, André Alves de Resende, Flávia Cristina de Souza, Mauro Paipa Suarez, Gabriel Miranda Costa e Mauro Araújo Medeiros pelo companheirismo e amizade.

À OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda., nas pessoas dos Srs. Pedro Vaz, Rodrigo Katsuda e Coiti Fukushima pelo fornecimento das ferramentas.

À Oerlikon Balzers por fornecer os revestimentos utilizados nas ferramentas deste trabalho.

À Villares Metals, na pessoa do Sr. Celso Antônio Barbosa, pelo fornecimento do material VP20ISOF utilizado neste trabalho.

À CAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pelo suporte financeiro.

Aos meus pais Moacir Ribeiro de Moura e Maria Terezinha Lopes Moura, importantes incentivadores durante todo o período do mestrado.

MOURA, R. R.. **Fresamento de Aço para Matrizes VP20ISOF com Ferramentas Reafiadas**. 2012. 101 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

O principal objetivo desse trabalho é determinar o desempenho de fresas de topo reafiadas. Para tanto foram testadas fresas de topo inteiriças de metal duro revestidas, nas condições de novas e reafiadas, na usinagem de aços para confecção de matrizes e moldes. Foram utilizados fresas revestidas de TiAlN e AlCrN. Foi variada a velocidade de corte, mantendo-se constantes a profundidade de corte, a penetração de trabalho e o avanço por dente. Os testes foram realizados a seco. No planejamento dos experimentos foi utilizado um fatorial 2^3 , considerando os seguintes fatores (e níveis): velocidade de corte (80 e 100 m/min), revestimento das ferramentas (TiAlN e AlCrN) e a condição das ferramenta (nova e reafiada). Os parâmetros avaliadores de desempenho (variáveis de saída) foram: vida da ferramenta (taxa de desgaste), forças de usinagem, torque e rugosidade superficial. Os resultados mostram de maneira geral que as ferramentas revestidas com AlCrN obtiveram melhor desempenho do que as revestidas com TiAlN. O desempenho das fresas reafiadas foram muito próximo das fresas novas, podendo-se concluir através de análise estatística que não há diferença significativa entre elas, considerando todas as variáveis de saída (resposta).

Palavras-chave: Fresa de topo inteiriça, metal duro, ferramentas reafiadas, TiAlN, AlCrN, rugosidade, forças, torque, vida da ferramenta.

MOURA, R. R.. **Fresamento de Aço para Matrizes VP20ISO com Ferramentas Reafiadas**. 2012. 101 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

The main objective of the present work is to determine the performance of re-sharpened tools. To achieve this, integral cemented carbide end milling tools were tested as new and after they have been re-sharpened, during machining of hard steel used in the mold and die industry. End milling cutters coated with TiAlN and AlCrN were used. The cutting speed was varied, keeping the depth of cut, the cutting width and the feed per tooth constants. Tests were carried out dry. A 2^3 factorial design was used, considering the following factors (and levels): cutting speed (80 and 100 m / min), Tool coating (TiAlN and AlCrN) and the tool condition (new and reground). The evaluators of performance parameters (output variables) were: the tool life (wear rate), machining forces, torque and surface roughness. The results showed that in general the AlCrN coated tools outperformed the TiAlN coated ones. The performance of re-sharpened tools were very similar to those shown by the new tools, allowing concluding that statistically there is no significant difference between the performance of a new tool and the reground, considering all the output (response) variables.

Keywords: end mills, carbide tools, reground tools, TiAlN, AlCrN, surface roughness, forces, torque, tool life.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

$A'\alpha$	Superfície secundária de folga
a_e	Penetração de trabalho (mm)
a_f	Penetração de avanço (mm)
a_p	Profundidade de corte (mm)
APC	Aresta postiça de corte
$A\alpha$	Superfície principal de folga
$A\gamma$	Superfície de saída
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CVD	Chemical Vapor Deposition
D	Diâmetro da Fresa (mm)
f	Avanço (mm/volta)
F_{ap}	Força de apoio
F_c	Força de corte
F_e	Força efetiva de corte
F_f	Força de avanço
F_p	Força passiva
F_t	Força ativa
F_u	Força de usinagem
f_z	Avanço por dente (mm/dente)
n	Rotação da ferramenta (rpm)
P_f	Plano admitido de trabalho
P_o	Plano ortogonal da ferramenta
P_p	Plano dorsal da ferramenta
P_r	Plano de referência da ferramenta
P_s	Plano de corte da ferramenta
PVD	Physical Vapour Deposition
R_a	Desvio aritmético médio da Rugosidade
R_q	Desvio médio quadrático da Rugosidade

R_t	Altura total do perfil da Rugosidade
R_z	Altura máxima do perfil da Rugosidade
S	Aresta principal de corte
S'	Aresta secundária de corte
t_c	Tempo de corte (min)
TRM.....	Taxa de Remoção de Material (mm^3/min)
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{B\text{máx}}$	Desgaste de flanco máximo
v_c	Velocidade de corte
v_e	Velocidade efetiva de corte
v_f	Velocidade de avanço
Z	Número de dentes da fresa

Abreviaturas

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas
 AISI - American Iron and Steel Institute
 ASME - American Society of Mechanical Engineers
 ASTM - American Society for Testing and Materials
 DIN - Deutsches Institut für Normung
 ISO - International Organization for Standardization
 SAE - Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução.....	01
1.1 Objetivo.....	04
1.2 Estrutura.....	04
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica.....	05
2.1 Fresamento.....	05
2.1.1 O processo de fresamento.....	06
2.1.2 Geometria das fresas.....	08
2.1.3 Parâmetros de usinagem.....	12
2.1.4 Forças de usinagem.....	14
2.1.5 Temperatura.....	15
2.2 Desgaste da ferramenta de corte.....	16
2.2.1 Tipos de desgaste.....	17
2.2.2 Mecanismo de desgaste.....	17
2.3 Vida da ferramenta.....	18
2.3.1 Curva de vida de uma ferramenta de corte.....	19
2.4 Aços para moldes e matrizes.....	20
2.4.1 Características dos aços para moldes.....	20
2.4.2 Elementos de liga nos aços.....	22
2.4.3 Aço VP20ISOF.....	23
2.4.4 Usinabilidade melhorada pelo cálcio.....	24
2.4.5 Formação de uma camada protetora.....	26
2.5 Ferramentas de corte.....	27
2.5.1 Metal duro.....	29
2.5.2 Revestimentos.....	31
2.5.3 Tipos de revestimento.....	32
2.6 Rugosidade.....	34

2.7 Usinagem com ferramentas reafiadas.....	36
CAPÍTULO III – Procedimentos Experimentais.....	39
3.1 Metodologia.....	40
3.1.1 Material da peça.....	40
3.1.2 Preparação do corpo de prova.....	42
3.2 Ferramentas.....	43
3.3 Equipamentos utilizados.....	43
3.4 Pré-testes.....	44
3.4.1 Reafiação.....	47
3.4.2 Medição de torque e força.....	48
3.4.3 Medição da rugosidade.....	50
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões.....	53
4.1 Resultados dos testes de vida.....	53
4.1.1 Ferramentas com revestimento TiAlN.....	54
4.1.2 Ferramentas com revestimento AlCrN.....	55
4.1.3 Análise estatística dos dados de desgaste.....	55
4.1.4 Desgaste analisado em MEV.....	57
4.2 Resultados de rugosidade.....	60
4.2.1 Ferramentas com revestimento TiAlN.....	61
4.2.2 Ferramentas com revestimento AlCrN.....	64
4.2.3 Análise estatística dos dados de rugosidade.....	68
4.3 Resultados de força.....	70
4.3.1 Ferramentas com revestimento TiAlN.....	70
4.3.2 Ferramentas com revestimento AlCrN.....	72
4.3.3 Análise estatística dos dados de força.....	75
4.4 Resultados de torque.....	77
4.4.1 Ferramentas com revestimento TiAlN.....	77
4.4.2 Ferramentas com revestimento AlCrN.....	78

4.4.3 Análise estatística dos dados de torque.....	79
4.5 Amostras de Cavaco.....	80
CAPÍTULO V – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83
5.1 Conclusões.....	83
5.1.1 Vida da Ferramenta.....	83
5.1.2 Mecanismo de desgaste das ferramentas.....	84
5.1.3 Rugosidade superficial.....	84
5.1.4 Forças de usinagem.....	85
5.1.5 Torque.....	85
5.1.6 Análise dos cavacos.....	85
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	86
Referências	87

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria busca de forma crescente a obtenção de produtos com elevada qualidade, baixo custo de produção e grande produtividade.

Na indústria metal-mecânica ocorre sempre a busca por novas tecnologias e métodos para reduzir o custo final de produção, seja por meio da otimização do processo, seja pela utilização de ferramentas com novas geometrias, compostos, revestimentos, máquinas mais modernas ou variação nos parâmetros de corte, que visam obter alta produtividade, que por sua vez é um fator determinante para competitividade entre as empresas desse segmento (SUAREZ, 2008).

A usinagem é o termo utilizado para descrever os processos em que uma camada de material, o cavaco, é removida da superfície de uma peça por uma ferramenta em forma de cunha, sendo normalmente utilizada para conferir formas mais precisas, com tolerâncias dimensionais e acabamento superficial especificados, principalmente em peças de metais fundidos ou forjados, pré-fabricadas ou brutas e, conseqüentemente, satisfazer requisitos de projeto. Dentre os processos de usinagem é possível descrever o fresamento, que é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas de corte geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória pré-definida (FERRARESI, 1977). O processo de fresamento é largamente usado em uma variedade de indústrias tais como automotiva, aeroespacial, têxtil e outras (ALMEIDA, 2010).

Os avanços tecnológicos nas áreas de ferramentas e equipamentos tornam o fresamento cada vez mais abrangente e competitivo, atingindo níveis de tolerâncias dimensionais cada vez mais exigentes. Além disso, os excelentes níveis de acabamento e a obtenção de geometrias complexas possibilitam a constante ampliação de sua aplicação na manufatura (DEWES et al., 1999).

A usinagem representa papel fundamental nos processos de fabricação dos mais variados ramos da indústria mecânica. Dentre os diversos processos de usinagem, o fresamento constitui um dos mais importantes pela sua produtividade e flexibilidade (GROOVER, 2002).

Na fabricação de matrizes a preocupação com o conceito de redução de custos não é diferente dos demais segmentos industriais. Para atender a esta necessidade as empresas lançam mão de ferramentas de software e hardware cada vez mais poderosos e usinagem em máquinas CNC, com a utilização de modernos conceitos de ferramental, ferramentas com revestimentos tribológicos e metodologias de usinagem específicas para cada objetivo (RIBEIRO et al., 2006).

O custo de uma ferramenta é composto não somente pelo preço de aquisição da ferramenta, mas também envolve a consideração do número de peças que podem ser produzidas com a mesma. Dessa maneira, qualquer pesquisa que tenha por objetivo um incremento na vida da ferramenta estará contribuindo, conseqüentemente, para a redução do valor agregado desta. A utilização de ferramentas reafiadas proporciona a redução do custo de usinagem e prolonga o tempo de uso da ferramenta em determinado processo (SUAREZ, 2008).

A manufatura de um grande número de componentes na indústria depende de moldes e matrizes para processos como injeção de plástico, forjamento, metalurgia do pó, estampagem e fundição. Normalmente, os moldes e matrizes são compostos por peças com complexas geometrias confeccionadas em materiais de elevada dureza, o que torna a atividade de usinagem mais difícil. Apesar dos moldes e matrizes representarem um pequeno investimento comparado a todo programa de produção, seu projeto e manufatura representam um aspecto fundamental no tempo total de desenvolvimento. Outro fator importante é que, em determinados processos, a qualidade dos moldes e matrizes implica diretamente na qualidade das peças produzidas (OLIVEIRA, 2007).

Atualmente, o processo de injeção de plástico é de fundamental importância na indústria para confecção dos mais diversos produtos, e cada vez mais, há uma grande demanda por peças personalizadas, ou seja, frequentemente há necessidade de se confeccionar novas matrizes (MESQUITA, 2005a).

A usinagem e o acabamento da superfície usinada são etapas críticas no processo de fabricação de moldes e matrizes, correspondendo à maior parte do custo total. Pelo fato de os moldes para plástico possuírem vida útil elevada, em alguns casos superior a dez anos, as propriedades mais importantes se relacionam com as características de processamento, como polibilidade, usinabilidade e resposta ao tratamento térmico. O expressivo volume de material removido na confecção do molde torna a usinabilidade do

aço empregado muito importante, a qual depende de fatores metalúrgicos e das condições de usinagem, como ferramenta e condições de corte, sendo um resultado de interação do metal com a operação de usinagem. A usinabilidade de um aço para moldes é definida ainda a partir das propriedades mecânicas e físicas do aço, relacionadas à sua composição química, mas também aos processos utilizados para sua produção (CASTRO, 2010).

Através da composição química pode-se obter diferentes tipos de aços, com diferentes propriedades mecânicas. Cada elemento químico age no material alterando suas características (para cada elemento há uma faixa ideal em porcentagem), podendo melhorar suas propriedades físicas e até a usinabilidade. Os principais elementos de liga, presentes nos aços para moldes, são os seguintes: carbono, silício, manganês, cromo, vanádio, tungstênio, cobalto e molibdênio. O carbono é um dos principais elementos que, isoladamente ou em conjunto com outros elementos de liga (carbonetos), conferem a dureza e a resistência ao desgaste. Cada elemento é adicionado com uma determinada finalidade (MILAN, 1999).

A Villares Metals produz completa linha de aços para moldes, que atende a maioria das necessidades das ferramentarias e modelações. Hoje é composta de sete tipos de aços, abrangendo desde os aços P20 convencionais até os martensíticos (VILLARES, 2010).

O aço utilizado neste trabalho é o VP20ISOF de mesma designação ASTM, SAE e AISI, sendo o WNr 1.2311 da Norma DIN, segundo Mesquita (2005a) este aço possui a composição usual dos aços AISI P20 empregados em moldes. O sufixo ISO refere-se à tecnologia diferenciada de trabalho do metal líquido e o F indica que é um aço que não contém níquel (portanto de menor custo), voltado para aplicações que requerem elevada dureza superficial. O Aço VP20ISOF é produzido com baixo teor de enxofre e submetido a um tratamento com cálcio, durante o refino secundário na aciaria.

A utilização de ferramentas reafiadas na linha de produção é algo que tem ganhado força ao longo dos anos, principalmente com a introdução no mercado de empresas especializadas neste segmento, mas em contrapartida, a literatura é escassa em trabalhos científicos que mostrem o desempenho destas ferramentas. Esta linha de pesquisa em ferramentas reafiadas é orientada pelo Professor Álisson Rocha Machado, do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU/UFU e teve seu início com a dissertação do aluno José Aécio Gomes de Sousa, “*Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação*” (SOUSA, 2011).

Neste trabalho, o foco foi a utilização de fresas de topo de metal duro integral reafiadas, com o intuito de sempre comparar o desempenho de uma fresa nova com as suas respectivas reafiações.

1.1 Objetivo

O objetivo desse trabalho é determinar o desempenho de fresas de topo inteiriças, de metal duro, com revestimento e geometria própria da OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda., novas e reafiadas, na usinagem de aços para a confecção de moldes e matrizes. O desempenho das fresas reafiadas é comparado com o de fresas novas.

O desempenho das fresas é avaliado por meio:

- a) da vida da ferramenta;
- b) da força de usinagem;
- c) do torque;
- d) da rugosidade;
- e) do desgaste.

Todos os testes foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU / UFU.

1.2 Estrutura

Este trabalho foi estruturado em V capítulos, da seguinte forma:

Capítulo I – Trata-se do capítulo referente á introdução, onde o tema principal do trabalho é abordado. Os objetivos e motivações para realização deste trabalho são expostos neste capítulo.

Capítulo II – Apresenta a revisão bibliográfica. Os principais tópicos relacionados ao tema desta pesquisa são abordados.

Capítulo III – Neste capítulo a metodologia utilizada é apresentada, bem como os equipamentos, materiais, ferramentas e máquinas utilizados.

Capítulo IV – Apresenta os resultados obtidos e a análise destes resultados.

Capítulo V – Traz as conclusões obtidas com este trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas – Lista todas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fresamento

A operação de usinagem feita por meio da máquina fresadora é chamada de fresamento. O fresamento é um processo de usinagem muito versátil. Com uma máquina fresadora e com ferramentas e dispositivos especiais é possível usinar praticamente qualquer peça e superfícies de todos os tipos e formatos.

O fresamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se desloca segundo uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1977).

Existem 2 tipos básicos de fresamento:

- a) *Fresamento periférico (peripheral milling) ou tangencial*: A superfície usinada da peça, gerada por dentes localizados na periferia do corpo da ferramenta, situa-se, de modo geral, num plano paralelo ao eixo da fresa. Na fresagem periférica, a largura de corte é substancialmente maior do que a penetração de trabalho (STEMMER, 1995).
- b) *Fresamento de topo ou frontal (face milling)*: A superfície usinada resulta da ação combinada dos gumes localizados na periferia e na face frontal da fresa, esta geralmente em ângulo reto ao eixo da ferramenta. A superfície fresada é plana, sem qualquer relação com o contorno dos dentes, salvo no fresamento contra um ressalto. No fresamento frontal, a penetração de trabalho é substancialmente maior do que a profundidade de corte (STEMMER, 1995).

A Figura 2.1 ilustra os conceitos abordados anteriormente sobre o fresamento frontal ou de topo e o periférico ou tangencial.

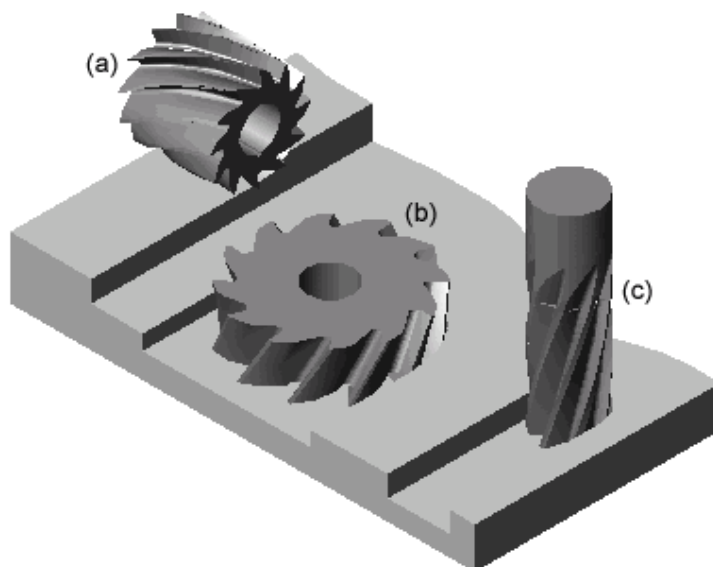


Figura 2.1 - A ferramenta (a) é uma fresa cilíndrica tangencial, a (b) é uma fresa cilíndrico-frontal e a (c) é uma fresa de topo com haste cilíndrica (CIMM, 2007).

2.1.1 O processo de fresamento

O fresamento é um processo de gerar superfícies usinadas pela remoção progressiva de uma quantidade pré-determinada de material da peça de trabalho a uma taxa de movimento de avanço relativamente baixa mediante uma fresa que gira (movimento de corte) a uma velocidade comparativamente alta. A característica principal do processo de fresamento é que cada aresta de corte da fresa remove a sua parcela do material na forma de cavacos individuais pequenos. Algumas características do processo de fresamento são:

- Processo de remoção de cavaco com movimento de corte circular da ferramenta;
- Ferramenta com um ou vários gumes atuando simultaneamente para a geração de superfícies;
- Processo utilizado na geração de superfícies que não são de revolução, como as produzidas no torneamento;
- O movimento de corte transcorre de forma normal ou oblíqua a direção de rotação da ferramenta.

As máquinas fresadoras são classificadas geralmente de acordo com a posição do seu eixo-árvore em relação à mesa de trabalho, onde se fixa a peça a ser usinada. O eixo-

árvore é a parte da máquina onde se fixa a ferramenta. As fresadoras classificam-se em relação ao eixo-árvore em horizontal, vertical e universal.

A fresadora é horizontal quando seu eixo-árvore é paralelo à mesa da máquina. Se o eixo-árvore for perpendicular à mesa da máquina, diz-se que se trata de uma fresadora vertical.

A fresadora universal dispõe de dois eixos-árvore, um horizontal e outro vertical. O eixo vertical situa-se no cabeçote, parte superior da máquina. O eixo horizontal localiza-se no corpo da máquina. O fato de a fresadora universal dispor de dois eixos permite que ela seja utilizada tanto na posição horizontal quanto na vertical. Também existem as fresadoras CNC que dispõem de vários eixos, podendo ser de até nove eixos e podem chegar a velocidades de 40.000 rpm. A Figura 2.2 ilustra uma fresadora horizontal (a) e uma fresadora vertical (b).

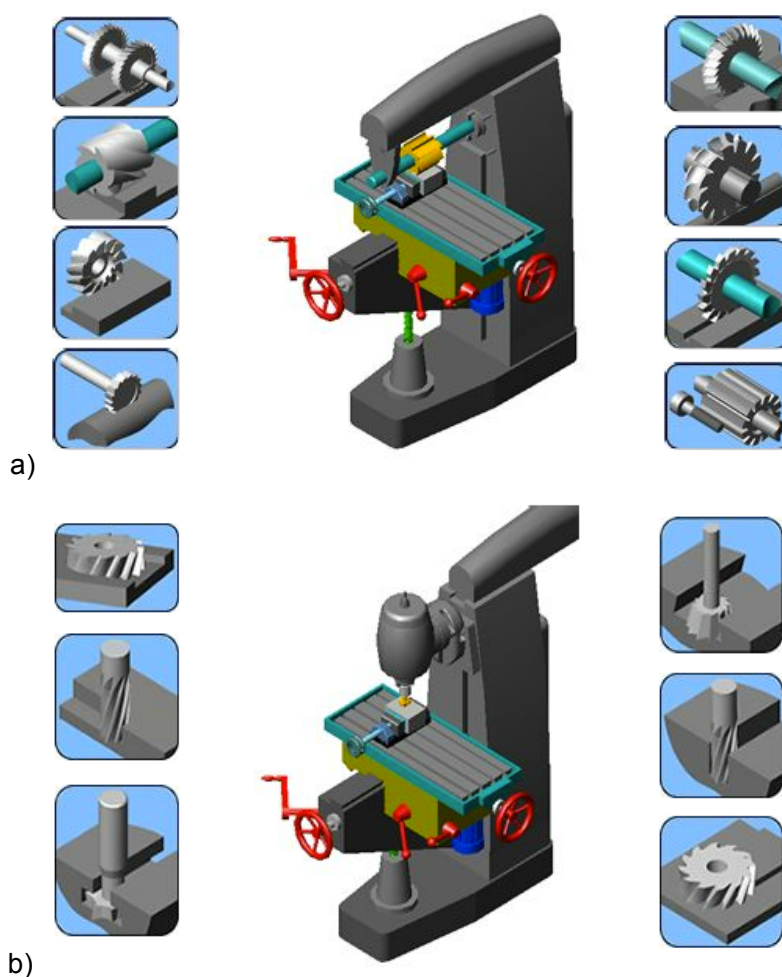


Figura 2.2 – Tipos de máquina-ferramenta, (a) fresadora horizontal e (b) fresadora vertical (CIMM, 2007).




2.1.2 Geometria das fresas

Para cada aplicação, tipo de operação e de material adota-se uma ferramenta de geometria específica para cada caso.

Segundo Suarez (2008) Além das diferentes geometrias, uma fresa pode apresentar diferentes formatos projetados com base nas superfícies a gerar na peça, podendo mudar, por exemplo, a quantidade de dentes e a distribuição das cunhas cortantes (frontal ou tangencial). Em geral, existe uma faixa do número de dentes na qual se consegue vantagens no acabamento, no controle da vibração e na temperatura, fatores que tem grande importância neste trabalho.

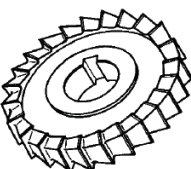
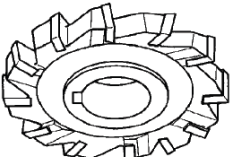
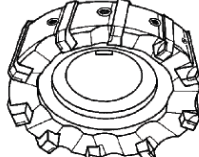



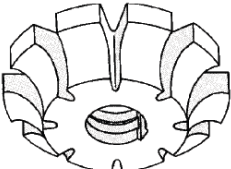
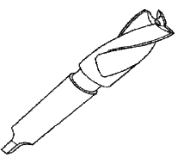
A Tabela 2.1 mostra os diferentes tipos de hélices que podem ser utilizados na usinagem com fresas cilíndricas.

Tabela 2.1 – Tipos de geometria das fresas (CIMM, 2010).

Tipo	Aplicação	Ferramenta
N	Para usinagem leve, com dentes paralelos ao eixo de rotação para larguras de até 19 mm. Para tamanhos maiores têm ângulos de hélice entre 15 e 25°.	
H	Para usinagem pesada, com larguras superiores a 50 mm, têm ângulo de hélice de 25 a 45° para obter um impacto mais favorável na entrada e uma ação de corte mais uniforme e distribuída.	
W	São fresas cilíndricas com ângulo de hélice superior a 45°, com grande rendimento, indicadas para a usinagem de alumínio e metais leves em geral. As ranhuras tem grande capacidade de alojar os cavacos (dentes bem espaçados) e o ângulo de saída lateral bastante grande.	

A Tabela 2.2 classifica as fresas de acordo com sua estrutura e quanto a sua forma geométrica.

Tabela 2.2 – Classificação das fresas quanto à sua estrutura e forma geométrica (STOETERAU et al., 2004).

Classificação das fresas quanto à estrutura		
Fresa inteiraça	Fresa com insertos	Fresa com dentes postiços
		
Classificação das fresas quanto à forma geométrica		
Fresa cilíndrica	Fresa de disco	Fresa Angular
		
Fresa detalonada	Fresa de topo	
		

Segundo Machado et al. (2009) o sistema de referência é necessário para a determinação da geometria da cunha de corte da ferramenta, durante o projeto, execução e controle da mesma. A figura 2.3 e 2.4 ilustram os planos em uma fresa cilíndrica segundo a Norma ABNT 6163 (1980). O sistema de referência pode ser dividido em:

- *Plano de Referência da Ferramenta (P_r)* – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular à direção admitida de corte. A direção admitida de corte é escolhida de maneira que o plano de referência da ferramenta (P_r) seja paralelo ou perpendicular a uma superfície ou eixo da ferramenta.
- *Plano de Corte da Ferramenta (P_s)* – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é tangente, ou contém a aresta de corte, e perpendicular ao plano de referência da ferramenta (P_r).
- *Plano Ortogonal da Ferramenta (P_o)* – é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência da ferramenta (P_r) e de corte da ferramenta (P_s).
- *Plano Admitido de Trabalho (P_t)* - é o plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular ao plano de referência da ferramenta (P_r) e paralelo à

direção admitida de avanço. Este plano contém as direções de avanço e de corte.

- *Plano Dorsal da Ferramenta (P_p)* – plano que, passando pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular aos planos de referência da ferramenta (P_r) e admitido de trabalho (P_f).

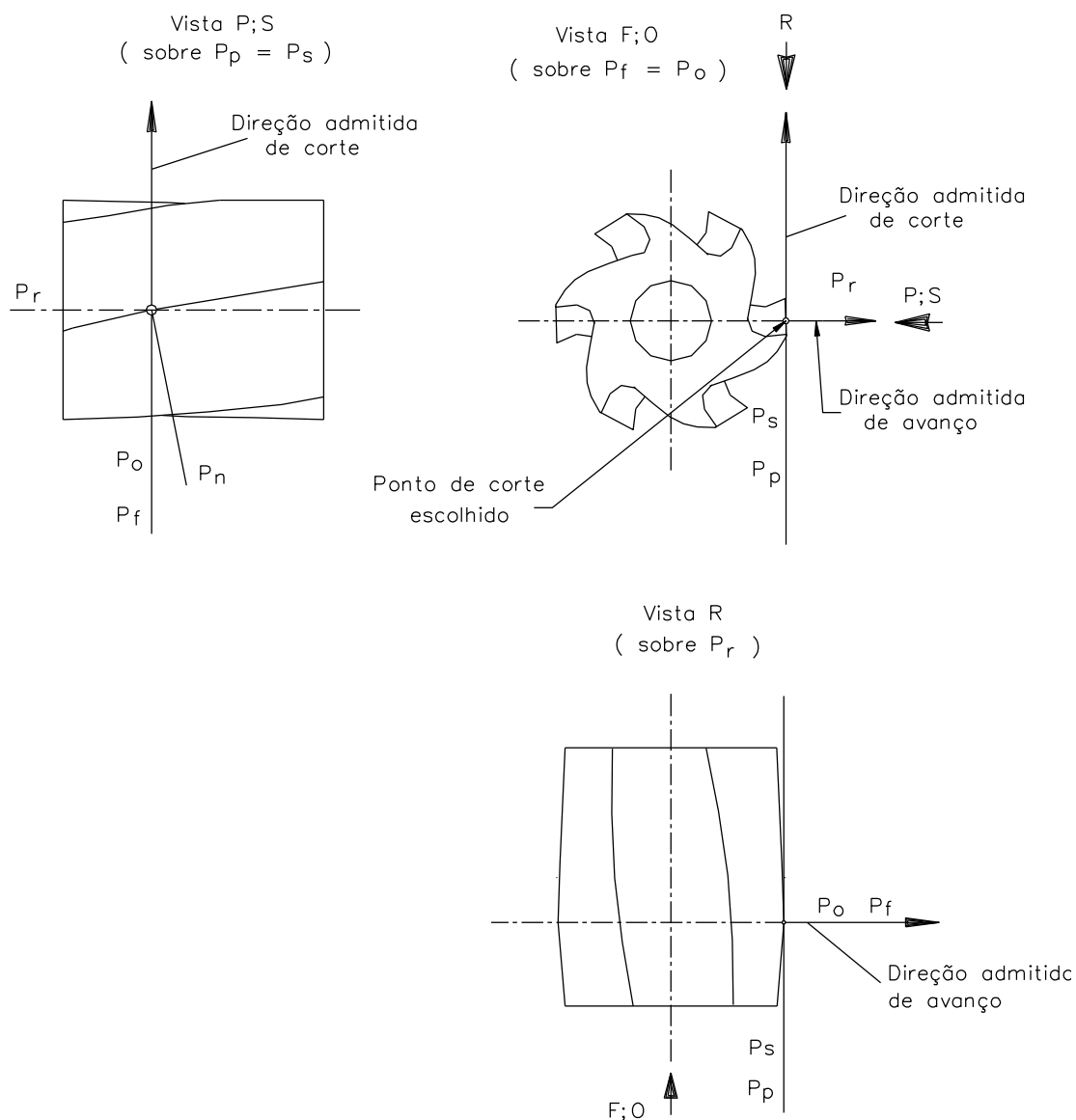


Figura 2.3 – Sistema efetivo de referência numa fresa cilíndrica (MACHADO; SILVA, 2004).

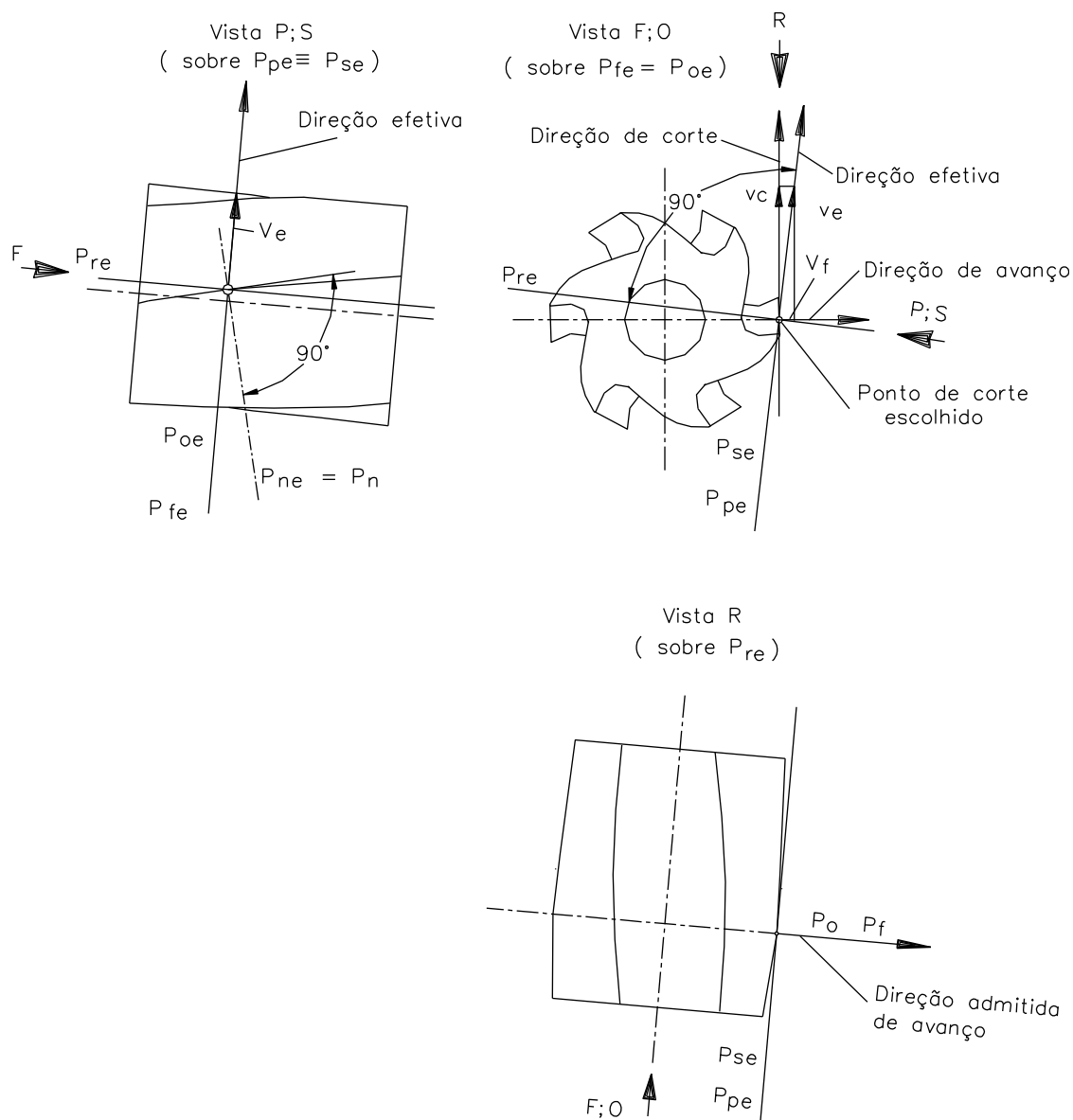


Figura 2.4 – Sistema de referência numa fresa cilíndrica, segunda vista (MACHADO; SILVA, 2004).

Segundo Machado et al. (2009), a geometria da ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material da ferramenta, se a sua geometria não for preparada adequadamente, não haverá êxito na operação. Tamanha é sua importância que se faz necessário normalizar, de maneira mais conveniente possível, os ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre profissionais e a literatura especializada. Como na norma brasileira NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria da Cunha Cortante: Terminologia (ABNT, 1980) trata desse assunto.

Segundo Machado et al., as seguintes definições são adotadas e ilustradas na Fig. 2.5:

- A *superfície de saída* (A_γ) é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se move e por *superfície de folga* entende-se a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem.
- Distinguem-se a *superfície principal de folga* (A_α) e a *superfície secundária de folga* ($A_{\alpha'}$).
- O cavaco é formado pela ação da cunha de corte, composta pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta.
- As arestas de corte são definidas pela interseção das superfícies de saída e de folga.
- A *aresta principal de corte* (S) é a aresta de corte cuja cunha de corte correspondente indica a direção de avanço no plano de trabalho. A *aresta secundária de corte* (S') indica a direção contrária à de avanço.
- A ponta de corte é a interseção das arestas principal e secundária de corte.

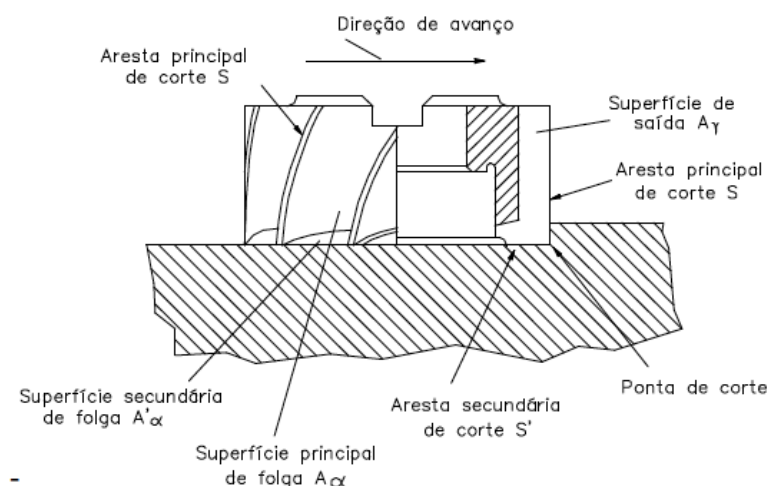


Figura 2.5 - Cunha de corte de uma fresa frontal ou de topo (ABTN NBR 6163/1980).

2.1.3 Parâmetros de Usinagem

Símbolos e unidades dos parâmetros para fresamento propostos por Diniz; Marcondes; Coppini (2008) são mostrados a seguir:

- *Movimento de rotação* (n) [rpm] - É o número de voltas por unidade de tempo que a fresa dá em torno do seu eixo;
- *Velocidade de corte* (v_c) [m/min] - É a velocidade instantânea do ponto de referência da ferramenta de corte, segundo a direção e sentido de corte. No fresamento, o movimento de corte é proporcionado pela rotação da ferramenta. A

velocidade de corte é, então, uma velocidade tangencial. As grandezas relacionadas ao movimento de corte recebem o índice “c”. (Ex: v_c , Velocidade de corte);

- *Avanço por revolução (f) [mm/rev]* - No fresamento, o avanço é a distância linear percorrida pelo conjunto de dentes que compõem uma ferramenta durante uma revolução completa dessa ferramenta, medida no plano de trabalho. As grandezas relacionadas ao movimento de avanço recebem o índice “f”. (Ex: v_f , Velocidade de avanço); *Avanço por dente (f_z) [mm/dente]* - É a distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo em que dois dentes consecutivos entram em corte. Também é medido no plano de trabalho.
- *Velocidade de avanço (v_f) [mm/min]* - É a velocidade instantânea do ponto de referencia da ferramenta de corte, segundo a direção e sentido de avanço. No fresamento, o movimento de avanço é provocado pela translação da ferramenta sobre a peça ou vice-versa. A direção da velocidade de avanço no fresamento de topo é, então, radial ao eixo da ferramenta.
- *Diâmetro (D) [mm]* - É o diâmetro da fresa.
- *Número de dentes (z)* - É o número total de dentes que a fresa contém.
- *Profundidade de corte ou largura de corte (a_p) [mm]* - É a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (na direção do eixo da fresa). No fresamento frontal ou de topo, a_p corresponde à profundidade de corte e no fresamento tangencial, à largura de corte.
- *Penetração de trabalho (a_e) [mm]* - É a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e na direção perpendicular à direção de avanço.
- *Penetração de avanço (a_f) [mm]* - Grandeza de penetração da ferramenta medida no plano de trabalho e na direção de avanço.
- *Tempo de corte (t_c) [min]* - É o tempo em que a ferramenta está efetivamente em corte (ou retirando cavaco).
- *Taxa de remoção de material (TRM) [mm³/min]* - É o volume de material usinado por unidade de tempo, dado pelo produto: $v_f \cdot a_e \cdot a_p$.

O fresamento pode ser ainda classificado em concordante e discordante de acordo com os sentidos das velocidades de corte e de avanço. Quando a velocidade de corte e avanço possuem o mesmo sentido o fresamento é concordante, quando o sentido é contrario o fresamento é discordante.

2.1.4 Forças de Usinagem

O estudo das forças de usinagem permite otimizar parâmetros de corte e assim assegurar menor gasto de energia, melhor acabamento e maior vida da ferramenta. Além disso, as forças de usinagem são determinantes para a qualidade geométrica e dimensional da superfície usinada, uma vez que suas componentes podem induzir deflexões em ferramentas mais esbeltas. Como no fresamento a área da seção transversal do cavaco varia periodicamente, as forças resultantes, observadas na movimentação que ocorre entre peça e ferramenta também variam, podendo gerar vibrações excessivas. O material a ser usinado e seu estado de dureza, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte, o material da ferramenta, o material de recobrimento, a geometria da ferramenta escolhida, o uso ou não de fluido de corte, o desgaste da ferramenta, os efeitos térmicos, o atrito e as tensões geradas na remoção do cavaco são fatores que, em maior ou menor grau, afetam as componentes das forças de usinagem na operação de fresamento. Dessa forma, pode-se afirmar que o monitoramento destas forças é útil para prever ou acompanhar o desempenho global do processo (RIBEIRO, 2006).

Segundo Diniz et al. (2008), o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

Segundo Diniz et al. (2008), a norma DIN 6584 (1982) descreve os termos técnicos de usinagem como força, energia, trabalho e potência. A decomposição da Força de usinagem (F_u) ilustradas na Fig. 2.6, está de acordo com a Norma DIN 6584, onde F_u pode ser decomposta em:

- *Força ativa (F_t)* – componente que está no plano de trabalho.
- *Força passiva ou de profundidade (F_p)* – componente perpendicular ao plano de trabalho.

A Força ativa (F_t) por sua vez pode ser decomposta em:

- *Força de corte (F_c)* – projeção de F_u sobre a direção de corte.
- *Força de avanço (F_f)* – projeção de F_u sobre a direção de avanço.
- *Força de apoio (F_{ap})* – projeção de F_u sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho.
- *Força efetiva de corte (F_e)* – projeção de F_u sobre a direção efetiva de corte.

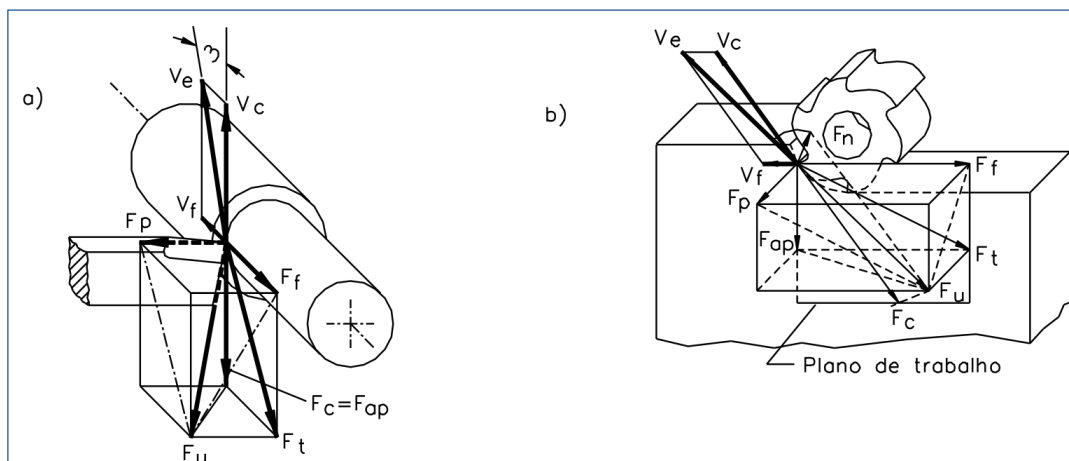


Figura 2.6 – Força de usinagem e seus componentes para os processos de torneamento e de fresamento (MACHADO; SILVA, 2004, p. 78).

Segundo Machado e Silva (2004), o aumento do avanço e da profundidade de corte, por aumentar diretamente as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, causam um aumento da força de usinagem, numa proporção direta, quase que linear. Entretanto é verificado experimentalmente que o efeito do avanço é maior que da profundidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte a força tende a diminuir devido a maior geração de calor e consequente redução da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, e pela ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta.

2.1.5 Temperatura

A maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor, próximo à aresta cortante da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta ou indiretamente por conta desse aquecimento (TRENT, 1988a, apud MACHADO et al., 2009). O custo da usinagem depende da quantidade de remoção de metal e pode ser reduzido aumentando-se a velocidade de corte e/ou a velocidade de avanço, porém, há limites para essas velocidades, acima dos quais a vida da ferramenta é drasticamente diminuída (e o custo, elevado) (MACHADO et al., 2009).

Na usinagem com ferramenta de geometria definida, a maior parte do calor gerado vai para o cavaco (aproximadamente 75%) enquanto que a porcentagem de calor que se dissipa para a ferramenta é bem menor. Segundo Machado e Silva (2004) mesmo que esta porcentagem seja pequena a temperatura atinge valores que podem exceder 1100 °C, o que comprometerá fortemente a vida da ferramenta.

Segundo Dewes et al. (1999, apud SUAREZ, 2008), outro fator que apresenta grande influência na temperatura de corte é o estado de afiação da ferramenta. Em uma operação de desbaste, os valores de temperatura atingidos por uma ferramenta com um desgaste de flanco de 0,3 mm são quase quatro vezes maiores do que os valores encontrados quando a ferramenta utilizada é nova. Isto se dá devido ao fato de que uma das principais fontes geradoras de calor na usinagem é o atrito entre ferramenta e peça, e quando a ferramenta utilizada apresenta desgaste de flanco o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta tende a aumentar consideravelmente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001, apud SUAREZ, 2008).

McGee (1979, apud SUAREZ, 2008) propôs que a temperatura da interface cavaco-ferramenta sobe à medida que a velocidade de corte aumenta, até que o ponto de fusão do material usinado seja atingido.

Em cortes interrompidos, além de temperaturas elevadas, existem choques térmicos sofridos pela ferramenta, que também são muito importantes para o desempenho do processo, pois a vida da ferramenta depende diretamente da intensidade destes choques. Além disso, os choques mecânicos geram fenômenos de vibração e forças regenerativas que afetam a vida da ferramenta (SUAREZ, 2008).

O modelo proposto por Dagiloke et al. (1995, apud SUAREZ, 2008) determinou que a temperatura do cavaco e da superfície de saída da ferramenta aumenta progressivamente com o aumento da velocidade de corte em uma faixa de valores que vai até 10.000 m/min. Nos mesmos ensaios modelados, observou-se que a temperatura da peça sofre uma pequena redução com o aumento da velocidade de corte. Os autores concluíram que este fenômeno ocorre em função da redução do tempo que o calor gerado tem para se dissipar pela peça. Com o aumento da velocidade de corte o calor se dissipa principalmente pela superfície de saída da ferramenta e pelo cavaco, tendo menos tempo para migrar para a peça.

2.2 Desgaste da ferramenta de corte

Segundo Diniz et al. (2008), diversos são os tipos de desgaste e avarias que acontecem em uma ferramenta de usinagem. Antes de defini-los é importante diferenciá-los. Desgaste é a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte. As demais ocorrências são denominadas de avarias.

Podem-se distinguir três fenômenos pelos quais uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica (MACHADO et al., 2009). Pode-se definir estes fenômenos da seguinte maneira:

- *Avaria* – fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causando pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. A quebra e o lascamento levam à destruição total ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de forma repentina e imprevisível.
- *Desgaste* – a Norma ISO 3685 (1993) define desgaste em ferramentas como a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”.
- *Deformação Plástica* – mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material, que ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes na superfície da ferramenta de corte.

2.2.1 Tipos de desgaste

Segundo Machado et al. (2009), mesmo se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sujeita ao desgaste. Verifica-se, assim, um desgaste progressivo tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída da ferramenta. Os três tipos de desgaste mais comuns segundo Diniz et al. (2008) são:

- Desgaste de cratera – ocorre na superfície de saída da ferramenta, causada pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco.
- Desgaste de flanco – ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça.
- Desgaste de entalhe – ocorre na região de interface entre peça, ferramenta e cavaco, no lado exposto da superfície de corte. A formação do entalhe envolve um mecanismo de aderência e arrancamento em regiões onde ocorre uma alta taxa de encruamento e conseqüentemente se tornando uma região de dureza mais elevada.

2.2.2 Mecanismo de desgaste

Alguns fenômenos são responsáveis por gerar os desgastes da ferramenta, entre eles os principais são:

- *Adesão* – se duas superfícies metálicas são postas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte forma-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência desse extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Assim, partículas da superfície de um metal

migram para a superfície do outro. O fenômeno de aderência está presente na formação da aresta postiça de corte (DINIZ et al., 2008).

- *Abrasão* – é um dos principais causas do desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste frontal quanto o de cratera podem ser gerados pela abrasão. O desgaste é gerado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte que reduz a dureza da ferramenta, essas partículas são responsáveis pelo deslocamento de material da superfície da ferramenta de corte.
- *Difusão* – A difusão é um fenômeno influenciado diretamente pela temperatura na zona de corte e consiste na transferência de átomos de um material para outro. A solubilidade dos materiais envolvidos também deve ser levado em consideração.
- *Oxidação* – Segundo Diniz et al. (2008), altas temperaturas e presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) geram oxidação para a maioria dos metais. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nessa região.

2.3 Vida da ferramenta

Segundo Ferraresi (1970) a vida da ferramenta pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério de vida previamente estabelecido. Geralmente o grau de desgaste é o fator que determinará o fim de vida. São vários os fatores que determinam o fim da vida da ferramenta e por consequência o valor máximo do desgaste. Entre eles pode-se citar:

- receio de quebra da aresta de corte.
- temperaturas elevadas atingidas nas superfícies de contato da ferramenta.
- impossibilidade de manter tolerâncias dimensionais especificadas.
- acabamento superficial obtido é insatisfatório.
- aumento das forças de usinagem a níveis muito elevados.
- aumento excessivo no nível dos ruídos e vibrações.

Segundo Milan (1999) controlando estes fatores é possível determinar quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. Porém, muitas vezes é necessária a habilidade do operador para detectar estes sintomas de fim de vida e evitar um possível dano maior, da ferramenta, da peça ou até mesmo da máquina ferramenta, causado por uma falha catastrófica da ferramenta. Para evitar este problema, após fixado o critério é possível utilizar alguns parâmetros para expressar a vida da ferramenta, tais como:

- tempo total de trabalho (min).
- percurso de corte (Km).
- percurso de avanço (mm).
- número de peças produzidas.
- volume de material removido.
- tempo de vida para uma determinada v_c .

2.3.1 Curva de vida de uma ferramenta de corte

As curvas de vida de uma ferramenta expressam a vida da ferramenta, em T (tempo efetivo) geralmente expresso em minutos em função da velocidade de corte. A vida da ferramenta também pode ser expressada por outros fatores tais como:

- tempo total.
- o percurso de corte.
- o percurso de avanço.

Esta curva possibilitará que se determine o tempo de trabalho de uma ferramenta até que o nível crítico de desgaste (desgaste de flanco máximo, VB_{\max}) seja atingido. Para obtenção das curvas $T \times v_c$ para uma determinada ferramenta, é necessário que primeiramente sejam construídos gráficos auxiliares, que forneçam o desgaste da ferramenta para diferentes velocidades de corte e tempos de trabalho, em determinadas condições de usinagem do par ferramenta-peça:

- geometria da ferramenta.
- avanço.
- profundidade de corte.
- penetração de trabalho.

A Figura 2.7a e 2.7b ilustra, respectivamente, as curvas (auxiliares) de desgaste em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte, em determinadas condições de usinagem e a curva de vida de uma ferramenta para um dado desgaste de flanco, determinadas a partir das curvas de desgaste.

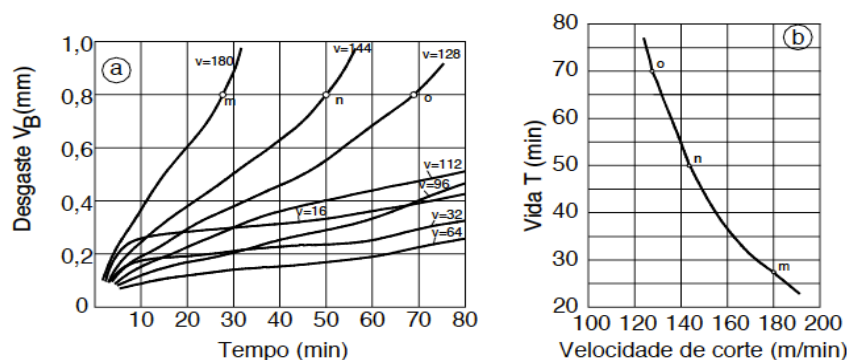


Figura 2.7 – Determinação da curva de vida de uma ferramenta $T \times V_c$ (FERRARESI, 1970, p. 457).

2.4 Aços para moldes e matrizes

As matrizes e moldes são confeccionadas com materiais que possuem elevada dureza, propriedades mecânicas e características químicas adequadas para produção de determinadas peças. Muitas vezes as peças a serem produzidas através do uso de moldes apresentam geometria complexa, aliado às características já citadas anteriormente faz com que a produção dos moldes e matrizes seja uma das mais difíceis e exigentes tarefas da engenharia.

2.4.1 Características dos aços para moldes

De uma maneira geral, os materiais para fabricação de moldes devem conter algumas características que são desejáveis à peça acabada, bem como para facilitar sua fabricação. Barbosa (2001, apud RAMOS; MACHADO, 2005), dividiu estas características quanto ao uso:

- propriedades mecânicas.
- respostas a nitretação.
- facilidade de polimento.
- respostas a texturização.
- condutividade térmica.
- resistência à corrosão (inoxibilidade).
- reprodutividade.
- mínimo custo.

e a fabricação:

- usinabilidade.
- Soldabilidade.
- Reprodutividade.
- estabilidade dimensional.
- mínimo risco e complexidade.

Segundo (MILAN, 1999), são várias as propriedades que um aço destinado a confecção de matrizes e moldes devem possuir afim de desempenhar satisfatoriamente o serviço ao qual será destinado. Pode-se citar os seguintes:

- *Dureza a temperatura ambiente* - propriedade que pode ser obtida com a adição de elevados teores de elementos de liga ou principalmente através da adição de carbono com a finalidade de formação de carbonetos duros. Como em todo processo de usinagem, também as matrizes devem ter uma dureza superior à dureza da peça a qual exercerá sua ação de conformação.
- *Resistência ao desgaste* - nesta propriedade, também o carbono exerce uma importante função sendo um dos elementos mais importantes. A resistência ao desgaste das matrizes e moldes garante que as peças produzidas, dentro de um determinado lote, estejam dentro de especificações dimensionais.
- *Temperabilidade* - propriedade importante devido a uma maior penetração de dureza garantir melhor uniformidade de característicos mecânicos em seções apreciáveis.
- *Tenacidade* - definida como “capacidade do material em deformar-se antes de se romper” ou como “capacidade do material absorver considerável quantidade de energia sem romper”, ou seja, suportar a carga ou tensão máxima sem se romper (CHIAVERINI, 1988, apud MILAN, 1999).
- *Resistência mecânica* - propriedade necessária, pois os aços devem suportar esforços estáticos e dinâmicos sem apresentar deformações plásticas.
- *Dureza a quente* - o material deve manter um certo nível de dureza a temperaturas elevadas pois dependendo do processo há uma grande geração de calor que pode comprometer a confecção da peça. Como o material depositado nos moldes para confecção das peças sempre estão a altas temperaturas, esta é uma propriedade fundamental que os materiais destinados a matrizes e moldes devem possuir.
- *Tamanho de grão* - geralmente as características mecânicas superiores são obtidas com um refino do grão, ou seja, com um grão de menor tamanho ou uma granulação mais fina.

- *Usinabilidade* - evidentemente as propriedades anteriormente citadas, principalmente a elevada dureza e a resistência ao desgaste, não podem ser associadas com uma boa usinabilidade. Quanto maior for o teor de elementos de liga menor será a usinabilidade, devido a formação dos duros carbonetos e ainda quanto maior o teor de carbono e elementos de liga, mais difícil é diminuir a dureza do material através do recozimento. Este é um problema relativamente complexo em relação a usinagem destes aços, que são necessários na confecção de matrizes e moldes (CHIAVERINI, 1988).
- *Composição química* - através da composição química pode-se obter diferentes tipos de aços com diferentes propriedades mecânicas. Cada elemento químico age no material alterando suas características (para cada elemento há uma faixa ideal em porcentagem) podendo melhorar suas propriedades físicas e até a usinabilidade. Os principais elementos de liga presentes nos aços são os seguintes: carbono, silício, manganês, cromo, vanádio, tungstênio, cobalto e molibdênio. O carbono é um dos principais elementos que, isoladamente ou em conjunto com outros elementos de liga (carbonetos), conferem a dureza e a resistência ao desgaste. Cada elemento é adicionado com uma determinada finalidade.
- *Tratamento térmico* - Em todos aços não comuns, o seu tratamento térmico constitui talvez a mais importante fase de fabricação, pois é ele que irá determinar a estrutura e as propriedades finais, de acordo com as condições e as necessidades de serviço. Tal fato cresce de importância nos aços para ferramentas e matrizes, devido às condições extremamente especiais de serviço e utilização desses materiais e devido, nos tipos altamente ligados, à complexidade de sua composição química e estrutura (CHIAVERINI, 1988).

2.4.2 Elementos de liga nos aços

Alguns elementos de liga são adicionados aos aços para compor suas características mecânicas e sua usinabilidade, os mais comuns são [CHIAVERINI, 2004]:

- *Enxofre (S)* - fragiliza o material para teores acima de 0,12 %. Adicionado nos aços de usinagem fácil.
- *Fósforo (P)* - endurece, aumenta resistência e melhora usinabilidade, acima de 0,5% fragiliza.
- *Alumínio (Al)* - desoxidante, refinador de grão, dissolve alguns carbonetos, formador de nitretos, aumenta endurecibilidade se dissolvido na austenita. Geralmente em teores até 1,1%.
- *Cromo (Cr)* - aumenta a resistência à corrosão em altas temperaturas, resistente

ao desgaste (altos teores).

- *Silício (Si)* - ajuda a eliminar carbonetos, desoxidante, melhora resistência à corrosão e mecânica. Até 2%.
- *Molibdênio (Mo)* - aumenta a temperatura de estabilidade da austenita, elimina fragilização do revenido, eleva dureza e resistência à fluência. Teores até 3%.
- *Nitrogênio (Ni)* - aumenta a resistência mecânica e tenacidade, ajuda a eliminar carbonetos.
- *Manganês (Mn)* - desoxidante, ajuda a eliminar o S, endurecedor, aumenta temperabilidade. Teores até 3%.
- *Tungstênio (W)* - em aços ferramenta para melhorar a resistência ao desgaste, aumenta dureza. Até 6%.
- *Cobalto (Co)* - em aços ferramentas, aumenta dureza.
- *Vanádio (V) e Níobio (Nb)* - endurecedores, eleva a temperatura de crescimento da austenita, resiste ao revenido

2.4.3 Aço VP20ISOF

O catálogo fornecido pela Villares Metals (2011) caracteriza o aço VP20ISOF como sendo um aço elaborado através de desgaseificação a vácuo, com usinabilidade melhorada por tratamento com cálcio.

Onde os principais benefícios são:

- Boa usinabilidade, tanto no estado recozido como beneficiado.
- Boa soldabilidade.
- Excelente polibilidade.
- Boa uniformidade de dureza.
- Boa reprodutividade de desempenho.

Fornecido temperado e revenido, com dureza de 285 a 321 HB (28 a 37 Rockwell C). Pode também ser fornecido sob consulta no estado recozido ou com outros valores de dureza.

Quanto a seu formato pode ser fornecido:

- Redondo: max. 680 mm.
- Quadrado: max. 600 mm.
- Retangular: área max. 6000 cm^2 (p/ espessura máx. 600 mm).
- Outras dimensões, sob encomenda.

Aplicação:

- Moldes para injeção de plásticos não clorados.
- Matrizes para extrusão de termoplásticos não clorados.
- Moldes para sopro.
- Não é recomendada a aplicação em moldes com espessura superior a 600 mm.

Este aço é fornecido no estado beneficiado, possui boa polibilidade, resposta à texturização e a mesma melhoria de usinabilidade do VP20ISO. O principal diferencial do VP20ISOF em relação do VP20ISO é a ausência de níquel, isso faz com que o custo de produção do VP20ISOF seja menor. A tabela 2.3 mostra a composição química do aço.

Tabela 2.3 – Composição química do VP20ISOF.

C	Mn	Si	Al	Cr	Mo	P	S	Fe
0,30	1,60	0,27	0,016	1,80	0,20	0,013	0,015	Balanço

A Villares Metals produz completa linha de aços para moldes que atende a maioria das necessidades das ferramentarias e modelações. Composta de sete tipos de aços, a linha abrange deste os aços P20 convencionais até os martensíticos. O aço utilizado neste trabalho será o VP20ISOF, que tem a composição usual dos aços AISI P20 (de mesma designação ASTM, SAE e AISI, WNr 1.2311 da Norma DIN) empregados em moldes. O sufixo ISO refere-se à tecnologia diferenciada de trabalho do metal líquido e o F indica que é um aço que não contém níquel (portanto de menor custo), voltado para aplicações que requerem elevada dureza superficial. O Aço VP20ISOF é produzido com baixo teor de enxofre e submetido a um tratamento com cálcio, durante o refino secundário na aciaria (MESQUITA, 2005a).

2.4.4 Usinabilidade melhorada pelo cálcio

Na tentativa de se obter uma redução nos custos de fabricação no processo de usinagem através de maiores taxas de remoção de material e aumento de vida da ferramenta de corte, preservando as propriedades mecânicas dos aços, levou ao desenvolvimento dos aços com usinabilidade melhorada pela desoxidação com o cálcio, muitas vezes denominados aços tratados ao cálcio.

O aço VP20ISOF foi desenvolvido de modo a possuir elevada usinabilidade sem perda de polibilidade, sendo produzido com baixo teor de enxofre e submetido a um tratamento com cálcio, durante o refino secundário na aciaria.

Segundo Milan (1999), o aço tratado com cálcio proporciona uma melhora na usinabilidade através de um controle da morfologia das inclusões duras do tipo alumina e silicatos e da formação de uma camada protetora de óxido na interface cavaco-ferramenta, durante a usinagem, diminuindo, assim, o desgaste da ferramenta, a altas velocidades de corte.

A metalurgia do material da peça tem uma grande influência sobre a usinabilidade. Partículas de segunda fase ou inclusões no aço podem ter efeito maléfico ou benéfico sobre a usinabilidade, dependendo do tipo, quantidade, forma, tamanho e distribuição. O mecanismo pelo qual as inclusões podem afetar positivamente o desgaste da ferramenta é usualmente explicado pelos fatos de que elas podem agir como lubrificantes entre o cavaco e a ferramenta e auxiliam na formação do cavaco ao redor da aresta de corte, reduzindo a tensão na zona de cisalhamento. Além de afetar a vida da ferramenta, as inclusões podem fazer o cavaco se quebrar mais facilmente. Óxidos duros de Al usualmente aumentam o desgaste das ferramentas de metal duro enquanto a formação de uma camada protetora de óxido ou uma camada de sulfeto sobre a superfície da ferramenta pode diminuir o desgaste (KANKAANPÄÄ et al., 1987).

Milan (1999) também afirma que a desoxidação com cálcio não altera as demais propriedades, como as propriedades mecânicas ou mesmo a resposta ao tratamento térmico (como a dureza, por exemplo). O cálcio ajuda, ainda, na flotação de inclusões de alumina pela formação de aluminatos de cálcio que tem melhor flotabilidade no aço líquido. O aço tem melhores propriedades de tenacidade pela redução dos níveis de inclusões. A máxima solubilidade do cálcio no aço líquido a 1600 °C é de aproximadamente 100 ppm (0,010 %). No estado sólido é típico encontrar valores de no máximo 20 a 30 ppm. Nesses níveis e considerando que a maior parte está combinada na forma de sulfetos e óxidos, o efeito é inexistente.

Mesquita e Barbosa (2005b) concluíram que o tratamento com cálcio é o grande responsável pela melhora na usinabilidade. O cálcio reduz o efeito danoso das inclusões duras, como inclusões de alumina e silicatos, pois forma inclusões ternárias do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$. Ocorre ainda a formação de sulfeto de cálcio na superfície das inclusões. Esse “envelope” de sulfeto de cálcio minimiza o efeito deletério das inclusões abrasivas sobre a aresta da ferramenta de corte. O resultado conjunto desses fatores gera a melhoria de usinabilidade observada. Como tais inclusões não possuem fração demasiadamente elevada e não tornam-se alongadas durante a conformação, não existe perda de polibilidade do material.

A desoxidação especial usando cálcio pode modificar as inclusões de alumina remanescentes para uma fase aluminato de cálcio que tem um ponto de fusão mais baixo e

uma temperatura de amolecimento menor do que a da alumina. A níveis de enxofre mais elevados, há ainda a formação de uma camada de sulfeto de manganês-cálcio envolvendo as inclusões óxidas remanescentes, tornando, assim, estas partículas efetivamente menos abrasivas (DAVIES et al., 1988).

Segundo Milan (1999), a usinabilidade de aços para matriz de injeção de plástico, tratados ao cálcio, foi avaliada e comparada com o mesmo aço, porém sem o tratamento ao cálcio, por meios de ensaios de fresamento de topo (canais) utilizando uma fresa de 3 dentes e fresamento frontal com uma fresa de 5 dentes, ambos com ferramentas de metal duro com revestimento múltiplo de TiN, TiC e Al_2O_3 , classe P25. Houve um incremento na vida da ferramenta (da ordem de até 76%, no caso do fresamento de topo) quando utilizando o aço tratado ao cálcio, em relação ao convencional. No caso do fresamento frontal à altas velocidades de corte, devido a presença de grandes quantidades de lascamentos nas ferramentas, o efeito do cálcio não foi efetivo. Entretanto, à velocidades de corte mais moderadas, o lascamento foi reduzido e o aço tratado pelo cálcio apresentou seu efeito positivo, aumentando a vida das ferramentas. Durante os ensaios de fresamento frontal foi medida também a rugosidade média (R_a) e o tratamento pelo cálcio proporcionou resultados mais uniformes.

2.4.5 Formação de uma camada protetora

Em sua pesquisa Milan (1999) observou que a camada protetora é formada nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta durante o processo de usinagem. Devido as altas temperaturas ali desenvolvidas, os óxidos de cálcio se amolecem sobre a superfície da ferramenta e permitem a redução do desgaste da mesma através da cobertura desta superfície (MORI et al, 1988, apud MILAN, 1999). Porém, a adesão dos óxidos na superfície da ferramenta é devida não somente ao ponto de fusão destes óxidos, mas também pela sua afinidade química com os elementos da ferramenta e também sua plasticidade. Segundo Bhattacharya (1988, apud MILAN, 1999), acredita-se que, em ferramentas de metal duro contendo titânio, ocorrem ligações químicas entre o titânio e as inclusões de óxidos, promovendo um decréscimo no desgaste da ferramenta através da barreira formada. Kankaanpää et al. (1987) verificou a presença desta camada sobre a superfície de ferramentas de aço-rápido revestidas com TiN quando usinando aços tratados ao cálcio, enquanto que em ferramentas de aço-rápido sem revestimento a presença da camada não pode ser detectada. A formação desta camada tem sido observada sobre ferramentas contendo TiC e TiN, enquanto que em ferramentas de metal duro consistindo somente de WC e Co são encontrados somente traços da camada (HELISTÖ et al., 1988, apud MILAN, 1999).

Esta camada formada sobre a superfície da ferramenta exerce um efeito protetor impedindo o contato íntimo e a difusão nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta, ou seja, é formada uma barreira física impedindo o desgaste difusivo. Este tipo de proteção causa uma redução no desgaste de cratera. (SUBRAMANIAN; KAY, 1988; HELISTÖ et al., 1988; RAMANUJACHAR; SUBRAMANIAM, 1996, apud MILAN, 1999). Na prática a camada protetora pode se desenvolver sobre a superfície de saída ou de folga, porém, é mais provável que seja formada sobre a superfície de saída devido as temperaturas mais altas ali desenvolvidas (KANKAANPÄÄ et al., 1987).

Segundo Fang e Zhang (1996, apud MILAN, 1999) a camada formada é aderida sobre a superfície da ferramenta e contribui para o aumento da vida da mesma, pelo menos, das três maneiras seguintes:

- reduzindo o desgaste abrasivo, pois a camada, depois de formada, impede o contato físico direto cavaco-ferramenta.
- reduzindo o desgaste causado pela adesão com posterior arrancamento (attrition), devido ao fato de as inclusões formadoras da camada terem boa molhabilidade e adesão com ferramentas de metal duro contendo TiC.
- reduzindo o desgaste difusivo devido a barreira formada. A baixa condutividade térmica desta barreira também faz com que a temperatura na interface camada-ferramenta seja menor que na interface camada-cavaco.

2.5 Ferramentas de corte

Segundo Machado et al. (2009), o processo de usinagem baseia-se na remoção de material, utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. Partindo-se do princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuíram para o aparecimento de novos materiais para confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de corte interrompidos (como no caso do fresamento, por exemplo) requer materiais que componham ferramentas com suficiente tenacidade para suportar os choques e impactos inerentes aos processos de usinagem.

Para seleção do material da ferramenta uma série de fatores devem ser analisados, entre eles podem ser mencionados:

- Material a ser usinado.
- Processo de usinagem.
- Condição da máquina utilizada

- Forma e dimensões da ferramenta.
- Custo da ferramenta.
- Condições de usinagem.
- Condições de operação.

As principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte são:

- Dureza a quente.
- Resistência ao desgaste.
- Estabilidade química (ser inerte quimicamente).
- Alta dureza.
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura.
- Alta resistência a compressão.
- Alta resistência ao cisalhamento.
- Resistência ao choque térmico.

Machado e Silva (2004) ilustram uma relação entre os materiais das ferramentas e suas propriedades de dureza (Fig. 2.8) desde o aço carbono (material tenaz) até o diamante natural (material duro e frágil).

Segundo Diniz et al. (2008) os materiais usados para confecção das ferramentas de corte podem ser divididos com base nas suas características químicas da seguinte forma:

- Aço-rápido.
- Aço-rápido com cobertura.
- Metal duro.
- Metal duro com cobertura.
- Material cerâmico.
- Nitreto cúbico de boro (CBN).
- Diamante (PCD – Polycrystalline Diamond).

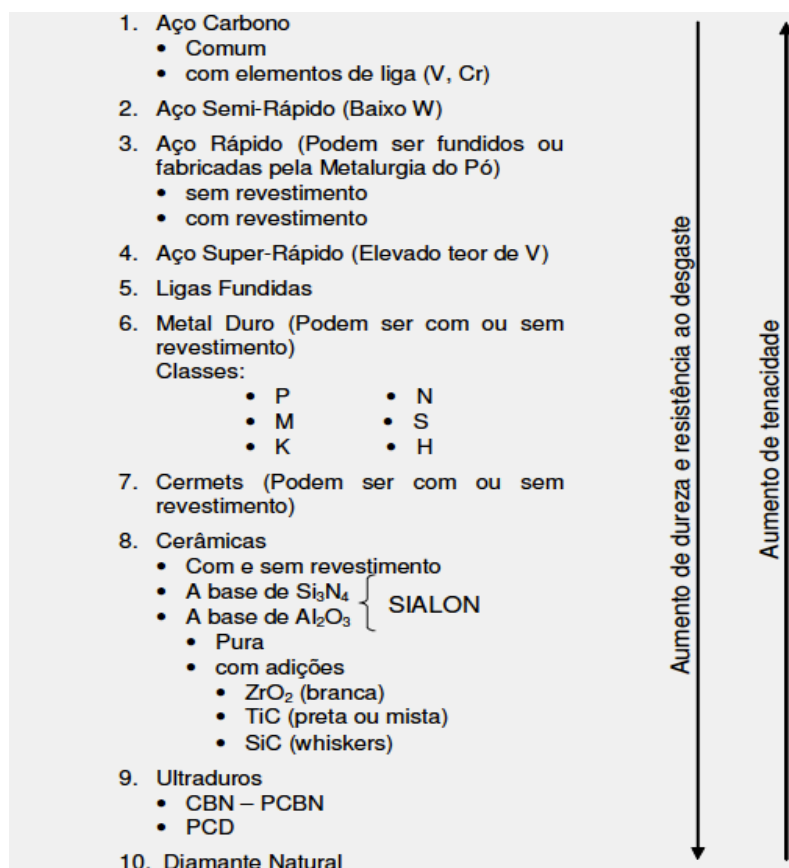


Figura 2.8 - Lista dos materiais para ferramentas de corte (MACHADO; SILVA, 2004, p. 114).

2.5.1 Metal duro

O segundo grande impulso na área dos materiais de ferramenta de corte aconteceu com o aparecimento do metal duro. O primeiro foi com o surgimento do aço-rápido. Com os metais duros, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente uma ordem de grandeza (de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 – 300 m/min com os metais duros). O advento desta classe aconteceu no final da década de 20, na Alemanha, quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o WC (carboneto de tungstênio) em pó pela primeira vez. A mistura deste pó principalmente com o cobalto, também em pó (admitindo-se ainda o níquel ou o ferro, mas com resultados inferiores), trouxe ao mercado, na década de 30, um dos mais fantásticos grupos de materiais de ferramentas de corte: o metal duro (MACHADO; SILVA, 2004).

Os alemães batizaram esse novo metal de “Widia” (do alemão “wie diamond”, que significa: “como o diamante”), fazendo referência à semelhança das propriedades desse material com as do diamante. Em pouco tempo o metal duro se popularizou entre os materiais para ferramentas de corte devido a combinação de resistência ao desgaste,

resistência mecânica e tenacidade em altos níveis. Outra de suas características é a manutenção da dureza a quente, em torno de 400 HV a 1000 °C.

Trent e Wright (2000) citam que este material pode apresentar a adição de elementos como TiC (carboneto de titânio), TaC (carboneto de tântalo) ou NbC (carbeto de nióbio) no conjunto WC + Co (carboneto de tungstênio + cobalto). Esses elementos possibilitaram a redução do desgaste por cratera e segundo Machado e Silva (2004) as razões para isso são:

- Os carbonetos adicionados têm maiores durezas que o WC, apresentando assim maior resistência ao desgaste.
- A solubilidade dos carbonetos adicionados no ferro é muito menor que o WC. Isto inibe a difusão, que é um dos mecanismos de desgaste mais importante a altas temperaturas.
- A estabilidade dos carbonetos adicionados é maior que os WC. Isto implica em maiores dificuldades de dissolução e difusão desses elementos.

A “International Organization for Standardization” (Norma ISO 513, 2004) determina a divisão das ferramentas de metal duro em classes. São seis classes denominadas pelas letras P, M, K, N, S e H em função de suas aplicações básicas. Segundo Ribeiro (2007) estas classes citadas anteriormente tem por definição:

- Classe P – compreendem os metais duros com elevado teor de TiC e TaC, o que confere elevada dureza a quente e resistência ao desgaste. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam cavacos contínuos (ou longos) e dúcteis. As ferramentas desta classe são empregadas na usinagem de aços não ligados; aços de alta liga; aços fundidos e ferros maleáveis de cavacos longos. Por formarem uma grande área de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta desenvolvem temperaturas elevadas e grande desgaste de cratera. Não são indicadas para aços inoxidáveis com estrutura austenítica.
- Classe M – neste grupo encontram-se os metais duros com propriedades intermediárias, destinados a ferramentas que tenham múltiplas aplicações. São aplicados na usinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam tanto cavacos contínuos como cavacos curtos. São empregados na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos e martensíticos; aços fundidos; aços-manganês; ferros fundidos e ferros fundidos maleáveis.
- Classe K – este grupo foi o primeiro a ser desenvolvido, e é composto principalmente por carboneto de tungstênio aglomerado por cobalto. Como este metal duro não é resistente ao desgaste de cratera, são aplicados na usinagem de

metais frágeis e ligas ferrosas que apresentam cavacos curtos e ainda em materiais não-metálicos.

- Classe N – os metais duros e PCD, deste grupo, são aplicados em vários tipos de alumínio e outros metais não-ferrosos; plásticos e madeira.
- Classe S – neste grupo se encontram os metais duros e cerâmicas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$), indicados para a usinagem de ligas resistentes ao calor; ligas especiais à base de níquel ou cobalto; titânio e suas ligas; aços de alta liga e demais materiais de difícil remoção de cavacos.
- Classe H – metais duros e cerâmicas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ e PCBN), para aplicações que incluem os materiais endurecidos como aço temperado; ferro fundido temperado; ferro fundido coquilhado e aço manganês.

2.5.2 Revestimentos

Segundo Ávila (2003), A engenharia de superfície vem sendo apontada em diversos trabalhos técnico científicos como sendo uma inovadora e competitiva alternativa para produção de ferramentas de corte mais resistentes e confiáveis. Particularmente nos processos de usinagem espera-se obter para uma ferramenta de corte não somente um aumento de sua vida, mas também um determinado grau de confiabilidade no seu desempenho em processo.

O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma importância muito grande, pois tal revestimento pode garantir um desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos, sendo estes os materiais mais utilizados na indústria mecânica. Entre todo o metal duro utilizado na indústria, os revestidos representam, atualmente, mais de 95%, com tendência a crescimento contínuo. Outro fator que contribuiu muito para o crescimento da aplicação do metal duro revestido é o maior domínio das técnicas de revestimento, bem como um custo mais acessível. Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes de metal duro (MACHADO et al., 2009).

A análise de desempenho de ferramentas e/ou revestimentos em processos de usinagem por meio de indicadores de usinabilidade, tais como vida e desgaste de ferramenta, temperatura de corte e integridade superficial da peça usinada dentre outros correspondem à forma mais realística utilizada para constatação e verificação de tendências. Desta maneira são criadas bases de dados que posteriormente analisados de forma qualitativa e quantitativa, ainda que para processos e condições específicas de corte, oferecem importantes informações técnico-científicas para tomadas de decisões, que podem

otimizar tanto o processo de corte (escolha mais adequada de parâmetros de corte) quanto o tipo e espessura de revestimentos a serem adotados (ÁVILA, 2003).

Um acentuado aumento na vida de ferramentas de corte para usinagem (corte interrompido) foram observados quando aplicados inicialmente revestimentos de Ti-N, por volta da década de 70 do século passado, por deposição química de vapor (CVD), sendo posteriormente na década de 80, aplicados por deposição física de vapor (PVD) em substratos de aço (HOLMBERG; MATHEWS, 1994, apud ÁVILA, 2003).

As técnicas de PVD são utilizadas num amplo campo de aplicação, ou seja: produção de revestimentos ópticos, lubrificantes, supercondutores, decorativo e ultraduros. A espessura dos revestimentos pode variar de poucos angstroms até dezenas de microns conforme aplicações específicas, com limites máximos determinados pela microestrutura e valores de tensões residuais, que podem comprometer os seus desempenho (ÁVILA, 2003).

O processamento PVD é feito sob alto vácuo, a temperaturas que variam na ordem de 150° e 500 °C. O material de revestimento sólido de alta pureza (metais como titânio, cromo e alumínio) pode ser evaporado pelo calor ou então bombardeado com íons (pulverização catódica). Ao mesmo tempo, é introduzido um gás reativo (por exemplo, nitrogênio ou um gás que contenha carbono); formando um composto com o vapor metálico que se deposita nas ferramentas ou nos componentes na forma de um revestimento fino e altamente aderente. Para atingir uma espessura de revestimento uniforme, as peças devem girar várias vezes a uma velocidade constante. As propriedades do revestimento (como dureza, estrutura, resistência química e resistência à temperatura, aderência) podem ser desta forma controladas com rigor. Os processos PVD contemplam evaporação por arco voltaico, pulverização catódica, galvanização iônica e pulverização iônica incrementada (BALZERS, 2011).

Segundo Machado et al. (2009) o processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato, enquanto que o processo CVD diminui essa propriedade, o que causa problemas para a aplicação de ferramentas revestidas pelo processo CVD em cortes interrompidos. A causa dessa redução de tenacidade está na tensão residual de tração deixada pelo método CVD, enquanto, no método PVD, a tensão residual é de compressão, igual à conseguida no substrato após a retificação. Portanto, é a tensão residual de tração que reduz a resistência ao lascamento da aresta de corte.

2.5.3 Tipos de revestimento

Diversos tipos de revestimentos estão disponíveis atualmente, o Ti-N é indicado para aplicações com necessidade de um baixo coeficiente de atrito e boa dureza. O Ti-C-N é indicado para aplicações onde o mecanismo de desgaste abrasivo é predominante, devido a

sua alta dureza. E o filme Ti-Al-N é apontado como um revestimento para aplicações que envolvam altas temperaturas devido a sua resistência à oxidação, tendo o processo de início de oxidação a temperaturas acima de 700°C (ÁVILA, 2003). O Nitreto de Cromo-Alumínio (Al-Cr-N), faz parte da nova geração de revestimentos, sendo caracterizado substancialmente pelo aumento na resistência ao desgaste abrasivo. Em algumas séries de testes em operações de fresamento, ocorreu o aumento surpreendente do tempo de vida em comparação aos revestimentos já existentes. Os revestimentos a base de Al-Cr-N são mais resistentes à oxidação e tem maior dureza do que os revestimentos existentes até então. São estáveis sobre condições superiores de temperatura, tendo em geral um desempenho melhor. Estes revestimentos são aplicáveis em ferramentas de metal duro e aço rápido. Possui dureza de 3.200 HV 0,05 (BALZERS, 2011).

O Al-Cr-N é um revestimento monocamada de alto rendimento isento de titânio. É recomendado para operações onde exige alta resistência à oxidação e dureza, sendo resistente a elevadas temperaturas de trabalho, atingido níveis de 1.200 °C. Estas propriedades conferem a este produto uma incomparável resistência ao desgaste, tanto em condições normais como sob esforços mecânicos elevados (BALZERS, 2011).

Dentre os revestimentos citados acima Al-Cr-N e o Ti-Al-N, são os dois revestimentos utilizados nos experimentos deste trabalho, assim a Tab. 2.4 ilustra as principais propriedades destes revestimentos.

Tabela 2.4 – Dados dos revestimentos Al-Cr-N e Ti-Al-N (BALZERS, 2007).

Propriedades do Revestimento	Al-Cr-N	Ti-Al-N
Microdureza (HV 0,05)	3.200	3.300
Coeficiente de atrito no aço	0,35	0,25
Temperatura máxima de operação (°C)	1.100	900
Cor do revestimento	Azul-cinzentos	Violeta-cinzentos
Nome Comercial	ALCRONA®	FUTURA TOP®

2.6 Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micrométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramentas, etc.). A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, que serão tratados posteriormente. Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetro de saída para controlar um processo de usinagem. De fato, a rugosidade de uma superfície depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, e operação de usinagem (MACHADO et al., 2009).

Integridade superficial é o termo utilizado para denotar as condições e a qualidade de superfícies usinadas, e resulta da combinação do processo de deformação plástica, propagação de trincas, reações químicas e forma de energia empregada para a remoção do cavaco (ALMEIDA, 2010).

Segundo Almeida (2010), as irregularidades podem ser classificadas de acordo com a superfície ou acabamento superficial da seguinte forma:

- *Rugosidade superficial* são finas irregularidades resultantes de ação inerente do processo de corte, ou seja, marcas de avanço. A altura ou profundidade média dessas irregularidades são medidas em pequeno comprimento chamado “cut-off” (comprimento da amostra). Pode-se dizer que a rugosidade e ondulações constituem a textura de uma superfície apesar de apresentarem outras caracterizações.
- *Ondulações* consistem de irregularidades superficiais, cujos espaçamentos são maiores em aproximadamente 1mm que o cut-off, causado por deflexões e vibrações da ferramenta ou da peça.
- *Marcas de avanço* denotam as direções das irregularidades superficiais, dependendo da orientação da peça e ferramenta de corte na máquina, ou do movimento relativo da peça e ferramenta.
- *Falhas* são interrupções na topografia típica da superfície de um componente, sendo inesperadas e indesejáveis, causadas por defeitos tais como trincas, bolhas, inclusões, que podem surgir durante o processo de corte.

De acordo com a Norma ABNT NBR 4287 (2002), os parâmetros para avaliação de rugosidade de superfícies podem ser definidos como na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 – Alguns parâmetros de rugosidade (MACHADO et al., 2009, p. 281).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Media aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da media dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

* A Norma DIN define o parâmetro R_z como sendo a média das cinco alturas máximas detectadas em cada comprimento de amostragem.

O comprimento de amostragem é definido pela Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. O comprimento de avaliação pode conter um ou mais comprimentos de amostragem e é utilizado para estabelecer o perfil a ser avaliado. Utiliza-se normalmente um comprimento de avaliação equivalente a cinco vezes o de amostragem. A tabela 2.6 relaciona os valores da Norma 4288 (1996).

O levantamento das irregularidades da superfície pode ser realizado através de um apalpador, que percorre todas as irregularidades da superfície e envia um sinal para um transdutor que transforma o sinal mecânico em eletrônico. O sinal transformado é manipulado segundo um algoritmo que, ao ser quantificado, atribui-se ao mesmo um valor equivalente a uma unidade de comprimento, geralmente na ordem de μm (micrometro). Uma vez conhecido este valor, ele é colocado de forma gráfica e/ou manuseado estatisticamente para gerar todos os parâmetros de controle de uma superfície (ALMEIDA, 2010).

Tabela 2.6 – Valores recomendados para comprimentos de amostragem e de avaliação (ISO 4288, 1996, apud MACHADO et al., 2009, p. 282).

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
Até 0,02	0,08	0,4
de 0,02 a 0,1	0,25	1,25
de 0,1 a 2	0,8	4
de 2 a 10	2,5	12,5
de 10 a 80	8	40

2.7 Usinagem com ferramentas reafiadas

A literatura é muito escassa em trabalhos científicos que mostrem o desempenho de ferramentas reafiadas, sendo esta a principal motivação para a realização deste trabalho. A pesquisa com ferramentas reafiadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU/UFU teve início com a dissertação do aluno José Aécio Gomes de Souza, “Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação” (SOUSA, 2011), sob a orientação do professor Álisson Rocha Machado.

O objetivo da reafiação é devolver à ferramenta de corte o seu nível original de afiação, possibilitando, assim, que o desempenho da ferramenta possa ser trazido a condição inicial (OSG, 2008). Reafiar significa renovar o fio de corte, a geometria e o revestimento original das ferramentas, desenvolvendo, assim, as mesmas características de quando novas.

Na usinagem, após algum tempo de uso, as ferramentas de corte geralmente se desgastam, podendo apresentar trincas e/ou deformações plásticas na sua estrutura. Quando um determinado limite de desgaste ou avaria é atingindo as ferramentas apresentam um baixo rendimento, gerando, assim, problemas como: aquecimento excessivo, aumento do esforço de corte, acabamento ruim da superfície usinada e aumento do tempo de produção. Por estes motivos, as ferramentas precisam ser reafiadas ou substituídas, pois o custo com a reciclagem acaba se tornando inviável economicamente (HUANG et al., 2009).

No trabalho de Souza (2011), foram testadas brocas de metal duro escalonadas, novas e reafiadas, sem revestimento e revestidas com TiAlN e AlCrN, no processo de

furação de aços 19MnCr5G (AISI 5115), usados em coroas dentadas de caixa de câmbio de automóveis. Nas ferramentas revestidas, a rotina de re-recobrimento após reafiação foi variada (sem recobrir novamente, recobrando em cima do recobrimento anterior e recobrando após retirar, por decapagem, o revestimento anterior). Foram consideradas a vida das ferramentas, a força de avanço, o torque e os desvios de forma (incluindo acabamento superficial) dos furos usinados.

Souza (2011), concluiu que:

- ✓ *As brocas sem revestimento não são indicadas para as operações de furação das coroas cilíndricas de aço DIN 19MnCr5G, pois mesmo usinando uma quantidade menor de furos, essas brocas apresentaram maiores níveis de desgaste em relação às ferramentas revestidas (TiAlN e AlCrN) (43,75% e 34,15%, respectivamente).*
- ✓ *As ferramentas reafiadas apresentaram maiores taxas de desgaste (em média 33,85%, considerando todas as brocas testadas) em relação as ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação.*
- ✓ *Dentre as brocas revestidas com TiAlN, apenas as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem (retirada do revestimento) + reafiação + recobertas (inserção de um novo revestimento TiAlN) foram as que obtiveram valores mais próximos das ferramentas novas (em média 11,74 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 5,38 %).*
- ✓ *Para as brocas revestidas com AlCrN, as ferramentas reafiadas tiveram maiores taxa de desgaste em relação às brocas novas (em média 45,15 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de apenas 22,91 %).*
- ✓ *Para as brocas sem revestimento, as ferramentas reafiadas também apresentaram maiores taxas de desgaste em relação às brocas novas (em média 43,75 %, número calculado considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 0 %, 35 %, 70 % e 100 % de vida, entretanto, se for comparado apenas o fim de vida, o aumento percentual médio foi de 39,28 %).*

- ✓ *Através da análise estatística, verificou-se que não houve diferença significativa apenas para as brocas revestidas com TiAlN, quando se comparou o desgaste das ferramentas novas com as ferramentas que passaram pelo processo de decapagem, reafiação e recobrimento.*
- ✓ *Não houve diferença estatística significativa nos valores dos desvios geométricos para as brocas sem revestimento e revestidas com AlCrN quando se comparou o desempenhos das ferramentas antes e após a reafiação.*
- ✓ *As ferramentas com revestimento TiAlN que foram reafiadas apresentaram um acréscimo 21,68 % no valor do desvio de circularidade e 36,54 % no valor do desvio cilindridade quando comparados com as ferramentas que não foram submetidas ao processo de reafiação, ou seja, brocas novas.*
- ✓ *As ferramentas reafiadas apresentaram um acréscimo nos valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t quando comparados com as ferramentas novas (em média 20,18 %, 25,64 % e 21,93 %, respectivamente).*
- ✓ *As brocas sem revestimentos apresentaram maiores valores de rugosidade superficial R_a , R_z e R_t em relação às brocas revestidas com TiAlN (em média 38,53 %, 66,51% e 72,57 %, respectivamente) e AlCrN (em média 27,79 %, 46,43 % e 40,97 %, respectivamente).*

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O trabalho experimental foi realizado no laboratório de ensino e pesquisa em usinagem – LEPU – da Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC - da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, na cidade de Uberlândia – MG. Foram realizados testes específicos de força, torque, desgaste e rugosidade (R_a , R_z e R_t) durante os ensaios de vida para determinar o desempenho das fresas durante todo o período de usinagem. Também foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, para analisar o desgaste das fresas no fim de vida. A metodologia adotada é apresentada em forma de fluxograma através da Fig. 3.1.

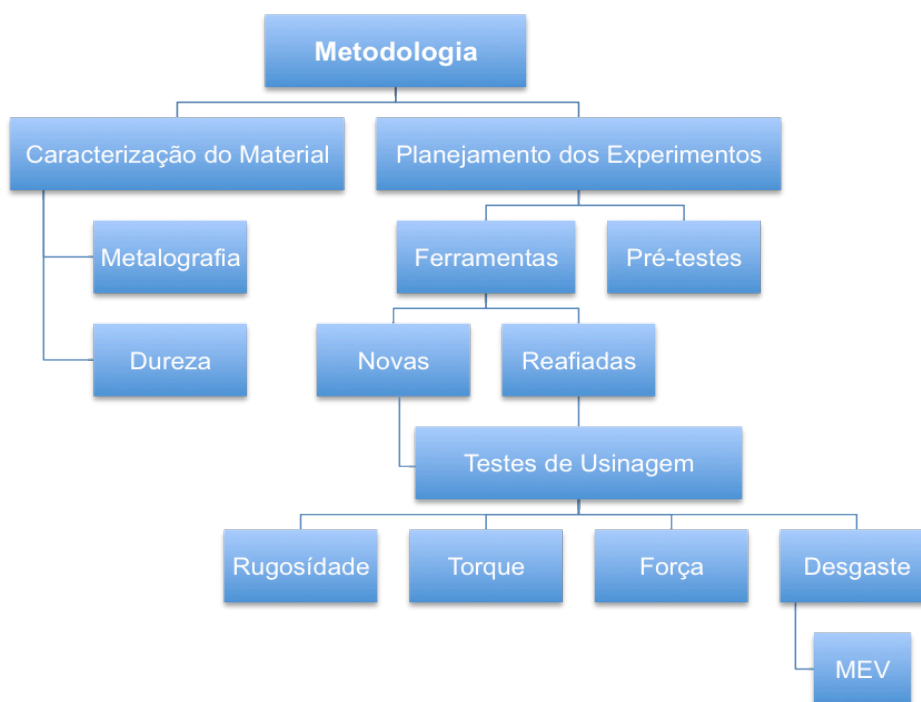


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia adotada.

3.1 Metodologia

Este trabalho consiste em analisar o desempenho de fresas de topo de metal duro, novas e reafiadas, depois de utilizadas até o fim de vida em fresamento de topo. As vidas dessas ferramentas foi uma das variáveis de saída, base para as comparações. Visando confiabilidade estatística a própria metodologia escolhida permitiu várias repetições dos testes, mínimo de 3 repetições para cada tipo de teste (condição de usinagem). Para cada tipo de teste foram utilizadas 4 ferramentas, ou seja, 4 ferramentas novas, utilizadas até atingir 100% de vida (fim de vida). Esta distribuição possibilitou a realização de 4 réplicas para cada condição.

A vida da ferramenta foi definida como o período em que a ferramenta puder ser utilizada na produção (no processo de usinagem), seguindo o critério de fim de vida recomendado pelo fabricante, OSG Sulamericana de Ferramentas S.A., para a operação mencionada. O critério recomendado para o fim de vida é de $VB_B = 0,2 \text{ mm}$, valor estipulado para garantir que a fresa possa ser reafiada. Após atingir o fim de vida a ferramenta foi enviada ao Centro de Reafiação da OSG Sulamericana de Ferramentas S.A. para reafiação, retornando ao LEPU/UFU reafiada e pronta para usinar novamente.

Algumas variáveis foram consideradas durante o tempo de vida da ferramenta, como força, rugosidade da superfície usinada, torque e o desgaste da ferramenta; estes são os parâmetros de comparação para o desempenho da ferramenta reafiada com a ferramenta nova.

3.1.1 Material da peça

O material da peça utilizada foi o aço ABNT P20 (de mesma designação ASTM, SAE e AISI, WNr 1.2311 da Norma DIN), utilizado para fabricação de moldes de injeção de plásticos. Foi fornecido prismático, na forma de um bloco com as dimensões de $190 \times 250 \times 360 \text{ mm}^3$, pela Villares Metals S/A cuja designação própria deste fabricante é VP20ISOF. Trata-se de um aço Cr-Mo elaborados através de desgaseificação a vácuo, com usinabilidade melhorada por tratamento com cálcio e fornecido no estado temperado e revenido com dureza na faixa de 30-34 HRC (285-321 HB). Os valores correspondentes a cada elemento de sua composição química estão ilustrados na Tab. 2.3 apresentada no capítulo II.

Para confirmar a dureza foram realizados testes em dois pontos distintos do bloco de VP20ISOF ilustrado na Fig. 3.2. Foram retiradas duas amostras, uma da extremidade e uma no centro do bloco e cada amostra foi dividida em 2 secções como pode ser visto na Fig.

3.3. A dureza foi medida cinco vezes em cada uma das secções para cada amostra (extremidade e centro) e os resultados são apresentados na Tab. 3.1.

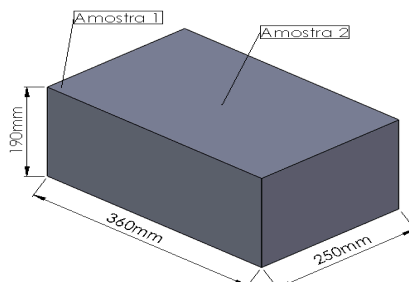


Figura 3.2 – Representação geométrica do bloco VP20ISOF.

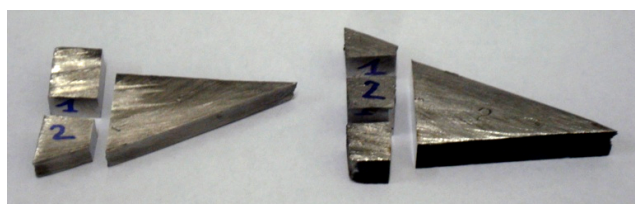


Figura 3.3 – Escolha das secções para análise de dureza.

Tabela 3.1 – Teste de dureza do VP20ISOF.

	Amostra 1		Amostra 2	
	Secção 1	Secção 2	Secção 1	Secção 2
Ensaio 1	32,0	33,0	31,0	32,0
Ensaio 2	32,0	32,0	33,0	33,0
Ensaio 3	33,0	33,0	34,0	33,0
Ensaio 4	34,0	34,0	32,0	32,0
Ensaio 5	34,0	32,0	32,0	33,0
MÉDIA	33,0	32,8	32,4	32,6
DESVPAD	1,0	0,8	1,1	0,5
MÉDIA GERAL	32,7			
DESVPAD GERAL	0,8			

*Valores em unidade Rockwell C.

A Fig. 3.4 mostra a micrografia das duas secções utilizadas para a medição de dureza, onde se destacam a matriz martensítica revenida e inclusões de sulfeto de cálcio,

confirmando o que foi observado por Milan (1999), material utilizado também por esse pesquisador.

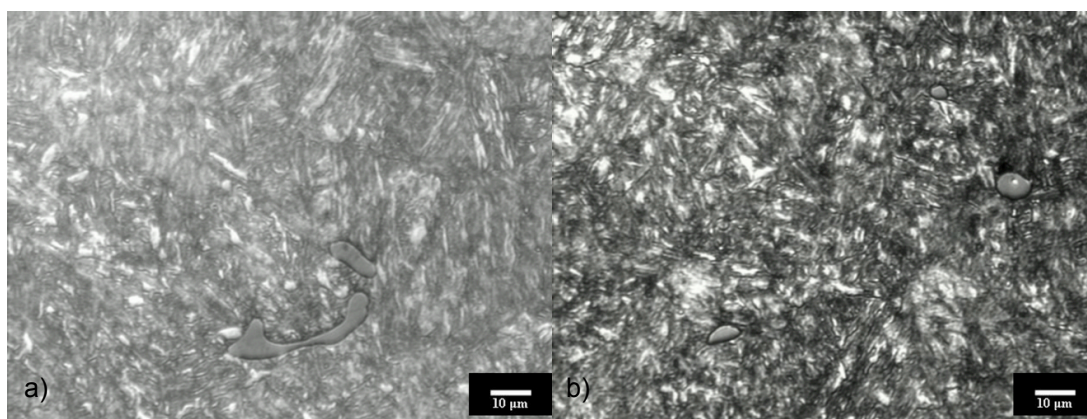


Figura 3.4 – Amostra 1 da secção 1 (a), amostra 2 da secção 2 (b).

3.1.2 Preparação do corpo de prova

A preparação do material a ser usado consistiu basicamente na retirada da camada de óxido formada sob sua superfície e consequentemente o nivelamento da superfície da peça em relação a mesa da máquina-ferramenta, como pode ser visto na montagem da Fig. 3.5. Dois blocos de VP20ISOF foram separados para utilização neste trabalho.

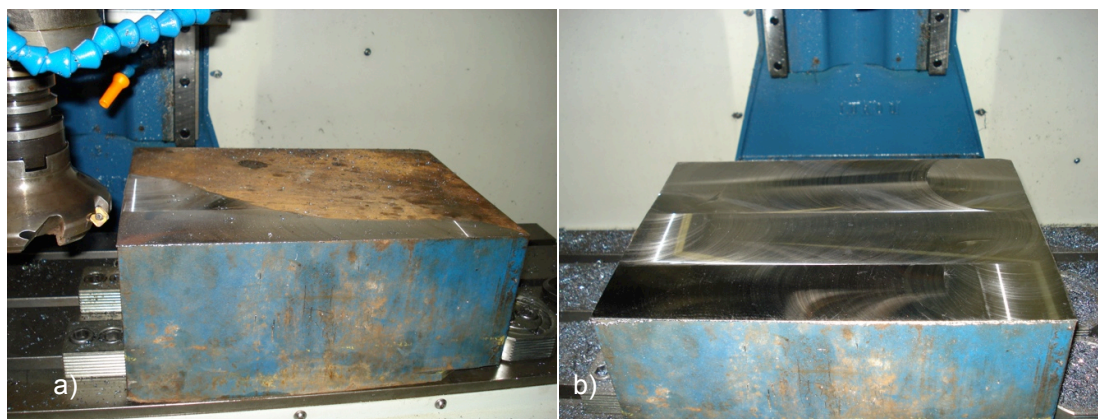


Figura 3.5 – Preparação do corpo de prova, material com camada de óxido (a), material sem camada de óxido (b).

3.2 Ferramentas

Foram utilizadas ferramentas fornecidas pela OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda., inteiriças de metal duro classe H com 10% de cobalto. Foram fornecidas 24 fresas de metal duro da série HY-PRO® com 4 canais e dois tipos diferentes de revestimentos disponibilizados pela Oerlikon Balzers, 12 revestidas com Alcrona® (Al-Cr-N) e 12 com Futura Top® (Ti-Al-N). Esses revestimentos são feitos pelo processo PVD.

As fresas possuem 10 mm de diâmetro, 70 mm de comprimento sendo 25 mm a extensão da aresta de corte, como apresentado na Fig. 3.6.



Figura 3.6 – Ferramentas utilizadas.

3.3 Equipamentos utilizados

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU; os equipamentos utilizados foram:

- Dinamômetro rotativo Kistler 9123C;
- Placa de aquisição National Instruments PCI-6251;
- Interface de aquisição externa National Instruments BNC-2110;
- Decodificador do sinal Kistler 5223;
- Centro de usinagem Romi Discovery 760/CN *Siemens 810 15kVA* (máx.10.000 rpm);
- Microscópio ótico Olympus SZ61;
- Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV Hitachi TM-3000;
- Microcomputador Intel Pentium 4 c/ Software LabVIEW® 2009;
- Rugosímetro Mitutoyo SJ-201;

O software LabVIEW® foi utilizado para gerenciar o sinal e gravar os dados coletados pelo dinamômetro e seu respectivo sistema de aquisição de sinais.

3.4 Pré-testes

Foram realizados alguns pré-testes para estabelecer as melhores condições de corte para realização dos ensaios de vida, bem como a utilização dos dados disponíveis em catálogos fornecidos pela OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda.. O tipo de usinagem escolhido foi o fresamento de topo, com usinagem em uma única direção, sentido discordante, com penetração de trabalho (a_e) de 1 mm e profundidade de corte (a_p) de 10 mm. O comprimento em balanço foi de 35 mm, o batimento medido no eixo-árvore da máquina e na ponta da ferramenta foi de 6 μ m e 9 μ m respectivamente.

O desgaste da ferramenta foi medido no flanco principal, na extensão de 10 mm correspondente a profundidade de corte utilizada, região destacada em vermelho na Fig. 3.7. Para monitoramento do desgaste das ferramentas utilizou-se o VB_B , desgaste de flanco médio, de acordo com a Norma ISO 8688-2 (inalterada desde a última publicação, 1989).

Inicialmente seguindo orientação do catálogo fornecido pelo fabricante (OSG, 2010), foram realizados testes com velocidade de corte de 45, 50 e 60 m/min (mantendo a velocidade de avanço em 90 mm/min), mas devido a presença de lascamentos, como pode ser visto na Fig. 3.8, optou-se por aumentar a velocidade de corte da ferramenta até 100 m/min.

Durante a realização dos pré-testes foi observado que com o aumento da velocidade de corte acarretou na melhor durabilidade da ferramenta, ou seja, a vida da ferramenta aumentou significativamente. Outro dado que foi levado em consideração na escolha das condições de corte foi o desgaste apresentado pela ferramenta; com velocidades de corte abaixo de 60 m/min a ferramenta apresentou inúmeros lascamentos ao longo da aresta de corte e conseqüentemente um desgaste irregular. Com o aumento do avanço a vibração excessiva atrapalha nas medições de força e torque.



Figura 3.7 – Região de controle do desgaste, VB_B (desgaste de flanco médio).

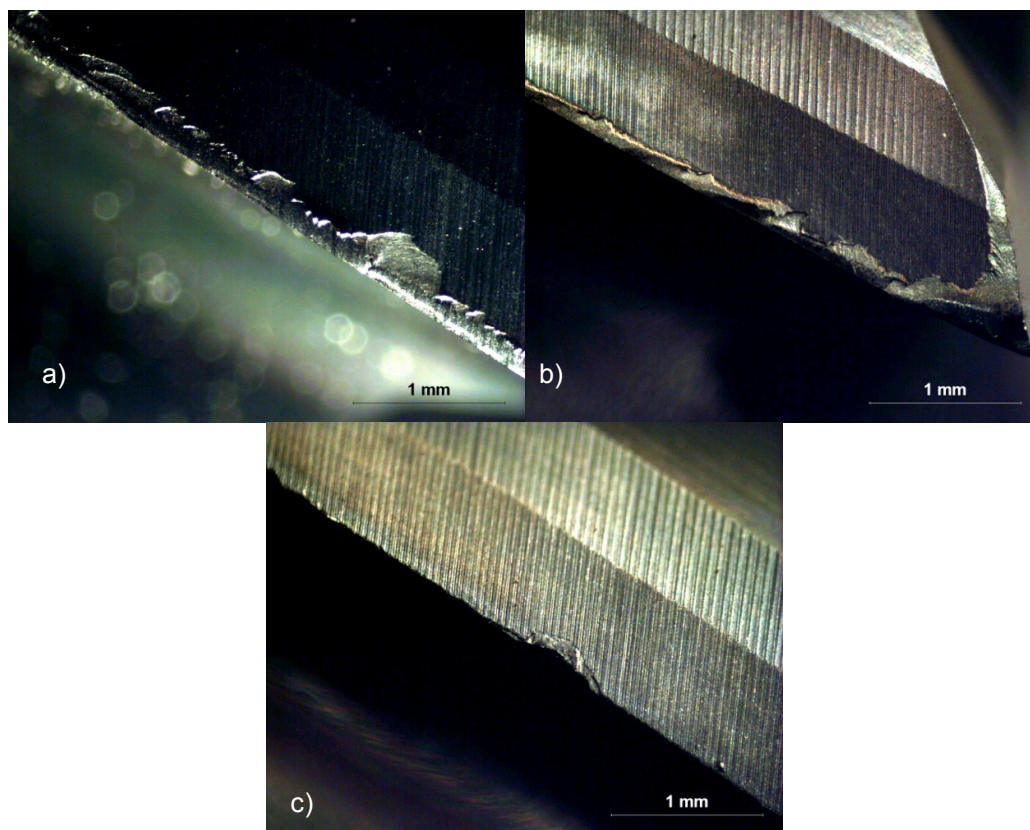


Figura 3.8 – Desgaste da ferramenta com velocidade de corte de (a) 45 m/min, (b) 50 m/min e (c) 60 m/min, com apenas 1 passada ($L_f = 360$ mm).

Analisando os dados obtidos em pré-testes, apresentados na Tab. 3.2, optou-se então por escolher duas condições de corte, uma mais branda com velocidade de corte de 80 m/min e outra com velocidade de corte mais elevada de 100 m/min, mantendo o avanço por dente em 0,015 mm/dente.

Essas condições de corte escolhidas, $V_c = 80$ m/min e $V_c = 100$ m/min, favorecem o desgaste uniforme da ferramenta, como ilustrado na Fig. 3.9, além das medições de força e torque ao longo da vida da ferramenta. Para a segunda condição citada ($V_c = 100$ m/min) o critério de fim de vida teve de ser alterado devido as altas vibrações geradas, quando o desgaste aumentava nesta condição, um número fixo de passadas foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta. A Tab. 3.3 apresenta os critérios de fim de vida adotados para cada tipo de teste realizado nos testes experimentais principais.

Todos os testes foram realizados utilizando o mandril do dinamômetro rotativo Kistler 9123C. O fresamento discordante foi escolhido por proporcionar um sinal de força com picos e vales mais definidos, podendo assim através do gráfico gerado apontar quando cada aresta de corte da ferramenta entra ou sai da peça usinada.

Tabela 3.2 – Pré-testes.

Teste	Revestimento	V _c (m/min)	V _f (mm/min)	f _z (mm/dente)	Passadas	VB _B (mm)
1	Ti-Al-N	60	90	0,012	63	0,15
2	Ti-Al-N	50	90	0,014	5	Quebra
3	Ti-Al-N	60	252	0,033	20	0,14
4	Ti-Al-N	100	191	0,015	150	0,20
5	Ti-Al-N	80	153	0,015	150	0,20
6	Al-Cr-N	60	100	0,013	5	-
7	Al-Cr-N	45	90	0,016	1	Quebra
8	Al-Cr-N	50	100	0,016	10	-
9	Al-Cr-N	100	191	0,015	140	0,20
10	Al-Cr-N	80	153	0,015	200	0,20

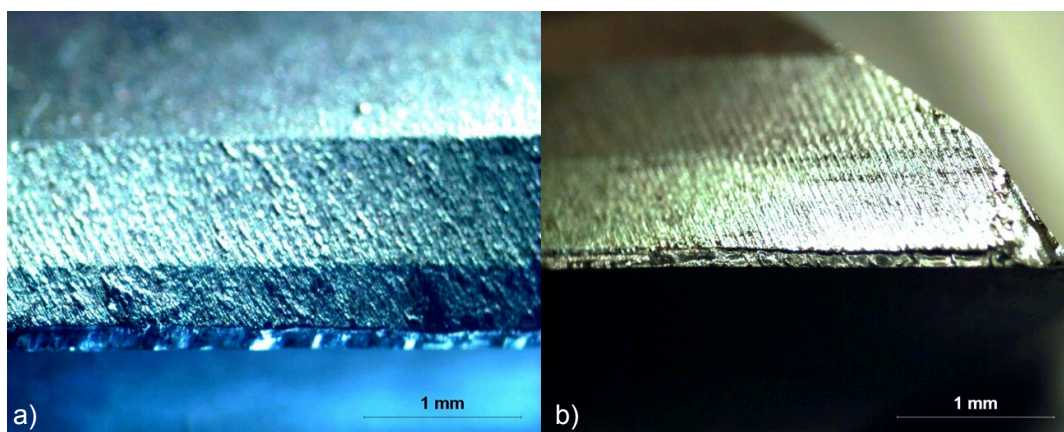


Figura 3.9 – Ferramenta revestida com AlCrN (a), TiAlN (b), $V_c = 100$ m/min, $f_z = 0,015$ mm/dente, desgaste de flanco $VB_B = 0,2$ mm.

Durante o primeiro teste com ferramentas de cada revestimento as medições de força, torque, rugosidade e análise de desgaste foram feitas a cada 10 passadas. Posteriormente com maior conhecimento sobre a vida da ferramenta e seu comportamento ao longo da mesma, optou-se, até mesmo por uma questão de agilidade na execução dos

testes, realizar paradas a cada 20 passadas. A mudança não alterou o comportamento da ferramenta, levando em conta a comparação entre os dados coletados nas réplicas.

Todos os testes foram realizados sem a aplicação de fluido de corte, isto é, usinagem realizada a seco.

Tabela 3.3 – Critérios de fim de vida da ferramenta

Tipo de teste	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	fz (mm/dente)	Critério de Fim de Vida
Condição 1	80	153	0,015	200 Passadas ou VB _B =0,2 mm
Condição 2	100	191	0,015	140 Passadas p/ AlCrN 100 Passadas p/ TiAlN

3.4.1 Reafiação

O processo de reafiação foi realizado no Centro de Reafiação da OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda., em anexo a fábrica, localizado em Bragança Paulista – SP.

O processo de reafiação consiste em refazer toda a geometria da ferramenta através do processo de usinagem da mesma, utilizando uma ferramenta de rebolo abrasivo. Depois de reafiada as ferramentas são enviadas para Oerlikon Balzers, localizada em Jundiaí – SP, onde a ferramenta recebe o revestimento. O recobrimento da ferramenta pode ser feito por cima do revestimento anterior ou retirando o antigo revestimento (processo conhecido por decapagem) e aplicando um novo. No caso deste trabalho foi feito um recobrimento sem retirar o pré-existente.

A Oerlikon Balzers realiza o processo de recobrimento da ferramenta utilizando o processo PVD e seguindo o critério de manter a espessura do revestimento entre 0,002 e 0,005 mm.

O fim de vida da ferramenta foi pré-determinado em conjunto com o setor de reafiação da OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda.. O critério adotado para o fim de vida, na condição 1, foi o desgaste de flanco médio (VB_B) de 0,2 mm. Esse é o desgaste máximo que a ferramenta pode apresentar para que se possa obter uma reafiação sem necessidade de perder muito no diâmetro final da ferramenta, uma vez que a reafiação é feita no sentido radial da ferramenta.

3.4.2 Medição de torque e força

Os parâmetros de torque e força foram obtidos com a utilização do dinamômetro rotativo Kistler 9123C. Para que a aquisição dos sinais seja feita de forma correta deve-se primeiramente escolher a quantidade de pontos que se deseja adquirir e o intervalo de tempo para essa aquisição. A quantidade de pontos está ligada diretamente à rotação da ferramenta durante um determinado tempo. Deve-se assegurar que seja feita pelo menos uma aquisição, ou seja, obter um ponto a cada contato da aresta de corte com a peça a ser usinada. Para uma velocidade de corte de 100 m/min, a rotação da ferramenta (diâmetro de 10 mm) é de 3185 rpm, o equivalente a 0,0188 seg/rev. Lembrando que a ferramenta utilizada possui 4 arestas cortantes, a cada $\frac{1}{4}$ deste tempo 0,0047 segundos uma aresta toca a peça, devemos então garantir que neste intervalo de tempo pelo menos um ponto seja adquirido.

Neste trabalho foi adotado a taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo, ou seja, 1 ponto a cada 0,001 segundos, o que garante que a cada novo movimento de entrada ou saída da aresta de corte sobre a peça usinada pelo menos 1 ponto seja adquirido.

Foi adotado um tempo de 16 segundos para aquisição dos dados, mas para análise descartou-se os primeiros 8 segundos para garantir que o corte já havia sido iniciado, pois a aquisição sempre iniciava antes da ferramenta tocar a peça. Durante os 8 segundos restantes os sinais adquiridos se mostram mais estáveis, estabelecendo um maior padrão. Dentro desse período, portanto é que será feita toda análise dos sinais adquiridos. A Fig. 3.10 ilustra todos os pontos adquiridos em um único teste, destacando o trecho considerado para análise.

As forças de usinagem variam periodicamente de acordo com a rotação do eixo, cada aresta da fresa exerce uma força para cisalhar o material, que se repete periodicamente a cada rotação. O gráfico de força em função da posição angular é bem próximo de uma senóide, ou seja, variando entre resultados de força negativo e positivo como pode ser visto na Fig. 3.11, com a escala de tempo alterada.

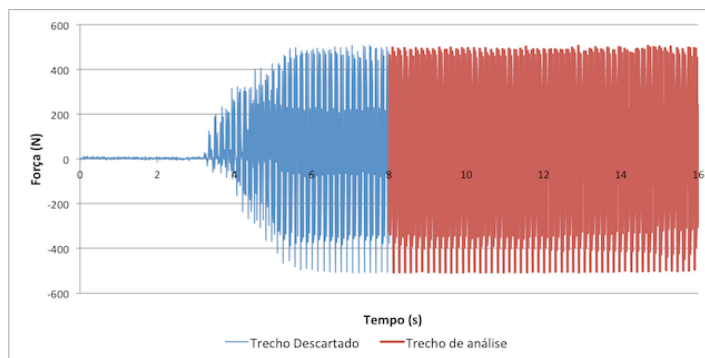


Figura 3.10 – Gráfico da força F_x durante o intervalo de 16 segundos.

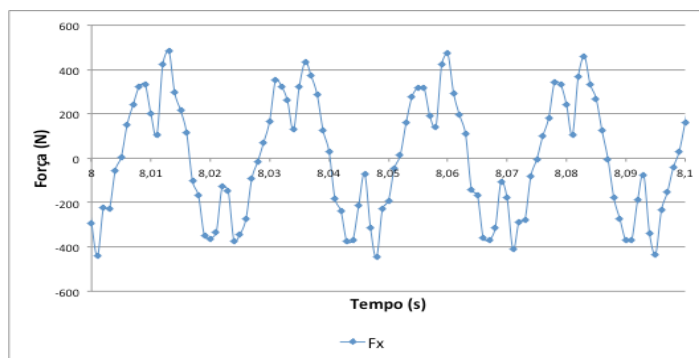


Figura 3.11 – Gráfico da Força F_x durante o intervalo de 0,1 segundos.

A análise dos sinais consiste basicamente em colocar os dados em modulo e depois tirar a média dos máximos (picos) gerados no intervalo escolhido. O gráfico resultante do modulo dos valores da Fig. 3.11 é apresentado na Fig. 3.12, para obtenção dos valores de F_x , F_y , F_z e M_z , onde F_x e F_y resultam na força ativa (F_t), F_z coincide com a força passiva (F_p) e M_z com o torque. A Fig. 3.13 ilustra a decomposição das forças em relação ao mandril do dinamômetro rotativo.

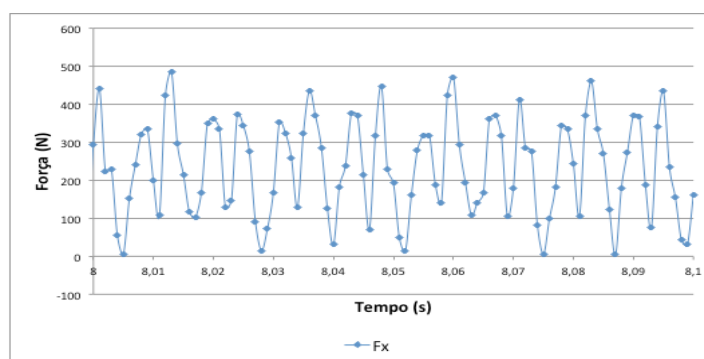


Figura 3.12 – Gráfico da força F_x em modulo.



Figura 3.13 – Dinamômetro Rotativo Kistler (KISTLER, p. 1).

3.4.3 Medição da rugosidade

Para medir a rugosidade foram adotados como parâmetros de avaliações R_a , R_z e R_t (Norma ABNT NBR 4287, 2002), pois estes parâmetros são comumente utilizados no controle da qualidade de superfícies usinadas de moldes e matrizes. Para garantir uma medição correta da rugosidade, foram realizadas três leituras em três locais diferentes da parede da peça usinada; foram calculadas a média das nove leituras e a dispersão.

Foi utilizado o rugosímetro Mitutoyo SJ-201, uma base magnética da mesma marca e um suporte confeccionado no próprio LEPU para possibilitar o posicionamento do apalpador, de maneira que se pudesse realizar a medição da rugosidade na parede usinada como mostra a Fig. 3.14. Um nível de bolha foi utilizado para garantir o nivelando do apalpador, tanto na horizontal quanto na vertical, em relação a superfície a ser medida.

Foi efetuada a calibração pontual do rugosímetro utilizando-se o padrão de rugosidade Mitutoyo, nº série 1031008 e certificado de calibração nº 15218/11. A calibração foi realizada a uma temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e R_a de $2,93\text{ }\mu\text{m}$. A incerteza associada a calibração do rugosímetro foi avaliada, sendo que a incerteza expandida assume o valor de $0,46\text{ }\mu\text{m}$ para um fator de abrangência (k) de 2,57 e probabilidade de abrangência de 95,45%.

Com o rugosímetro previamente calibrado foi realizado a medição da rugosidade superficial da peça para uma temperatura ambiente de, aproximadamente, 28°C . Como a rugosidade tende a aumentar ao longo da vida da ferramenta foi calculada a incerteza dos valores coletados na primeira passada e na última, ou seja, com a ferramenta nova e no seu fim de vida.

A incerteza expandida associada à medição do parâmetro R_a para a ferramenta nova é de $1,19\text{ }\mu\text{m}$, para um fator de abrangência (k) de 2,57 e probabilidade de abrangência de 95,45% como mostrado na Tab. 3.4. Para a ferramenta em fim de vida a incerteza expandida é de $2,14\text{ }\mu\text{m}$ para um fator de abrangência (k) de 2,77 e probabilidade de abrangência de 95,45% como ilustrado na Tab. 3.5.

Tabela 3.4 – Incerteza calculada para ferramenta nova (MORAES, 2011, p. 81).

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão
LRu	0,07	A	Normal	3	1	0,035355339
RRu	0,01	B	Retangular	∞	1	0,002886751
IDVib	0,0045	A	Normal	2	1	0,0045
α_{Ru}	0	B	Retangular	∞	2,08	0
α_{Pe}	0,000012	B	Retangular	∞	2,08	6,9282E-08
ΔT	8	A	Normal	∞	0,00000312	0,08660254
I_{CRu}	0,46	B	Normal	5,04	1	0,46
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,4614
Grau de liberdade efetivo ν_{eff}						5,1008
Fator de abrangência k						2,571
Incerteza expandida em μm						1,19

Tabela 3.5 – Incerteza calculada para ferramenta no fim de vida (MORAES, 2011, p. 81).

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	Incerteza padrão
LRu	1,07	A	Normal	2	1	0,619740089
RRu	0,01	B	Retangular	∞	1	0,002886751
DPlan	0	B	Triangular	∞	1	0
IDVib	0,0045	A	Normal	2	1	0,0045
α_{Ru}	0	B	Retangular	∞	82,05333333	0
α_{Pe}	0,000012	B	Retangular	∞	82,05333333	6,9282E-08
ΔT	8	A	Normal	∞	0,00012308	0,08660254
δT	0	B	Retangular	∞	0,00012308	0
I_{CRu}	0,46	B	Normal	5,04	1	0,46
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,7718
Grau de liberdade efetivo ν_{eff}						4,2940
Fator de abrangência k						2,776
Incerteza expandida em μm						2,14

Como esperado a incerteza expandida associada ao R_a no fim de vida da ferramenta é quase o dobro da incerteza para uma ferramenta nova. Isto pode ser justificado porque o desvio padrão da indicação do rugosímetro aumenta, quando a ferramenta se aproxima do fim de vida, indicando que a superfície é menos homogênea.



Figura 3.14 – Conjunto utilizado para medição de rugosidade na superfície usinada, vista superior (esquerda) e vista lateral (direita).

É importante salientar que durante um teste de vida de longa duração como os que foram realizados neste trabalho, os valores de rugosidade começam muito pequenos e no fim de vida tendem a valores 10 vezes maiores que os obtidos com a ferramenta nova, portanto faz-se necessário alterar os valores de cut-off (comprimento de amostragem) conforme a Tab. 2.6 citada no Capítulo II.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os experimentos nos testes específicos de força, torque, rugosidade e desgaste ao longo da vida da ferramenta em forma de tabelas e gráficos. Posteriormente estes dados são tratados de forma estatística para que se possa analisar os resultados dos testes realizados com confiabilidade.

4.1 Resultados dos Testes de Vida

O comportamento da ferramenta ao longo da vida indica uma taxa de desgaste alta nos primeiros instantes de corte e uma taxa de desgaste menos acentuada nos tempos finais de corte.

A ferramenta sofre um desgaste acelerado no início do corte, passando para um comportamento com taxa de desgaste constante. Próximo ao fim de vida ocorre um acentuado aumento na taxa de desgaste proveniente das elevadas temperaturas e tensões promovidas pela deterioração da aresta de corte (MACHADO et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000).

O desgaste de flanco, geralmente, tem uma taxa de crescimento uniforme em relação à aresta de corte. A largura do desgaste de flanco é relativamente fácil de ser medida. A evolução do desgaste de flanco, para todas as ferramentas, ocorre com uma alta taxa inicial, diminuindo consideravelmente após um curto espaço de tempo de corte, a menos que altas velocidades de corte sejam selecionadas (ÁVILA, 2003).

Um desgaste de flanco irregular as vezes é causado pelo lascamento da aresta de corte. Este lascamento consiste no arrancamento de partículas e/ou pedaços da aresta durante o processo de corte.

4.1.1 Ferramentas com revestimento TiAlN

A Figura 4.1 apresenta o desgaste ao longo da vida da ferramenta revestida com TiAlN, comparando a evolução dos valores da ferramenta reafiada com a nova.

Observa-se que há a tendência da ferramenta nova apresentar menores desgastes que as ferramentas reafiadas. Estes resultados, entretanto, não se confirmaram pela análise estatística, com 95% de confiabilidade, colocando as duas ferramentas com igual desempenho.

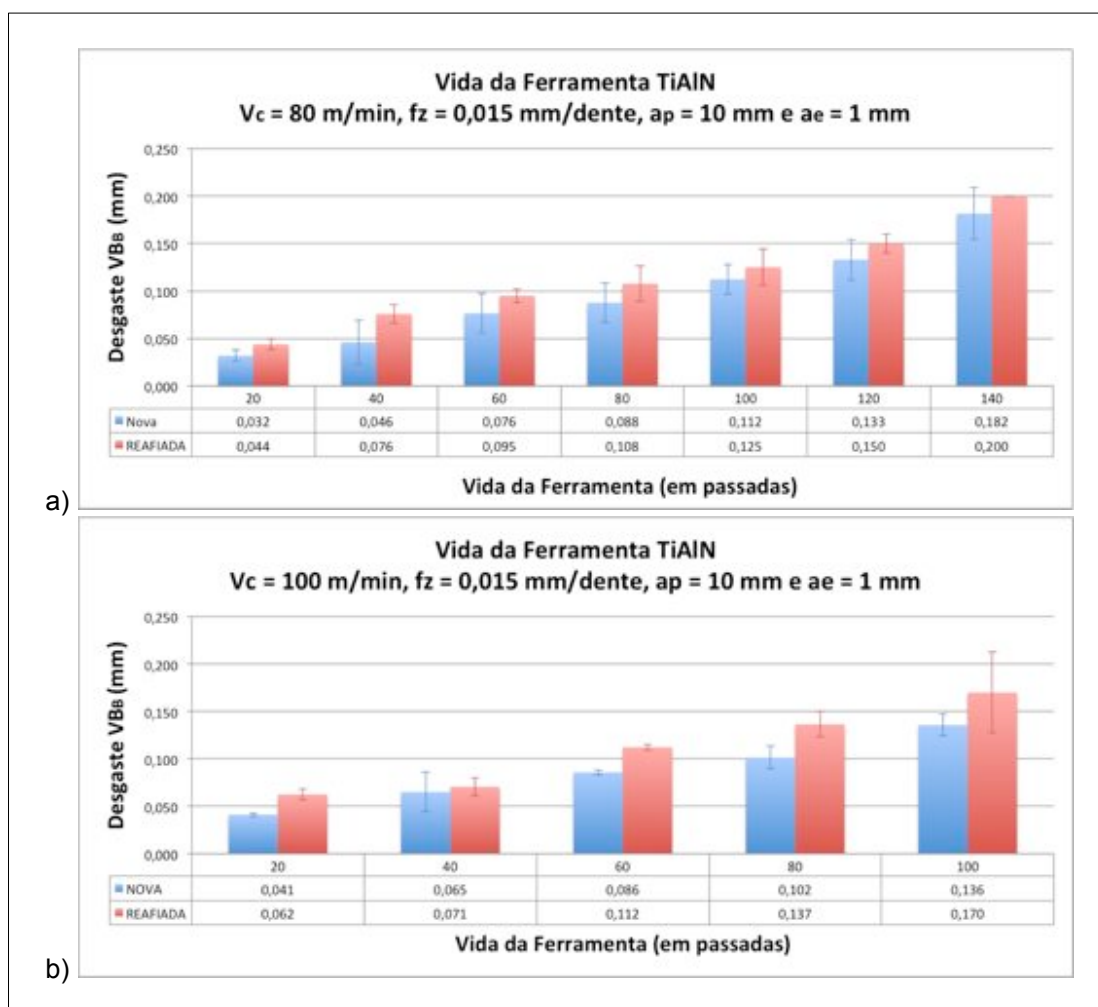


Figura 4.1 – Gráfico do desgaste para TiAlN com $v_c=80 \text{ m/min}$ (a) e $v_c=100 \text{ m/min}$ (b).

4.1.2 Ferramentas com revestimento AlCrN

A Figura 4.2 apresenta o desgaste ao longo da vida da ferramenta revestida com AlCrN, comparando a evolução dos valores da ferramenta reafiada com a nova.

As ferramentas reafiadas e recobertas com AlCrN apresentaram um desgaste ligeiramente inferior ao de uma ferramenta nova. Entretanto, estes desgastes se igualam estatisticamente, com 95% de confiabilidade.

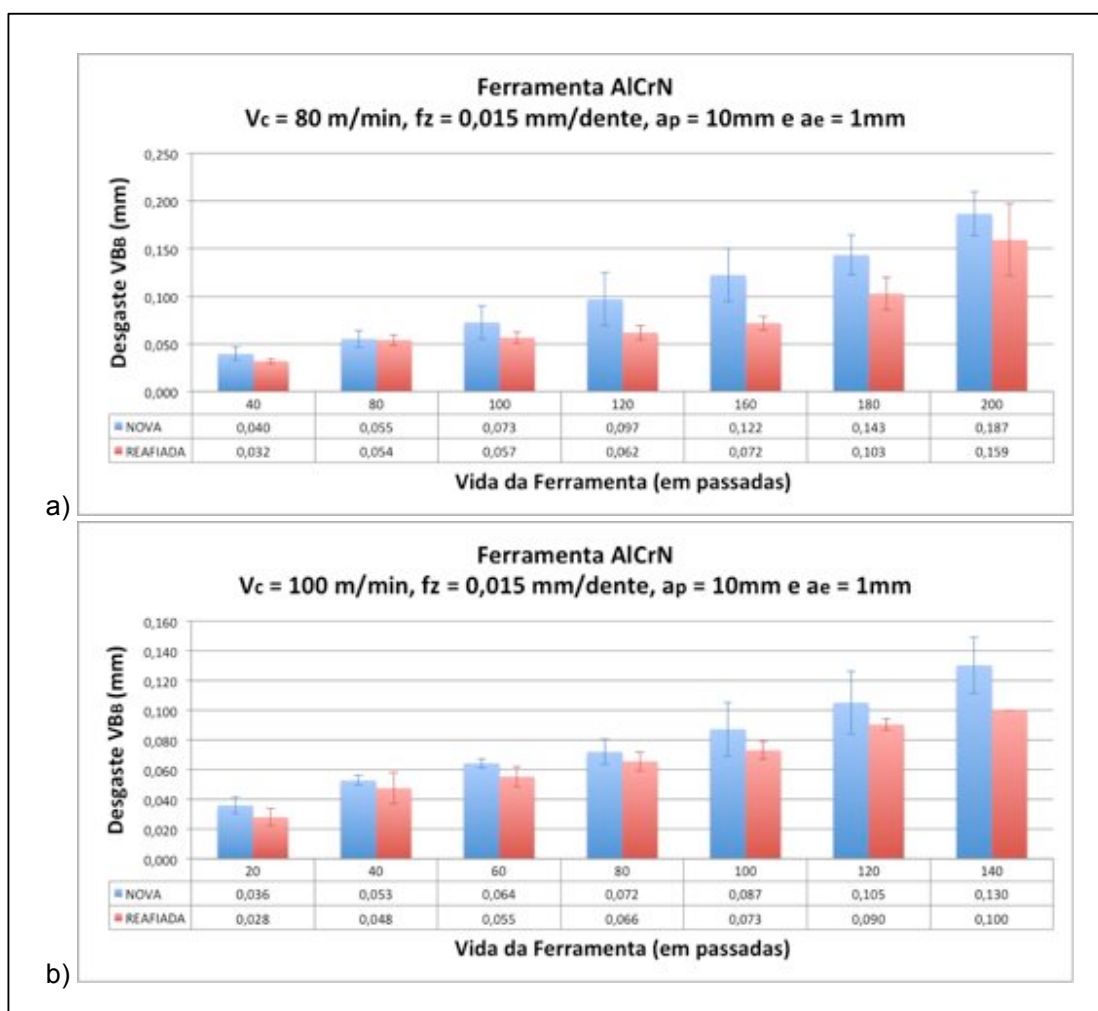


Figura 4.2 – Gráfico do desgaste para AlCrN com $v_c=80 \text{ m/min}$ (a) e $v_c=100 \text{ m/min}$ (b).

4.1.3 Análise estatística dos dados de desgaste

Durante os pré-testes ficou evidente que o aço VP20ISO apresentou melhor usinabilidade em maiores velocidades de corte, o que acarretou em um maior tempo de usinagem para que a ferramenta chegasse ao fim de vida estipulado.

A ferramenta revestida com TiAlN apresentou uma maior taxa de desgaste de flanco do que a revestida com AlCrN. As principais causas associadas a este resultado podem ser atribuídas a falta de uma boa adesão do revestimento ao substrato da ferramenta, a alta dureza deste revestimento que indica a provável baixa tenacidade do mesmo, além das condições mecânicas, químicas e térmicas impostas durante o processo de fresamento (ÁVILA, 2003). Considerando a velocidade de corte utilizada, o avanço, a profundidade de corte, a alta dureza do material usinado, associado a elevadas temperaturas na região de corte, proporcionaram o melhor desempenho do revestimento AlCrN devido a sua maior capacidade de trabalho em elevadas temperaturas, 1.100 °C, enquanto que o TiAlN tem uma temperatura máxima de operação de 900°C.

De forma geral as ferramentas revestidas com AlCrN tiveram um desempenho superior as ferramentas revestidas com TiAlN, possibilitando sua utilização por um tempo maior de usinagem até atingir o fim de vida estipulado.

A Tabela 4.1 ilustra os tempos de usinagem (vida) para cada tipo de revestimento.

Tabela 4.1 – Tempo de usinagem das ferramentas

Velocidade de Corte	Tempo Médio de Usinagem	
	AlCrN	TiAlN
80 m/min	8h 45 min (VB _B =0,2 mm / 200 passadas)	5h 50 min (VB _B =0,2 mm / 140 passadas)
100 m/min	4h 40 min (140 passadas)	3h 20 min (100 passadas)

Para analisar o desgaste das ferramentas utilizou-se de um planejamento fatorial clássico 2^k, com 2 níveis (ferramentas novas e reafiadas) e 3 fatores (velocidade de corte, revestimento e reafiação), gerando um planejamento fatorial de 2³, para uma confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas apenas com os valores da 100ª passada. O gráfico de Pareto gerado e apresentado na Fig. 4.3a, com os níveis apresentados na Tab. 4.2, mostra que o revestimento foi o fator que apresentou influência significativa sobre a vida da ferramenta, o que é esperado devido a melhor desempenho do revestimento AlCrN em relação ao TiAlN nos testes realizados.

As ferramentas reafiadas e recobertas com AlCrN apresentaram um desgaste muito próximo de uma ferramenta nova, enquanto que as ferramentas reafiadas e recobertas com TiAlN apresentaram um desgaste levemente superior ao de uma nova.

Tabela 4.2 – Níveis das variáveis de entrada.

Fatores	Níveis	
	-1	1
Velocidade	80 m/min	100 m/min
Reafiação	Nova	Reafiada
Revestimento	AlCrN	TiAlN

O gráfico de tendência apresentado na Fig. 4.3b mostra que com o aumento da velocidade de corte o desgaste também aumentou. A Figura 4.3c mostra que, quando feita a comparação entre os revestimentos o desgaste foi menor nas ferramentas cobertas com AlCrN. A Figura 4.3d mostra que o desgaste foi maior nas ferramentas reafiadas.

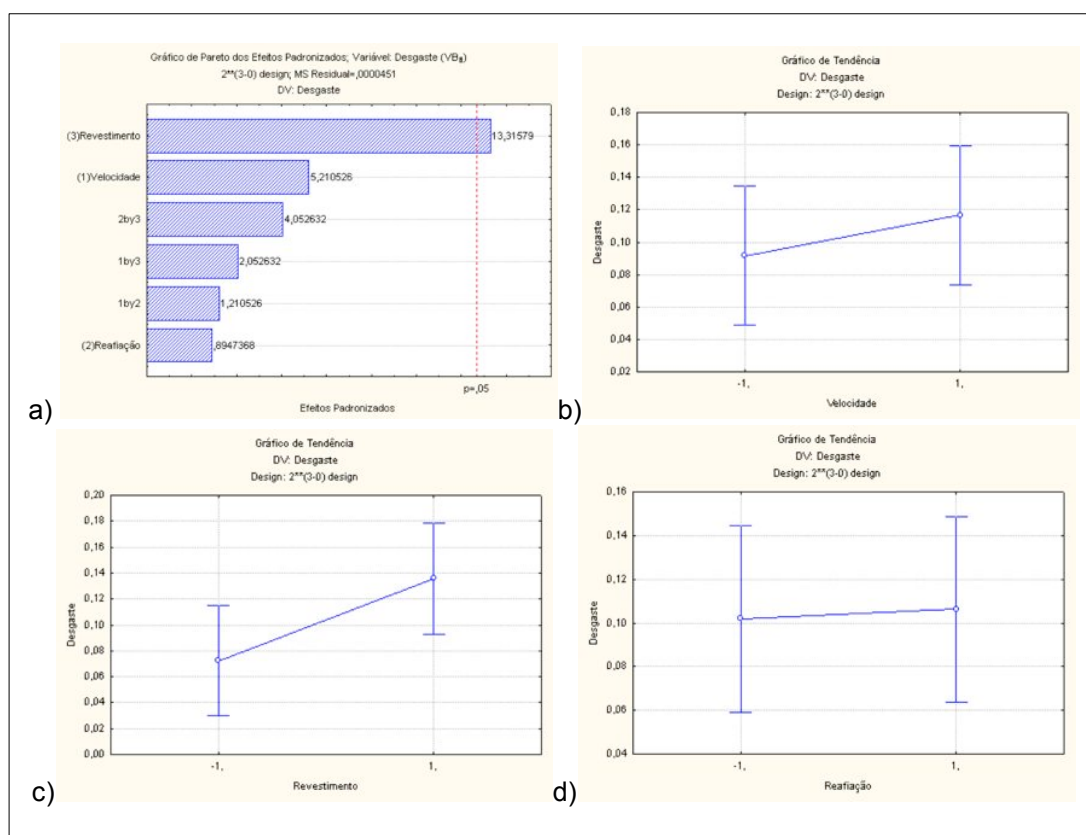


Figura 4.3 – Gráficos para análise de desgaste, gráfico de pareto para o desgaste VB_B (a), gráfico de tendência para velocidade de corte (b), revestimentos (c) e reafiação (d).

4.1.4 Desgaste analisado em MEV

Ao analisar o desgaste das ferramentas no fim de vida, na região do flanco, utilizadas com velocidade de corte de 80 m/min pode-se notar que na ferramenta revestida com AlCrN, ilustrado na Fig. 4.4, o desgaste tem uma aparência característica da ocorrência do mecanismo de desgaste adesivo (attrition). Observa-se muito material da peça aderido na superfície desgastada da ferramenta e asperidades na área, que são fortes indicativos de desgaste adesivo.

Observa-se na foto da Fig. 4.4a, tiradas com ampliação menor, que no final da profundidade de corte houve um pequeno lascamento, que podem ter tido origem em trincas térmicas e mecânicas ou apenas mecânicas. A conclusão é difícil, uma vez que não foram feitas análises no MEV em diferentes estágios de desgaste da ferramenta. Estes mecanismos de desgaste e avaria apresentados são típicos de usinagem deste tipo de material, ferramenta, condições de corte e processo de usinagem utilizados (MACHADO et al., 2009; TRENT e WRIGHT, 2000).

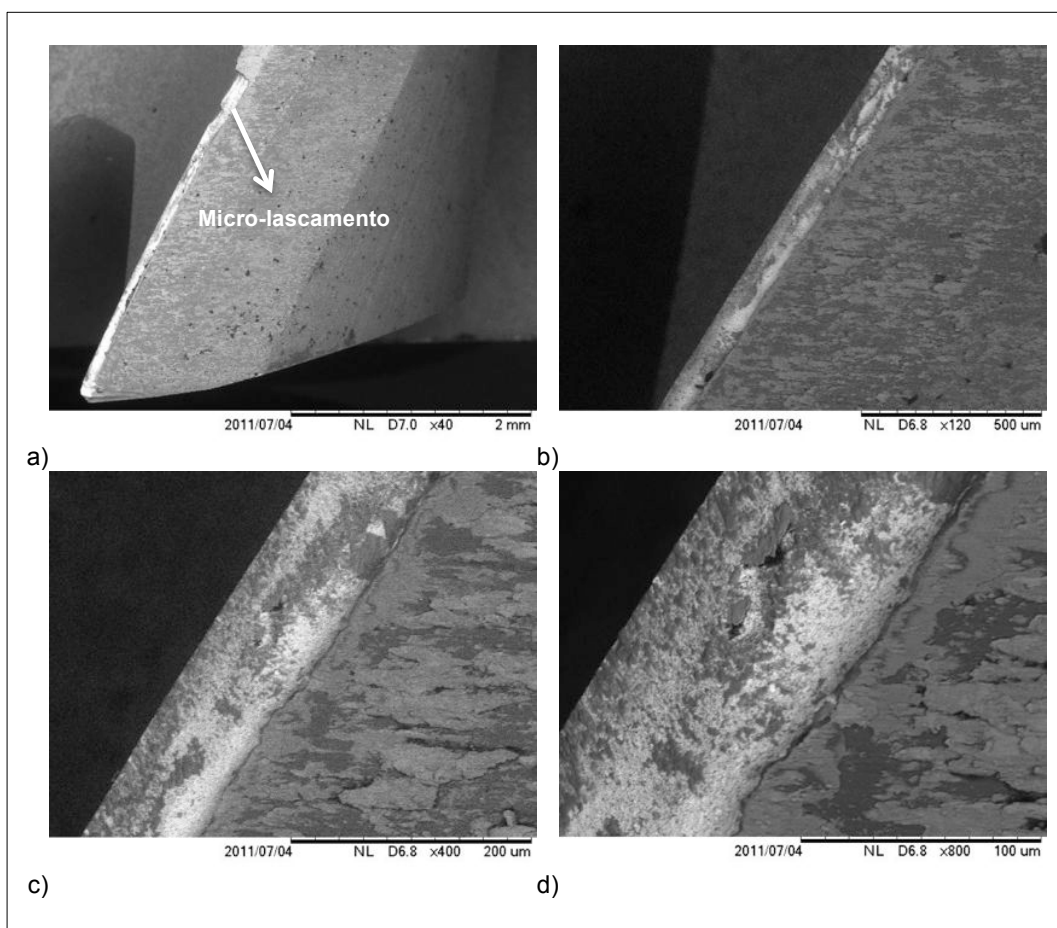


Figura 4.4 – Desgaste analisado utilizando um MEV, ferramenta revestida com AlCrN na região de flanco da ferramenta, $v_c = 80$ m/min, (a) aumento de 40x, (b) 120x, (c) 400x, (d) 800x, com desgaste de 122 μm (VB_B).

Para a ferramenta revestida de TiAlN utilizadas com menor velocidade de corte, 80 m/min, Fig. 4.5, a característica da área desgastada é também típica do mecanismo adesivo (attrition). Observa-se as asperezas da superfície e material da peça aderido. Lascas não foram observadas.

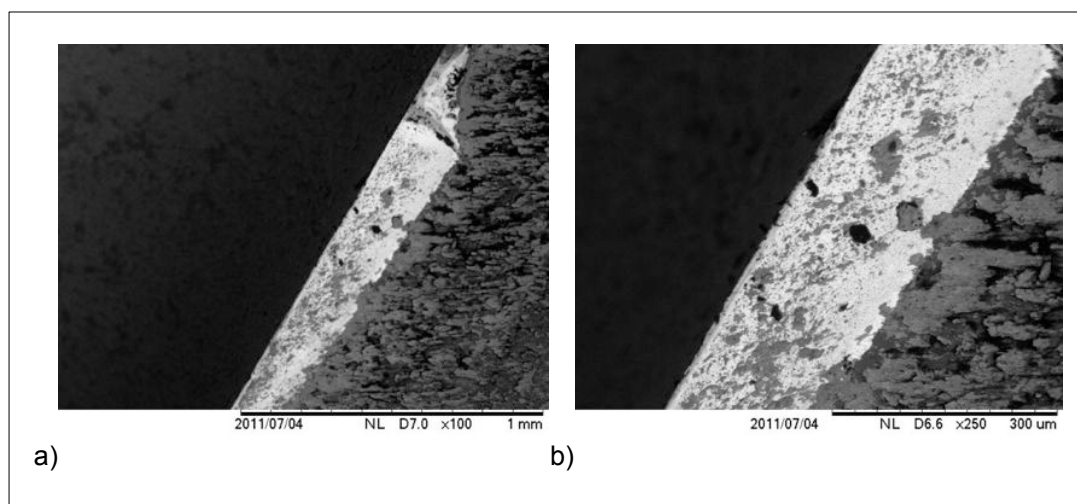


Figura 4.5 – Desgaste analisado utilizando um MEV, ferramenta revestida com TiAlN na região de flanco da ferramenta, $v_c = 80$ m/min, (a) aumento de 100x e (b) 250x, com desgaste de 202 μm (VB_B).

Com o aumento da velocidade de corte de 80 m/min para 100 m/min a ferramenta revestida com TiAlN apresentou um padrão de desgaste de flanco irregular (Fig. 4.6), diferente da anterior (Fig. 4.5), onde este desgaste é bastante regular. Nas ferramentas revestidas com AlCrN, na maior velocidade de corte de 100 m/min, o padrão de desgaste também não é regular (Fig. 4.7), mas não tanto quanto aquele observado para as ferramentas de TiAlN.

O desgaste de flanco irregular observado nas ferramentas revestidas com AlCrN é acompanhado de muita aderência do material da peça, mas com evidências de sulcos abrasivos debaixo da camada aderida (Fig. 4.6).

Na Fig. 4.7 é observado também muito material da peça aderido na superfície da ferramenta revestida com AlCrN e asperezas típicas do desgaste adesivo (attrition), com a possibilidade de ter ocorrido também abrasão, embora não ilustrado na figura.

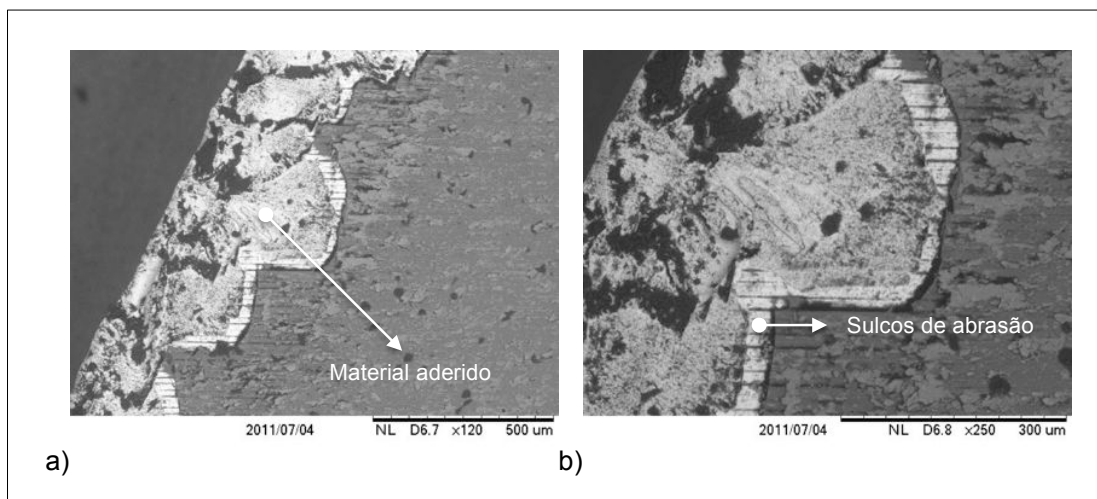


Figura 4.6 - Desgaste analisado utilizando um MEV, ferramenta revestida com TiAlN na região de flanco da ferramenta, $v_c = 100$ m/min, (a) aumento de 120x e (b) 250x , com desgaste de 300 μm (VB_{max}).

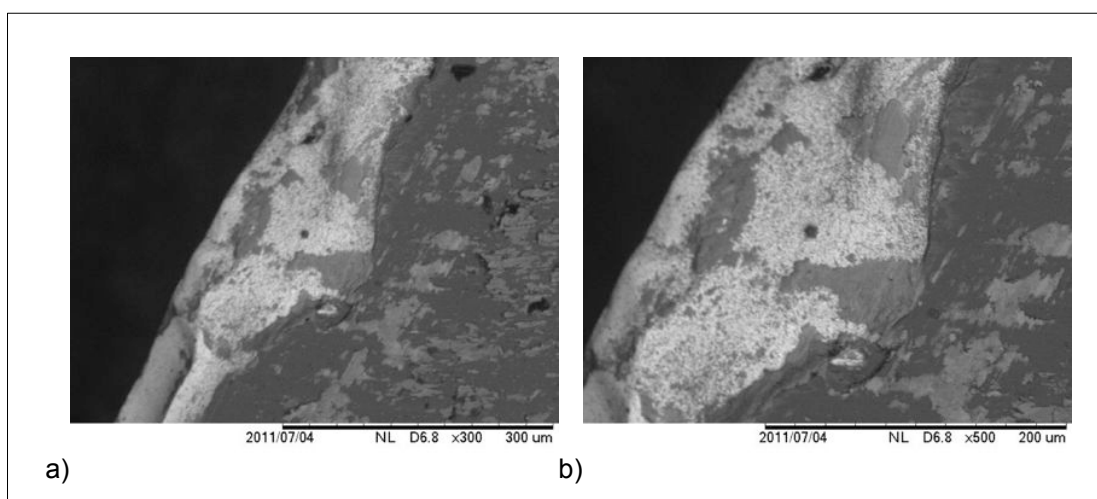


Figura 4.7 - Desgaste analisado utilizando um MEV, ferramenta revestida com AlCrN na região de flanco da ferramenta, $v_c = 100$ m/min, (a) aumento de 300x e (b) 500x, com desgaste de 200 μm (VB_{max}).

4.2 Resultados de Rugosidade

As medições de rugosidade na operação de fresamento nem sempre apresentam resultados coerentes com o citado na literatura específica sobre usinagem. Em certos casos ocorrem resultados que intrigam os que estudam esse fenômeno. No início do processo de fresamento, mesmo com ferramentas novas, o desgaste da aresta de corte tem a tendência a evoluir e atingir certas dimensões e formas que aceleram o seu próprio processo de

desgaste, prejudicando a qualidade da superfície que se está usinando. Entretanto, em certos momentos, o desgaste pode produzir uma forma na aresta de corte que se assemelha à aresta alisadora, gerando assim, superfícies com melhor acabamento. Entretanto, com a continuidade do desgaste da aresta o acabamento tem a tendência, novamente, a se deteriorar (PEREIRA, 2006).

4.2.1 Ferramentas com revestimento TiAlN

Para velocidade de corte de 80 m/min verificou-se que a rugosidade medida para os parâmetros R_a , R_z e R_t da ferramenta reafiada foi menor no fim de vida do que em relação aos valores da 120ª passada, o que pode ser justificado pelo empastamento gerado no fim de vida em alguns testes com as ferramentas reafiadas, como apresentado na Fig. 4.8.



Figura 4.8 – Empastamento no fim de vida com ferramenta TiAlN reafiada, $v_c=80\text{m/min}$.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os dados de rugosidade ao longo da vida da ferramenta revestida com TiAlN em forma de gráficos, comparando a rugosidade da ferramenta nova com a reafiada. Pode-se observar que com o aumento da velocidade de corte os valores de rugosidade tendem a diminuir, o que se justifica pela elevação da temperatura de corte, que provoca a redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, promovendo a redução das forças de usinagem e, conseqüentemente, a melhoria do acabamento. Os valores de rugosidade tendem a aumentar ao longo da vida da ferramenta devido ao desgaste natural da aresta de corte durante o processo de usinagem.

Observa-se ainda que as rugosidades das superfícies geradas pelas ferramentas novas e reafiadas no início da vida são similares. Entretanto, a medida que o desgaste se desenvolve, os valores medidos de rugosidade são diferentes para as duas ferramentas. Em várias faixas de desgaste, as ferramentas reafiadas apresentaram rugosidades menores que as ferramentas novas, possivelmente o formato dos respectivos desgastes estão influenciando estes resultados.

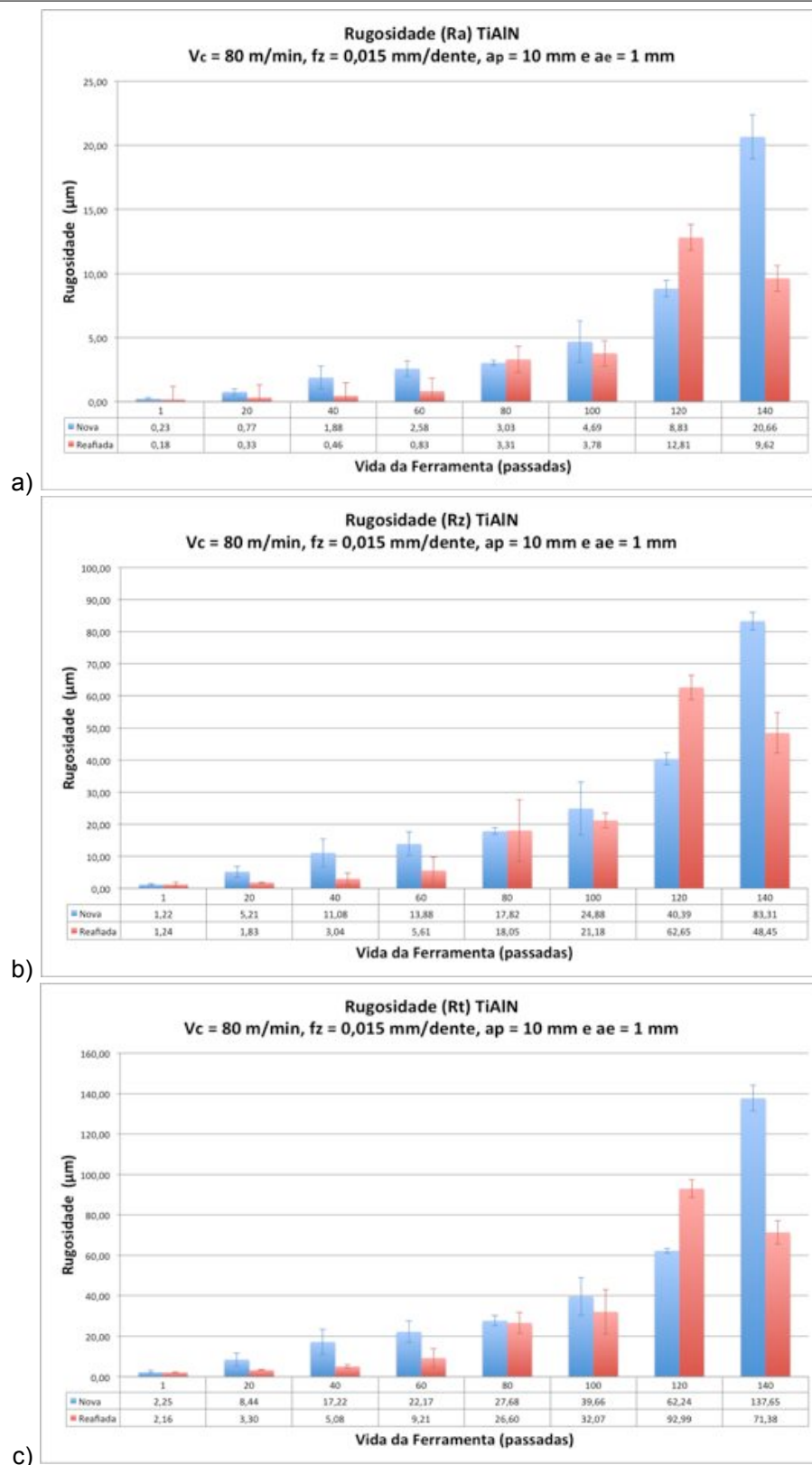


Figura 4.9 – Gráficos de rugosidade para TiAlN, $v_c=80$ m/min. R_a (a), R_z (b) e R_t (c).

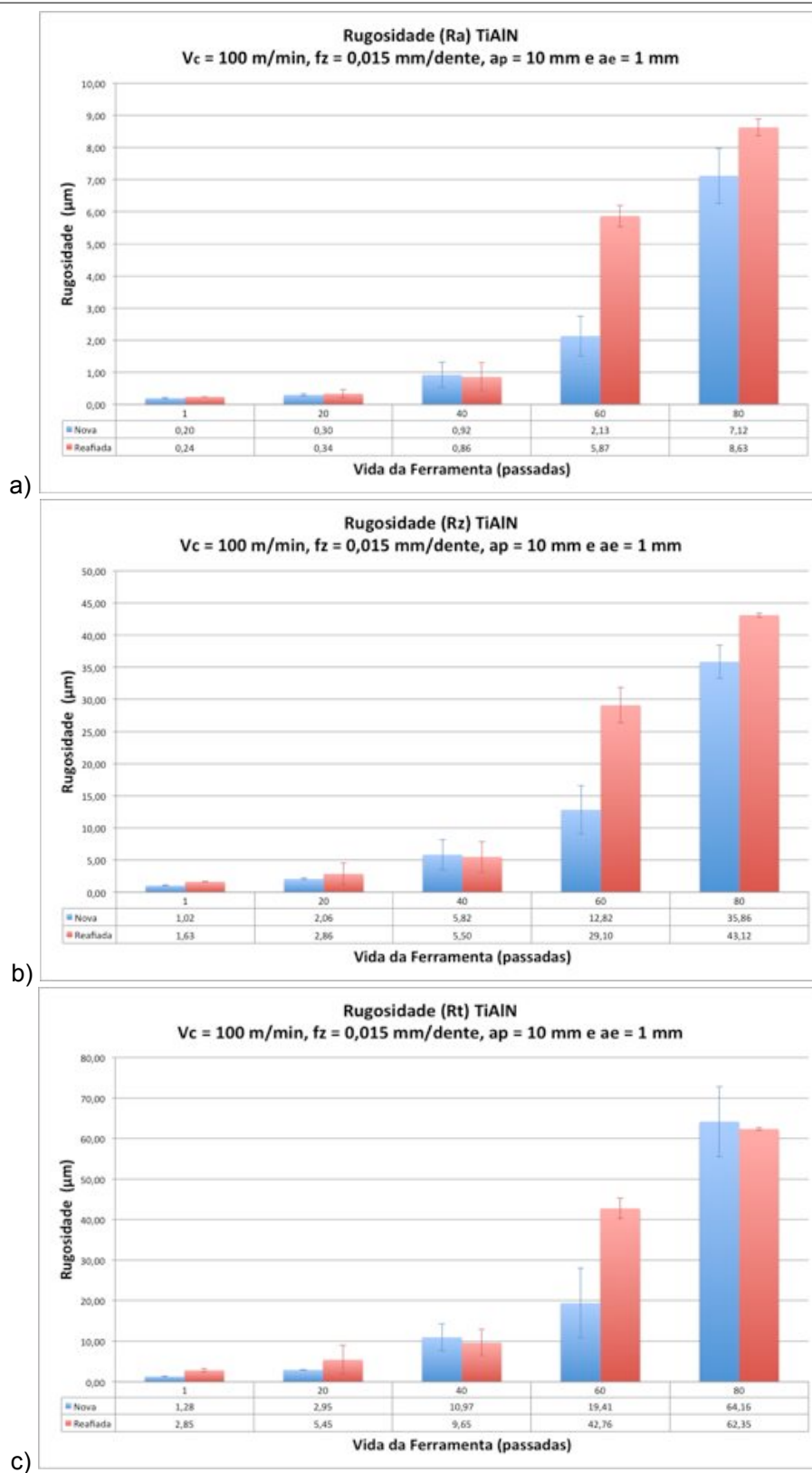


Figura 4.10 – Gráficos de rugosidade para TiAlN, $v_c=100\text{m/min}$. R_a (a), R_z (b) e R_t (c).

4.2.2 Ferramentas com revestimento AlCrN

A rugosidade da ferramenta revestida com AlCrN na condição de nova pode ser medida até aproximadamente a 180ª passada para a condição 1 ($v_c = 80$ m/min), ao passar deste valor ocorreu a tendência de adesão de cavaco sob a superfície da peça usinada como pode ser visto na Fig. 4.11, que apresenta em detalhes a evolução desta tendência de adesão do cavaco sobre a superfície. Esta adesão provavelmente ocorreu devido as altas temperaturas geradas e pelo desgaste natural do revestimento da ferramenta. Para condição 2 ($v_c = 100$ m/min), não ocorreu adesão do cavaco sobre a superfície usinada. A impressão que se tem é que a ferramenta ao atingir um valor elevado de desgaste, passa a arrancar material ao invés de cortar, deixando rebarbas na superfície usinada. Lembrando que esta é a superfície principal de usinagem.

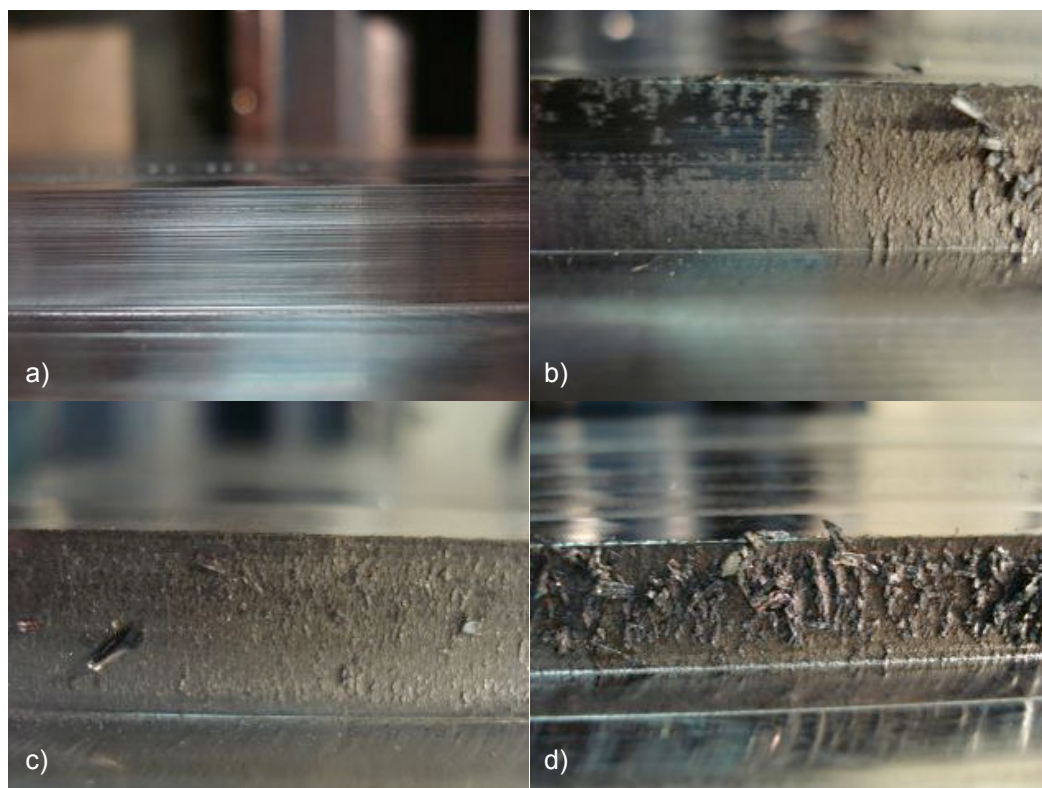


Figura 4.11 – Superfície usinada com AlCrN, $v_c = 80$ m/min, (a) ferramenta nova; (b) ferramenta com aproximadamente 80% da vida; (c) entre 90% - 95% de vida; (d) e fim de vida 100% (200ª passada).

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os dados de rugosidade ao longo da vida da ferramenta revestida com AlCrN em forma de gráficos, comparando a rugosidade da ferramenta nova com a reafiada.

Observa-se aqui o mesmo comportamento das ferramentas com cobertura TiAlN com relação à influência da velocidade de corte (maior velocidade gera melhores acabamentos) e o crescimento da rugosidade à medida que as ferramentas se desgastam. Igualmente também é o comportamento das rugosidades geradas pelas ferramentas novas e reafiadas. No início dos testes não há diferença entre elas, mas com o desgaste há a tendência da ferramenta reafiada gerar melhores acabamentos indicando que o formato desses desgastes são fatores importantes no processo de geração de superfícies.

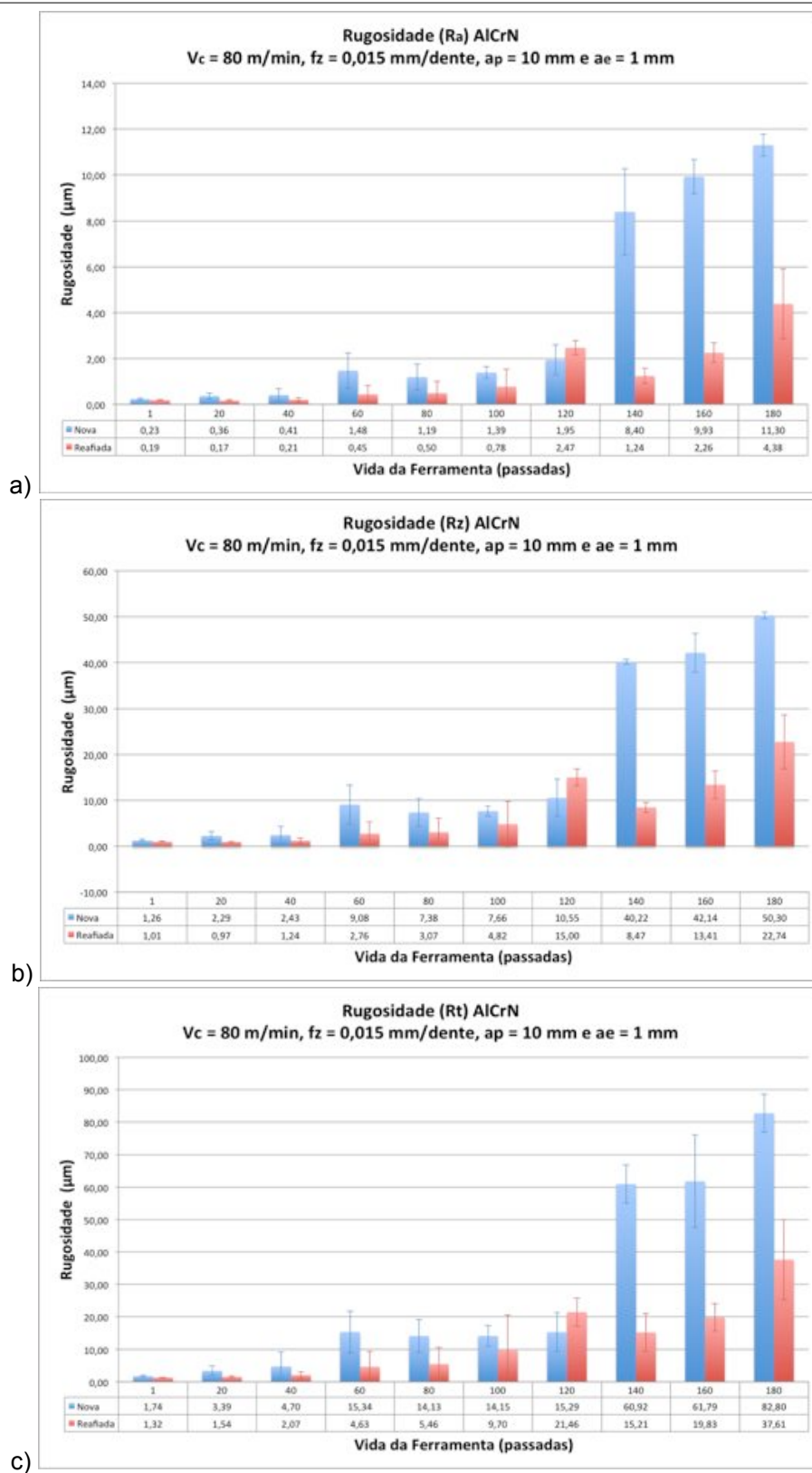


Figura 4.12 – Gráficos de rugosidade para AlCrN, $v_c=80\text{m/min}$. R_a (a), R_z (b) e R_t (c).

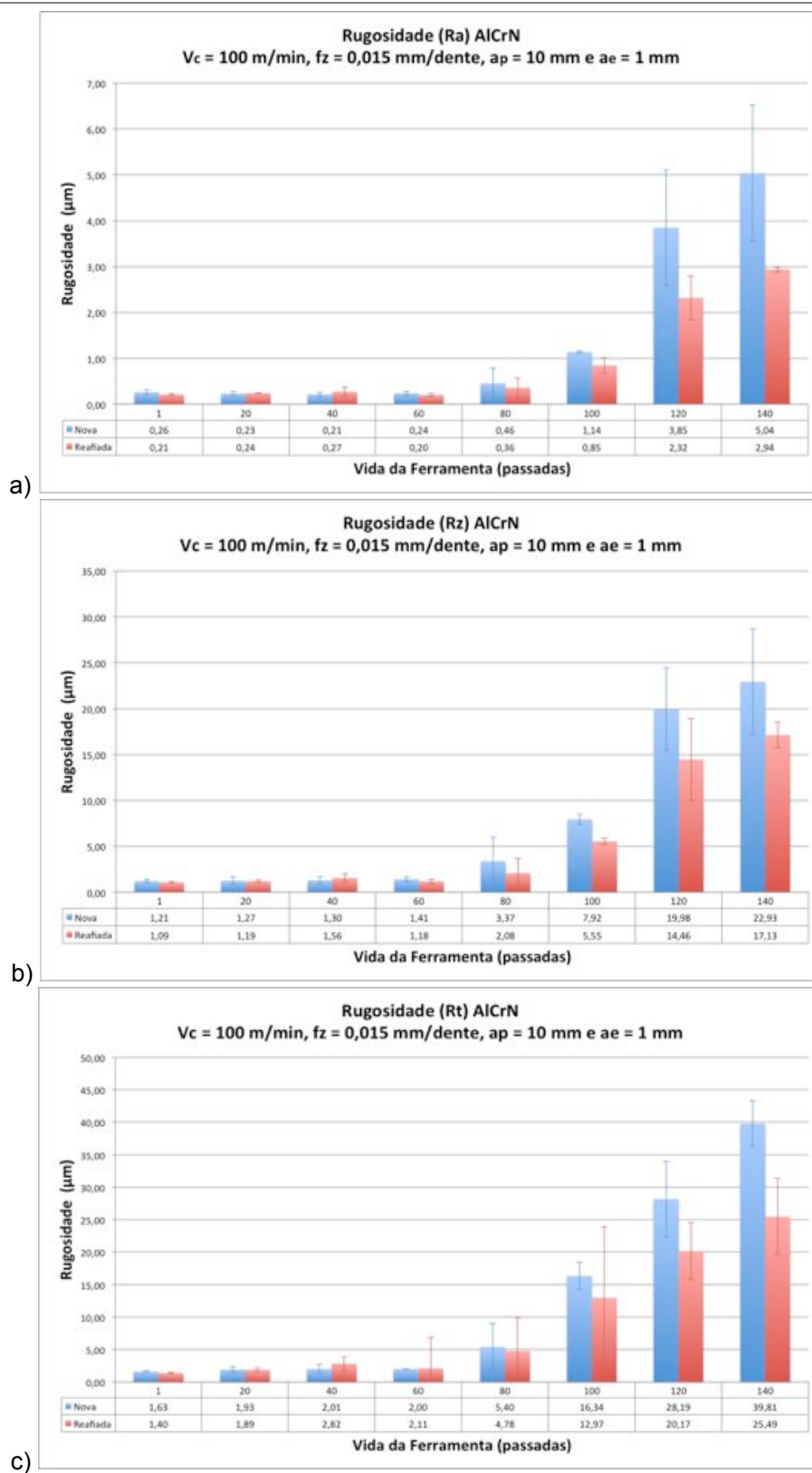


Figura 4.13 – Gráficos de rugosidade para AlCrN, $v_c=100\text{m/min}$. R_a (a), R_z (b) e R_t (c).

4.2.3 Análise estatística dos dados de rugosidade

Como ilustrado anteriormente nos gráficos de rugosidade R_a , R_z e R_t , ocorreu o aumento progressivo dos valores de rugosidade ao longo da vida da ferramenta para ambos os revestimentos utilizados, com exceção do revestimento TiAlN, para velocidade de 80 m/min, quando a ferramenta reafiada apresentou menor parâmetro de rugosidade no final de vida (140ª passada) do que na 120ª passada. Para análise estatística dos dados utilizou-se um planejamento fatorial clássico 2^k , com 2 níveis (ferramentas novas e reafiadas) e 3 fatores (velocidade de corte, revestimento e reafiação), gerando um planejamento fatorial de 2^3 , para uma confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas com os valores de rugosidade no início da vida (com o intuito de eliminar a influência do desgaste nos parâmetros de rugosidade) e na 80ª passada. Os gráficos de Pareto permitem analisar a influência de um ou mais parâmetros e suas interações, simultaneamente, na rugosidade.

Os resultados obtidos em testes de vida e apresentados na Fig. 4.14 pelos gráficos de Pareto gerados, mostram que não ocorreu uma diferença significativa na rugosidade medida entre uma ferramenta nova e a reafiada, para uma confiabilidade de 95%.

Comparando os valores de rugosidade no início da vida, utilizando o parâmetro R_a , as ferramentas revestidas com TiAlN tiveram um melhor acabamento superficial, como ilustrado na Fig. 4.14h.

As ferramentas revestidas com AlCrN apresentaram um melhor acabamento superficial quando comparadas com as de TiAlN na octogésima passada, o que pode ser explicado pelo menor desgaste gerado nas ferramentas revestidas com AlCrN, o que contribui para o revestimento ser o fator mais influente no gráfico de Pareto.

Os valores de rugosidade diminuíram com o aumento da velocidade de corte, para uma mesma velocidade de corte ocorreu a tendência do aumento da rugosidade ao longo da vida da ferramenta, o que pode ser explicado pelo aumento gradativo do desgaste gerado ao longo da vida.

As ferramentas reafiadas apresentaram no início da vida um melhor acabamento superficial quando comparadas com as ferramentas novas, como ilustrado na Fig. 4.14g.

A qualidade do acabamento superficial obtido também pode ser usada como critério de usinabilidade do material. Em casos onde o acabamento superficial de alta qualidade é exigido, material de baixa usinabilidade pode ser motivo de rejeição (STEMMER, 1995).

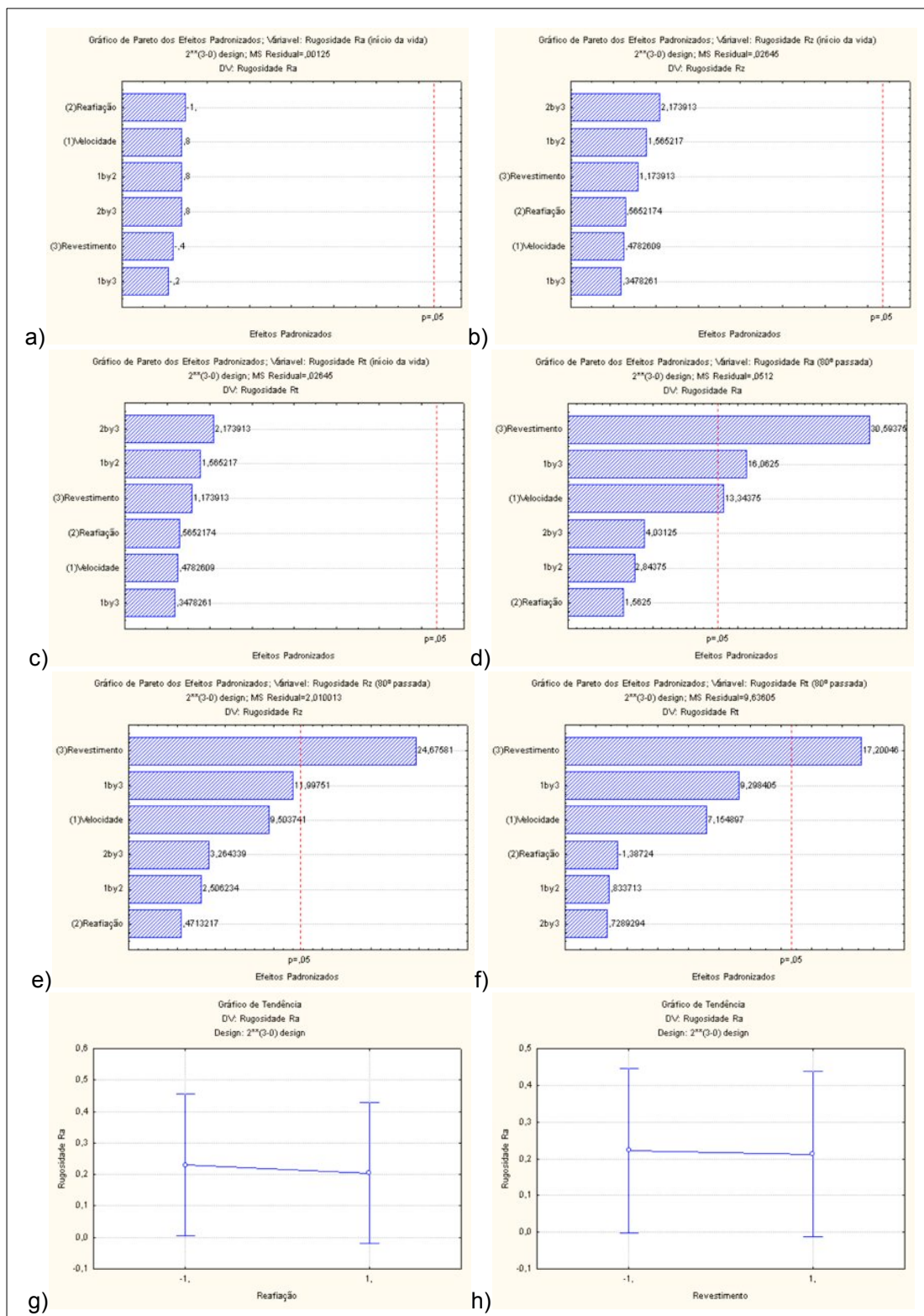


Figura 4.14 – Gráfico de Pareto para parâmetros de rugosidade no início da vida: R_a (a), R_z (b) e R_t (c). Parâmetros de rugosidade obtidos na 80ª passada: R_a (d), R_z (e) e R_t (f). Gráfico de tendência no início da vida: reafiação (g) e revestimento (h).

4.3 Resultados de Força

A vida da ferramenta pode ser definida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério de vida previamente estabelecido (FERRARESI, 1970). O desgaste gradual da ferramenta de corte ao longo da vida evidencia o aumento das forças de usinagem a níveis muito elevados quando comparado aos valores no início da vida.

A força de usinagem está relacionada a vários fatores: geometria da ferramenta, material usinado, geometria da peça, parâmetros de usinagem e desgaste das ferramentas. No caso da deflexão, a componente radial (ou perpendicular ao eixo da ferramenta) da força de usinagem é a mais importante e, em relação aos parâmetros de usinagem, depende do avanço por dente (f_z), da profundidade radial de usinagem (a_e) e da profundidade axial de usinagem (a_p). Nas operações de acabamento de moldes e matrizes, estes parâmetros de usinagem são extremamente pequenos a fim de proporcionar valores de rugosidade compatíveis com as especificações de projeto (LACALLE et al., 2004).

Nota-se na literatura a concordância entre vários autores (MACHADO e DA SILVA, 1999; TRENT e WRIGHT, 2000), para o fato de que a força de usinagem tende a diminuir com o aumento da temperatura devido ao aumento da velocidade de corte.

4.3.1 Ferramentas com revestimento TiAlN

As Figuras 4.15 e 4.16 reproduz a evolução das forças F_x , F_y e F_z longo da vida das ferramentas revestidas com TiAlN antes e após o processo de reafiação.

Observa-se que ocorre o aumento dos valores medidos das componentes de força ao longo da vida da ferramenta, o que se justifica pelo aumento da taxa de desgaste, confirmando os dados encontrados na literatura. O aumento da velocidade de corte não produz incrementos significativos de força de usinagem.

Os valores da força F_z não sofreram variações significativas com o aumento da velocidade de corte.

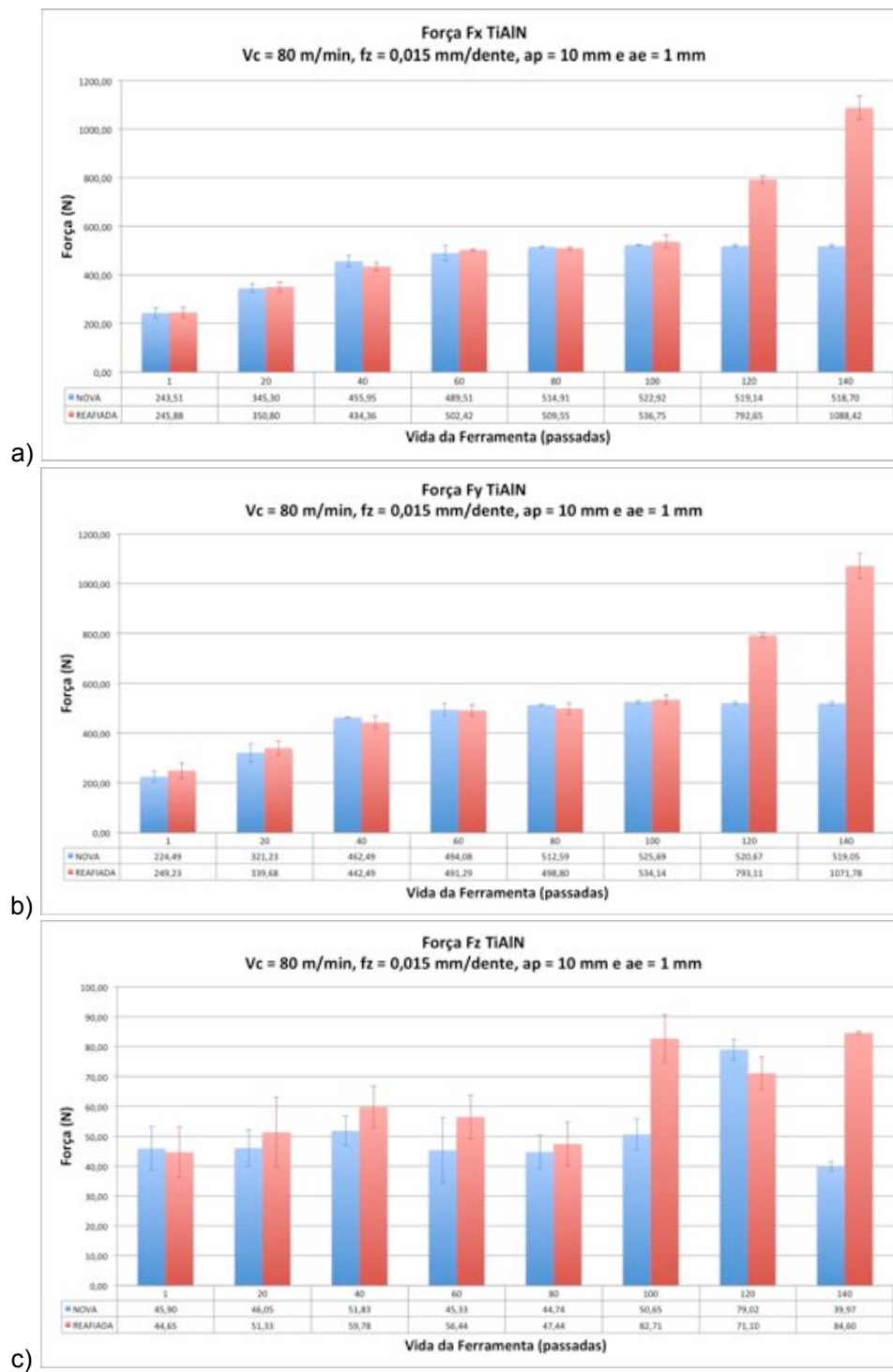


Figura 4.15 – Gráficos das forças F_x (a), F_y (b) e F_z (c) com TiAlN, $v_c = 80$ m/min.

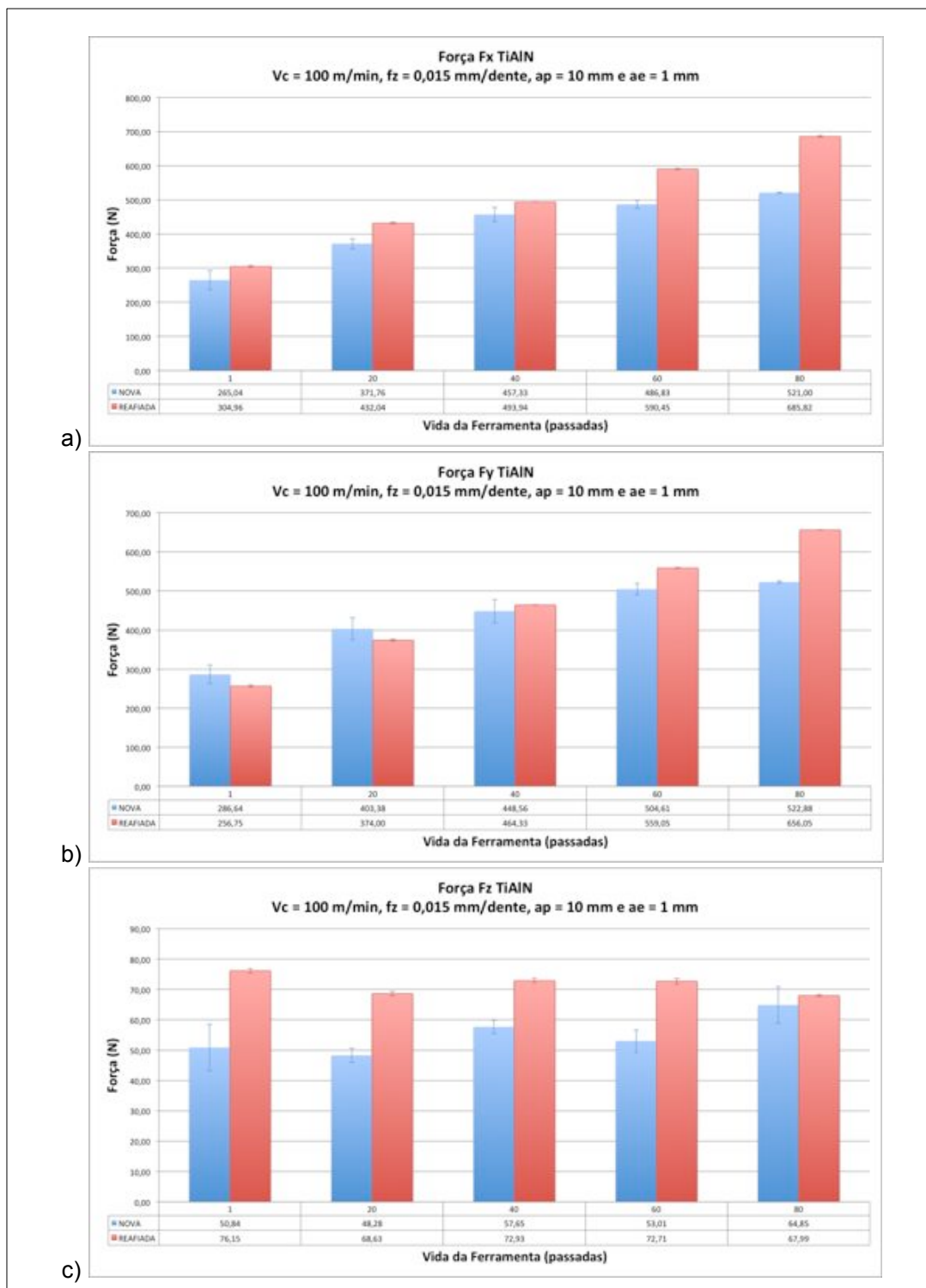


Figura 4.16 – Gráficos das forças F_x (a), F_y (b) e F_z (c) com TiAlN, v_c = 100 m/min.

4.3.2 Ferramentas com revestimento AlCrN

As Figuras 4.17 e 4.18 reproduz a evolução das forças F_x , F_y e F_z longo da vida das ferramentas revestidas com AlCrN antes e após o processo de reafiação.

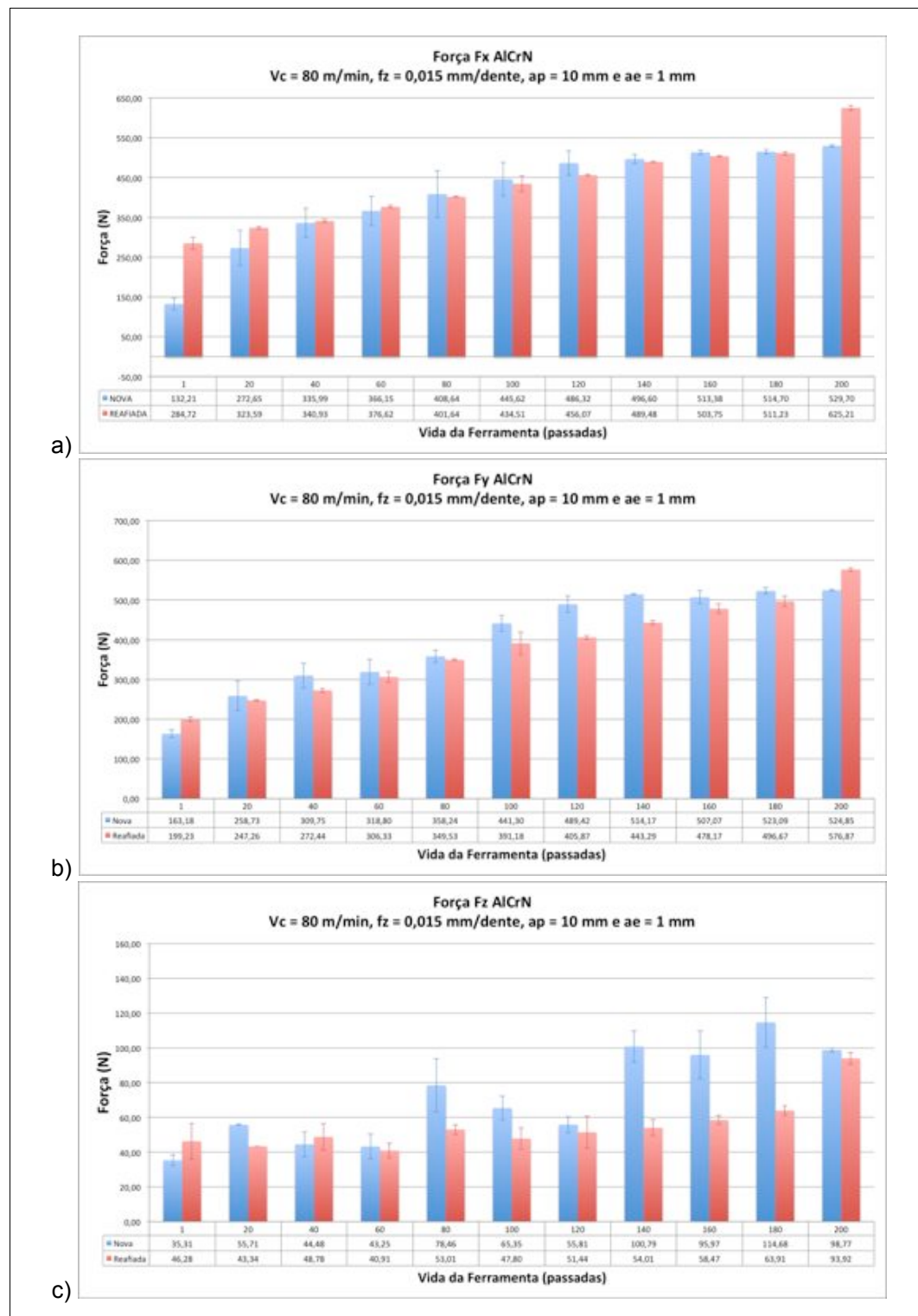


Figura 4.17 – Gráficos das forças F_x (a), F_y (b) e F_z (c) com AlCrN, $v_c = 80 \text{ m/min}$.

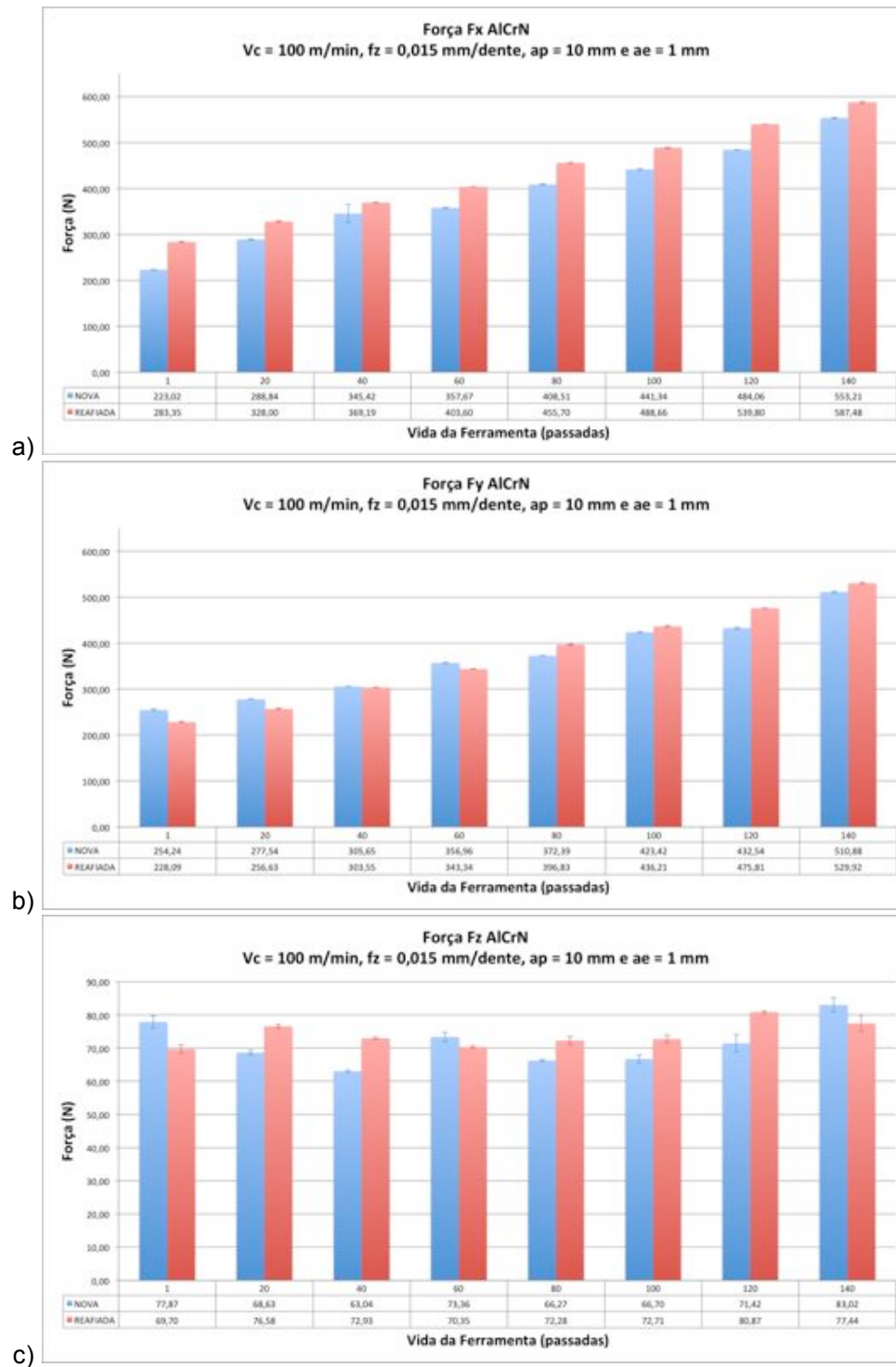


Figura 4.18 – Gráficos das forças F_x (a), F_y (b) e F_z (c) com AlCrN, $v_c = 100 \text{ m/min}$.

O comportamento das forças F_x , F_y e F_z , das ferramentas revestidas com AlCrN seguiu o mesmo comportamento das ferramentas revestidas com TiAlN ao longo da vida.

4.3.3 Análise estatística dos dados de força

Pode ser observado nos gráficos gerados anteriormente que as Forças F_x e F_y tendem a aumentar de forma linear ao longo da vida, o que pode ser explicado pelo aumento do desgaste da ferramenta. É possível perceber que a variação que ocorre nas forças F_x e F_y , quando são aumentadas as velocidades de corte, não é muito significativa, uma possível explicação para este fenômeno é que, embora ocorra o incremento na taxa de remoção de material, que acaba por promover o aumento da força de corte, por outro lado, o aumento na temperatura do cavaco acarreta na diminuição desta força, mantendo pequenas variações nos esforços gerados. A variação da força F_z não foi significativa nos testes realizados.

Para análise estatística dos dados utilizou-se um planejamento fatorial clássico 2^k , com 2 níveis (ferramentas novas e reafiadas) e 3 fatores (velocidade de corte, revestimento e reafiação), gerando um planejamento fatorial de 2^3 , para uma confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas com os valores de força no início da vida (com o intuito de eliminar a influência do desgaste) e na 80ª passada. Os gráficos de Pareto permitem analisar a influência de um ou mais parâmetros e suas interações, simultaneamente, na força. Os resultados obtidos em testes de vida e apresentados na Fig. 4.19 pelos gráficos de Pareto gerados, mostram que não ocorreu uma diferença significativa nos valores de força entre uma ferramenta nova e a reafiada.

A Figura 4.19b apresenta o resultado da análise para a força F_y com dados obtidos no início da vida da ferramenta. Neste gráfico fica evidente que o incremento da velocidade de corte, o tipo de revestimento utilizado e a interação entre a velocidade de corte e a reafiação apresentaram variações estatísticas significativas, mas necessariamente não se pode afirmar que neste caso a ferramenta reafiada apresentou um pior desempenho quando comparada com uma ferramenta nova.

A Figura 4.19g mostra que a ferramenta reafiada apresentou maiores valores de força F_x quando comparado com uma ferramenta nova. As ferramentas cobertas com TiAlN obtiveram maiores valores de força F_x no início da vida como apresentado na Fig. 4.19h.

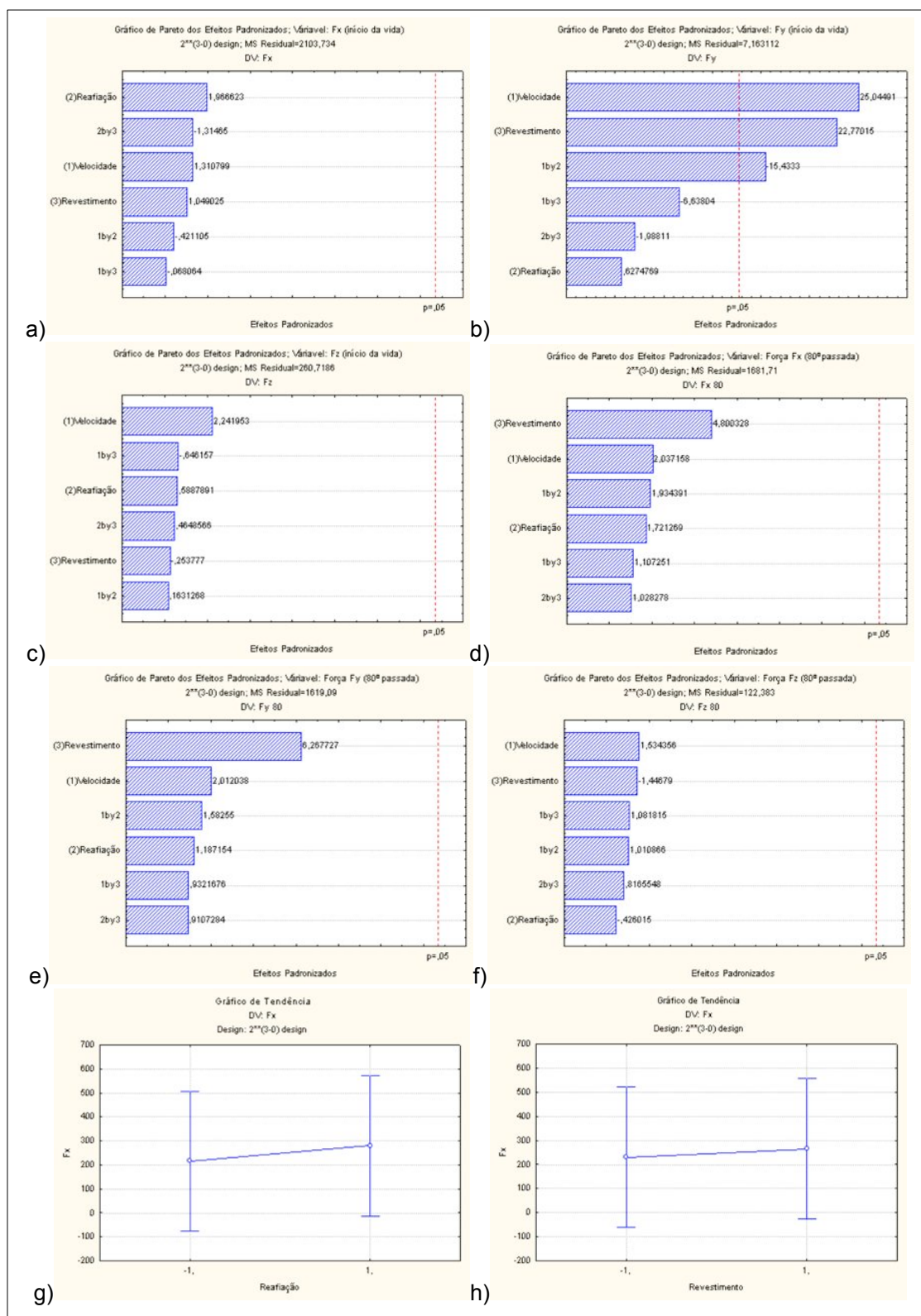


Figura 4.19 - Gráfico de Pareto para parâmetros de Força no início da vida: F_x (a), F_y (b) e F_z (c). Na 80ª passada: F_x (d), F_y (e) e F_z (f). Gráfico de tendência no início da vida: Reafiação (g) e revestimento (h).

4.4 Resultados de Torque

4.4.1 Ferramentas com revestimento TiAlN

A Figura 4.20 apresenta a evolução do torque ao longo da vida da ferramenta revestida com TiAlN, comparando a evolução dos valores da ferramenta reafiada com a nova. Estes resultados diferem um pouco daqueles observados com as componentes de força, pois o crescimento do torque com o desgaste da ferramenta não é observado nitidamente. Em algumas situações nota-se, inclusive, um ligeiro decaimento do torque com o desgaste (como no caso da ferramenta reafiada com velocidade de corte de 80 m/min).

Pequenas reduções nos diâmetros das fresas e a maior geração de calor podem estar contribuindo com estes resultados, mas conclusões adequadas sobre este comportamento carece de maiores investigações.

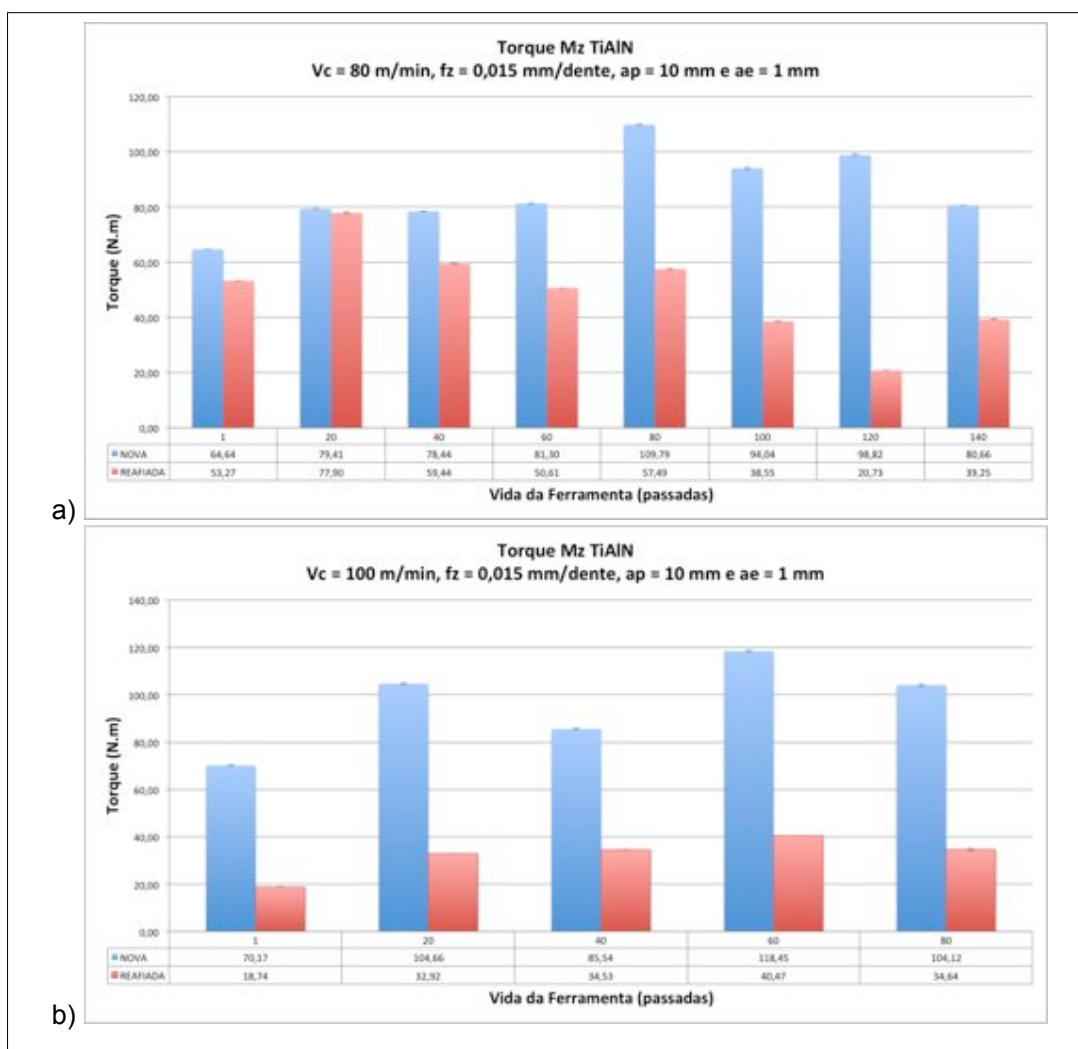


Figura 4.20 – Gráfico do torque para TiAlN com $v_c=80$ m/min (a) e $v_c=100$ m/min (b).

Nota-se nitidamente que os torques medidos na usinagem com as ferramentas reafiadas são bem inferiores aos medidos com as ferramentas novas, possivelmente a redução do diâmetro das fresas após a reafiação (medidas desses diâmetros antes e após a reafiação indicam uma redução de aproximadamente 0,2 mm) podem contribuir para esta redução, mas isso não deve ser o único fator influente. Outros fatores devem também estar contribuindo, investigações mais detalhadas são requeridas para justificar completamente estes resultados.

4.4.2 Ferramentas com revestimento AlCrN

A Figura 4.21 ilustra a evolução do torque ao longo da vida da ferramenta revestida com AlCrN, comparando a evolução dos valores da ferramenta reafiada com a nova. Estes resultados são similares aos observados com as ferramentas revestidas com TiAlN, exceto pelo fato de que para as ferramentas novas e velocidade de corte de 80 m/min, o torque tem a tendência de crescimento com o desgaste da fresa.

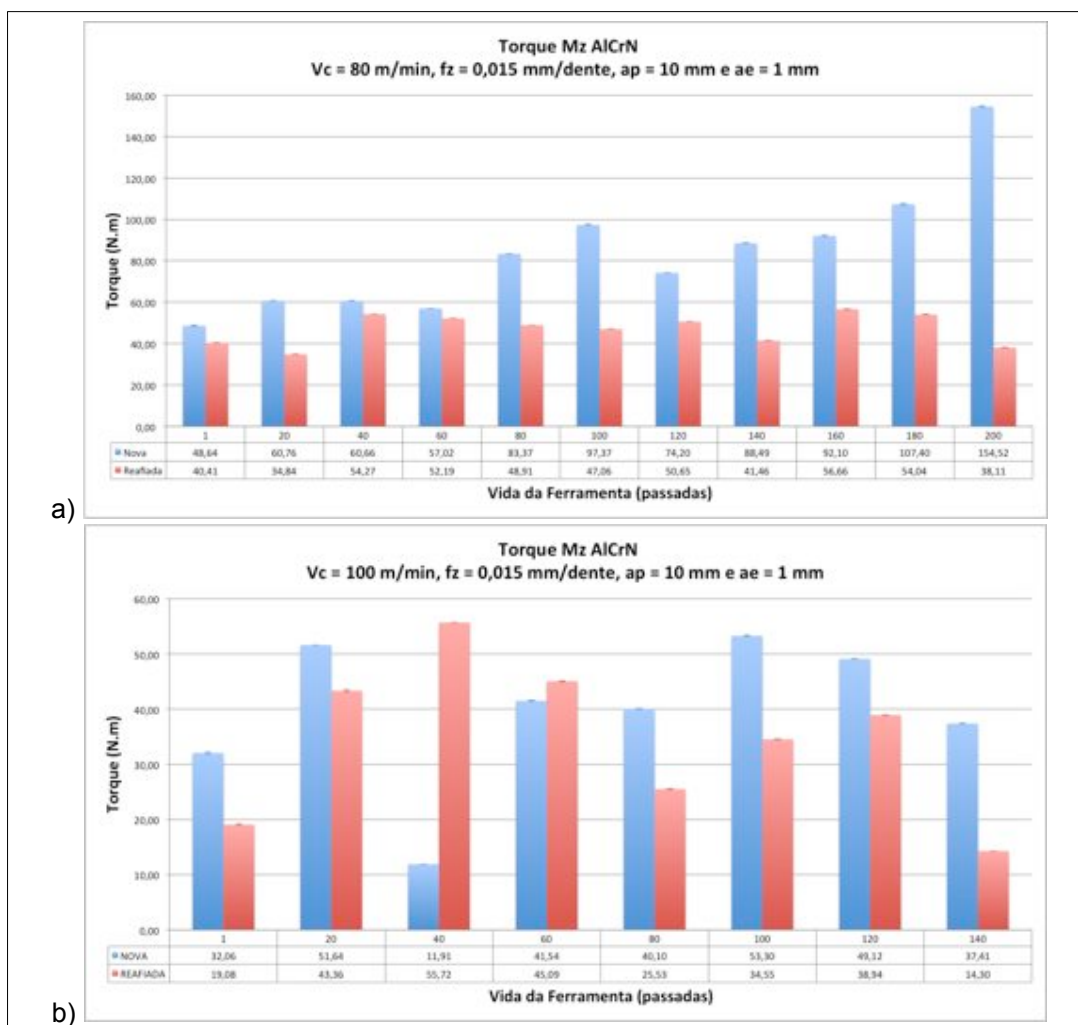


Figura 4.21 - Gráfico do torque para AlCrN com $v_c=80$ m/min (a) e $v_c=100$ m/min (b).

4.4.3 Análise estatística dos dados de torque

O torque apresentou um comportamento evolutivo semelhante as forças F_x e F_y , ou seja, aumentou conforme a ferramenta se aproxima do fim de vida, o que pode ser explicado pelo aumento do desgaste gerado.

A análise estatística dos dados coletados nos teste de vida para o torque foi semelhante aos realizados para as forças e a rugosidade, sendo assim, utilizou-se um planejamento fatorial clássico 2^k , com 2 níveis (ferramentas novas e reafiadas) e 3 fatores (velocidade de corte, revestimento e reafiação), gerando um planejamento fatorial de 2^3 , para uma confiabilidade de 95%. As comparações foram realizadas com os valores de torque no início da vida (com o intuito de eliminar a influência do desgaste) e na 80ª passada. O gráfico de Pareto gerado mostra que nenhum fator teve influência significativa sobre o torque da ferramenta, as interações entre os fatores também não foi significativa como ilustrado na Fig. 4.22.

A Figura 4.22c mostra a diminuição do torque na ferramenta reafiada quando comparada com uma nova, o que pode ser justificado pelo menor diâmetro da ferramenta reafiada devido ao processo de reafiação radial. As ferramentas cobertas com TiAlN apresentaram maiores valores de torque como ilustrado na Fig. 4.22d.

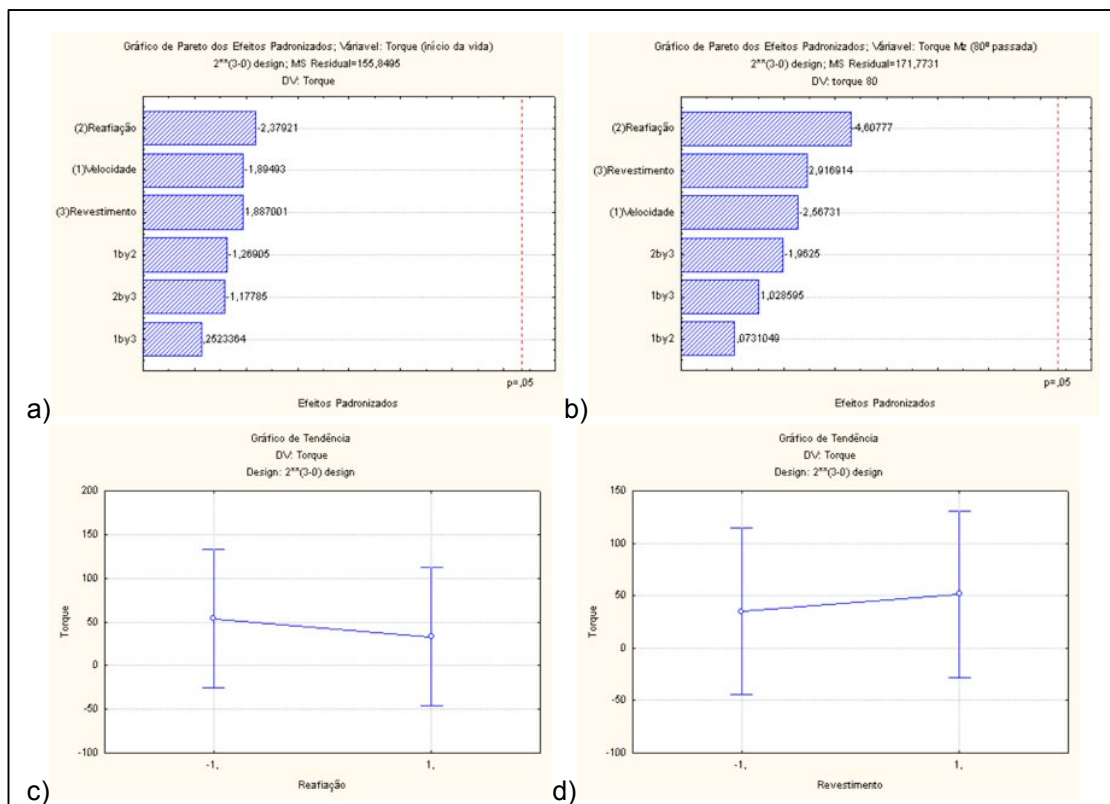


Figura 4.22 – Gráfico de Pareto para o Torque: Início da vida (a), 80ª passada (b). Gráfico de tendência no início da vida: reafiação (c) e revestimento (d).

4.5 Amostras de Cavaco

O cavaco é definido como a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970).

Nas operações de usinagem, a maior parte da energia despendida no processo, devido ao cisalhamento (deformação plástica) no plano primário e devido à fricção da ferramenta tanto com a peça quanto desta com o cavaco, é transformada em calor. Somente de 1 a 3% desta energia é convertida em outros meios (como energia elástica e de superfície), não sendo transformados em calor. Este calor, gerado no processo de usinagem, é dissipado para a peça que está sendo usinada, para o meio ambiente, para a ferramenta de corte e, a maior parte, transferida para o cavaco (MACHADO e DA SILVA, 1999; TRENT e WRIGHT, 2000). As temperaturas atingidas pelos cavacos, durante a usinagem de aços, tem bastante influência nos óxidos formados, que por suas vezes irão determinar a coloração dos mesmos.

Segundo Luong e Heijkoop (1981), a hematita (Fe_2O_3) forma-se até 200°C , com cor cinza quente e dureza de 1050HV. A magnetita (Fe_3O_4) forma-se de 200 à 570°C , apresentando uma coloração preta/acinzentada (tendendo para a cor azul) com dureza de 540HV. A wustita (FeO) forma-se em temperaturas acima de 570°C , coloração cinza-verde-marrom e dureza de 460HV.

A Figura 4.23 apresenta a mudança no formato do cavaco ao longo da vida da ferramenta revestida com TiAlN.

Inicialmente a Fig. 4.23a apresenta um cavaco cisalhado com pequena espessura, em forma de agulha e coloração cinza. A Figura 4.23b também apresenta um cavaco em forma de agulha, mas apresentando maior espessura em relação a figura anterior, sua coloração já um pouco modificada para um tom azul (ou preta/acinzentada, como denominou Luong e Heijkoop). A Figura 4.23c apresenta um cavaco com maior variação de espessura em relação aos apresentados anteriormente e uma coloração totalmente azul. No fim de vida da ferramenta o cavaco apresentou algumas descontinuidades, que sugerem a variação da espessura do cavaco durante a usinagem, possivelmente devido a ocorrência do maior desgaste da aresta de corte da ferramenta e consequentemente ocorrência de maiores vibrações durante o corte. Nessa condição (fim de vida), o cavaco apresentou a tendência de se fragmentar em pequenos pedaços e atingir uma coloração cinza-verde-marrom como pode ser visto na Fig. 4.23d.

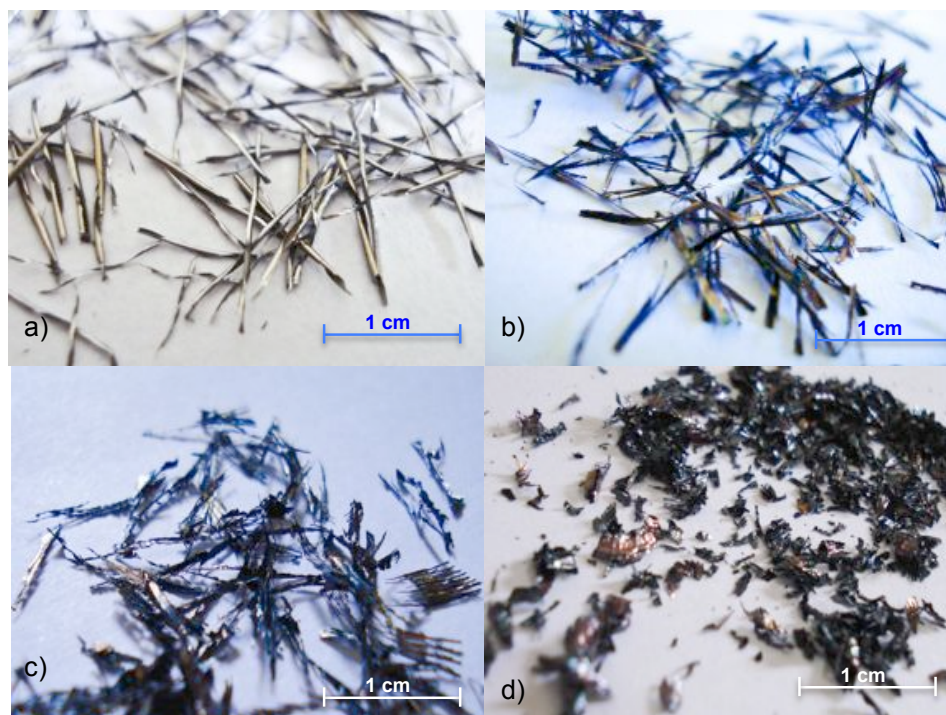


Figura 4.23 – Amostras de cavaco com ferramenta revestida com TiAlN, $v_c = 80$ m/min, (a) início da vida, (b) 40% da vida, (c) 80% da vida e (d) fim de vida.

A Figura 4.24 ilustra a evolução da forma do cavaco ao longo da vida da ferramenta revestida com AlCrN. Inicialmente a Fig. 4.24a apresenta o cavaco cisalhado em forma de agulha, na cor cinza, semelhante ao obtido com ferramenta TiAlN. Ao longo da vida da ferramenta o cavaco tendeu a aumentar a sua espessura, apresentando maior descontinuidade na formação do cavaco, provavelmente devido ao aumento do desgaste da ferramenta de corte e tendência à vibração. A Figura 4.24b apresenta uma cor tendendo para o azul, a mesma coloração é vista na Fig. 4.24c se confirmando neste tom de cor. Na Figura 4.24d o cavaco apresenta o aspecto mais descontinuo, mas ainda em forma de agulha, não ocorrendo a total fragmentação apresentada no cavaco usinado com TiAlN em fim de vida. A coloração continua em tons de azul, mas em alguns pontos já é visível tons marrons na cor do cavaco.

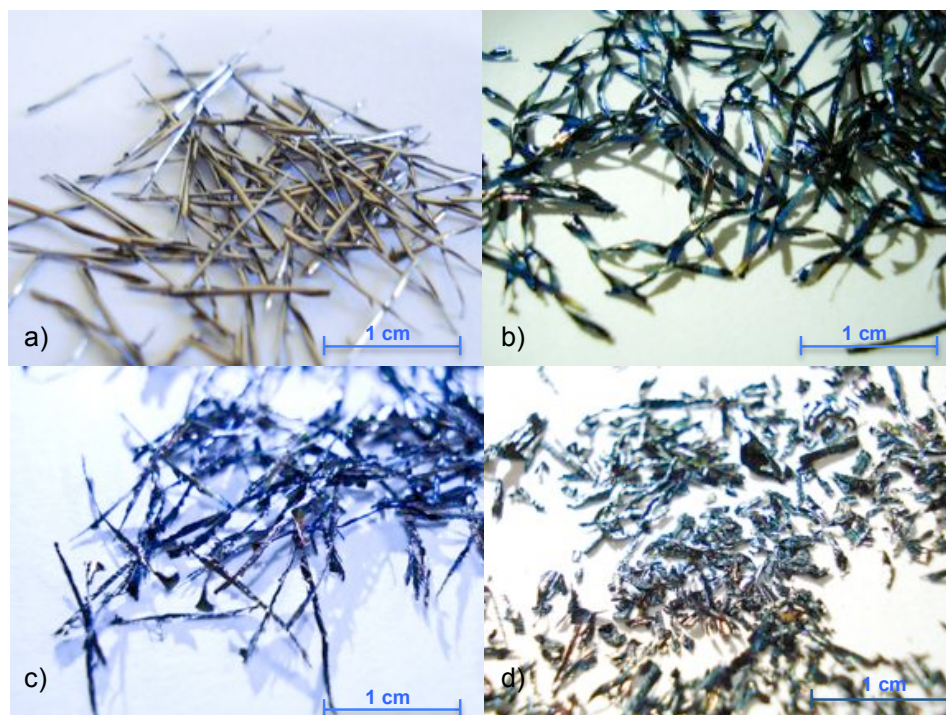


Figura 4.24 – Amostras de cavaco com ferramenta revestida com AlCrN, $v_c = 80$ m/min, (a) início da vida, (b) 40% da vida, (c) 80% da vida e (d) fim de vida.

Para os testes com velocidade de corte de 100 m/min, não houve significativa variação na espessura do cavaco, a coloração variou entre o cinza (início de vida) e o azul (fim de vida). Provavelmente isso ocorreu devido o menor tempo de usinagem nos testes com maior velocidade de corte, uma vez que o fim de vida para estes testes foi estipulado por um número fixo de passadas (menores que as ocorridas com a velocidade de corte de 80 m/min).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.1.1 Vida da Ferramenta

- ✓ O desgaste de flanco médio (VB_B) seguiu a tendência de aumentar com o decorrer do tempo de corte.
- ✓ O VB_B da ferramenta reafiada é ligeiramente superior ao da ferramenta nova, para ferramentas revestidas com TiAlN.
- ✓ Para ferramentas recobertas com AlCrN o desgaste na ferramenta reafiada foi menor quando comparado com a ferramenta nova.
- ✓ Analisando os dados relacionados ao desgaste, estatisticamente não houve variação significativa entre o desempenho de uma ferramenta nova e uma reafiada, para uma confiabilidade estatística de 95%.
- ✓ A vida foi maior na ferramenta revestida com AlCrN do que na revestida com TiAlN.
- ✓ A ferramenta revestida com TiAlN apresentou uma maior taxa de desgaste de flanco do que a revestida com AlCrN.

5.1.2 Mecanismo de desgaste das ferramentas

- ✓ Na menor velocidade de corte (80 m/min) as ferramentas revestidas com AlCrN e TiAlN apresentaram os mecanismos de desgaste adesivo (attrition) como predominante.
- ✓ Na maior velocidade de corte (100 m/min) as ferramentas apresentaram um desgaste de flanco irregular, principalmente as revestidas com TiAlN. Nestas ferramentas o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo, com possibilidade também de attrition, uma vez que ocorreu muito material aderido.
- ✓ Na ferramenta revestida com AlCrN o mecanismo de desgaste predominante foi o attrition (adesivo).

5.1.3 Rugosidade superficial

- ✓ Os valores de rugosidade aumentaram ao longo da vida da ferramenta, o que se justifica pelo aumento do desgaste.
- ✓ O revestimento AlCrN obteve melhores resultados de rugosidade quando comparado com o TiAlN.
- ✓ Para velocidade de corte de 80 m/min com ambos os revestimentos, a ferramenta reafiada apresentou melhor acabamento superficial do que a ferramenta nova.
- ✓ Com o aumento da Velocidade de corte (100 m/min) a ferramenta reafiada e recoberta com TiAlN apresentou pior acabamento superficial quando comparado com a ferramenta nova.
- ✓ De modo geral as ferramentas reafiadas e recobertas com AlCrN obtiveram um acabamento superficial melhor do que na ferramenta nova para os dois valores de velocidade de corte adotados.
- ✓ A análise estatística mostrou que os dados referente ao acabamento superficial utilizando ferramentas novas ou reafiadas não se mostrou significativo, para uma

confiabilidade de 95%, confirmando que a ferramenta reafiada e recoberta possui um desempenho similar ao de uma ferramenta nova.

5.1.4 Forças de usinagem

- ✓ As forças de usinagem seguiram a tendência de aumentar ao longo da vida da ferramenta.
- ✓ Os maiores valores de força foram obtidos com a ferramenta revestida com TiAlN.
- ✓ De modo geral as forças obtidas com ferramenta reafiada foi ligeiramente superior a ferramenta nova.
- ✓ Estatisticamente não houve diferença significativa entre o desempenho de uma ferramenta nova para uma reafiada em relação aos dados de força obtidos em testes de vida, para uma confiabilidade de 95%.

5.1.5 Torque

- ✓ As ferramentas reafiadas apresentaram menores valores de torque em relação as novas.
- ✓ A análise estatística dos dados coletados mostrou que não há variação significativa de desempenho entre as ferramentas novas e reafiadas em relação ao torque gerado, para uma confiabilidade de 95%.

5.1.6 Análise dos cavacos

- ✓ No início da vida da ferramenta o cavaco é cisalhado com pequena espessura, em forma de agulha e coloração cinza. Ao longo da vida da ferramenta a espessura do cavaco tende a variar, bem como sua coloração.
- ✓ No fim de vida da ferramenta o cavaco apresentou algumas descontinuidades que sugerem a variação da espessura do cavaco durante o corte. Nessa condição (fim de vida), o cavaco apresentou a tendência de se fragmentar em pequenos pedaços e atingir uma coloração cinza-verde-marrom.

- ✓ O cavaco gerado pela usinagem com ferramentas revestidas com TiAlN apresentou-se mais fragmentado quando comparado com o cavaco gerado pela ferramenta revestida com AlCrN, no fim de vida da ferramenta.

5.2 - Sugestões para trabalhos futuros

- ✓ Continuar a pesquisa levando as ferramentas em maior número de reafiações (se possível até a 5ª reafiação).
- ✓ Estudar a viabilidade econômica da ferramenta reafiada, considerando o número de reafiações possíveis.
- ✓ Fazer uma análise minuciosa de controle da espessura do revestimento a cada reafiação, para levar essa variável importante em consideração.
- ✓ Verificar o desempenho de fresas de topo de aço rápido reafiadas.
- ✓ Estudar o comportamento das fresas reafiadas na usinagem de outros tipos de material (ferro fundido, alumínio e ligas não ferrosas).
- ✓ Investigar a adesividade dos revestimentos em todas as etapas de reafiações.
- ✓ Investigar a rugosidade e integridade da camada/cobertura após cada reafiação.
- ✓ Avaliar os resultados para o sentido de corte concordante.
- ✓ Fazer o embutimento do cavaco e análise EDX da superfície da ferramenta.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10520, 2003. *Informação e documentação - Citações em documentos*.

ABNT NBR 10719, 1989. *Apresentação de relatórios técnicos científicos*.

ABNT NBR 14724, 2001. *Informação e documentação. Trabalhos acadêmicos – Apresentação*.

ABNT NBR 6022, 2003. *Informação e documentação - Artigo em publicação periódica científica impressa – Apresentação*.

ABNT NBR 6023, 2002. *Informação e documentação - Referência e Elaboração*.

ABNT NBR 6027, 2003. *Informação e documentação – Sumário*.

ABNT NBR 6028, 2003. *Informação e documentação – Resumo*.

ABNT NBR 4287, 2002. *Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*.

ABNT NBR 6162, 1989. *Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais - Terminologia*.

ABNT NBR 6163, 1980. *Conceitos da técnica de usinagem - Geometria da cunha cortante – Terminologia*.

ABNT NBR 6409, 1976. *Tolerâncias de forma e tolerâncias de posição*. Rio de Janeiro, RJ.

AGOSTINHO, O. L., 1995. *Princípios de engenharia de fabricação mecânica: Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de dimensões*. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 6a reimpressão.

ALMEIDA, C. M. Avaliação Do Desgaste Da Ferramenta De Metal Duro Revestida Com TiN No Fresamento Do Aço ABNT4140 Laminado a Quente e Temperado/Revenido. 2010. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte.

ÁVILA, R. F. Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido. 2003. 152 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ÁVILA, R. F. ; ABRÃO, A. M. ; GODOY, G. C. D. *Análise do desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com TiN (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 8620*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Ouro Preto, 2005.

ÁVILA, R. F. ; AUGUSTO, S. ; ABRÃO, A. M. *O desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N e Ti-C-N (PAPVD) no fresamento de ferro fundido*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville - SC. Anais do 3 COBEF, 2005.

BALZERS, Oerlikon Balzers - Revestimentos Metálicos <www.oerlikon.com/balzers/>, Acesso em: 10 Jan. 2011.

BARBOSA, C. A., 2001, Desempenho de Aços Para Confecção de Moldes Para Plásticos, Workshop sobre tecnologia de fabricação de moldes São Paulo, S.P. 11-04-2001.

BARBOSA, C. A.; MACHADO, A. R. *Usinagem de Moldes e Matrizes*. In: WORKSHOP SOBRE TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE MOLDES. São Paulo. 2001.

BARROZO, M. A., 2007, “Planejamentos de experimentos”, Apostila EQ127, Uberlândia, MG, PPG, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 260 p.

BATISTA, M. F. *Estudo da rugosidade de superfícies planas usinadas por fresas de topo esférico*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

BHATTACHARYA, D. *Developments in the Machinability of Steel*. First International Conference on the Behaviour of Materials in Machining, November 1988.

CAPUCCIO, G.; FERRANTE, A.; BAS, J. *Aços Inoxidáveis Austeníticos com Óxidos Controlados, uma Tecnologia Cofac*. In: V SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL, Inox 96, São Paulo. 1996.

CASTRO, F. C. 10º Seminário de Atualidades Tecnológicas: Profissionais do setor discutem o que há de novidade em preparação e processo em polímero. **Revista Plástico Moderno**. São Paulo: Editora QD Ltda. Disponível em: <<http://www.plastico.com.br/revista/pm374/tecnologicas4.html>>. Acesso em: 20 out. 2010.

CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 6.ed., ABM, São Paulo, 1988.

CHIAVERINI, V. *Aços e Ferros Fundidos*. 7 ed., ABM, 2004.

CHIAVERINI, V. *Tecnologia Mecânica*. Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica <www.cimm.com.br>, Acesso em: 20 Dez. 2010.

DAGILOKE, I. F., KALDOS, A., DOUGLAS, S.; MILLS B. *High-Speed Machining: an approach to process analysis*, *Journal of Materials Processing Technology*. n. 54, p.82- 87, 1995.

DAVIES, I. G.; FINCH, N. A.; PICKETT, M. L. *Developments and Applications of Alloy and Stainless Steels with Improved Machinability*. First International Conference on the Behaviour of Materials in Machining, November, 1988.

DEONISIO, C. C. C. *Estudo do fresamento do aço D2 endurecido em altas velocidades de corte*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas.

DEWES, R.C.; NG, E.; CHUA, K.S.; NEWTON, P.G.; ASPINWALL, D.K. *Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel*. 20. *Journal of Materials Processing Technology*, Birmingham, 1999, p. 293 – 301.

DIN 6584, 1982. *Terms of the cutting technique; forces, energy, work, power.*

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 6ª ed. p. 262 – Ed. Artliber, 2008.

FANG, X. D., ZHANG, D. *An Investigation of Adhering Layer Formation During Tool Wear Progression in Turning of Free Cutting Stainless Steel*. Wear 197 (1996).

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1977, p. 751.

FERRARESI, D. *Fundamentos Da Usinagem dos Metais*. Reimpressão, ed. Edgard Bluecher Ltda. São Paulo, 1970. v. 1.

FERRARESI, D. *Usinagem dos Metais*. 4. Ed., Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1972.

GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, processes, and systems*. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002.

GUENZA, J. E. *Análise do Desempenho do Fresamento em Altas Velocidades de Corte do Ferro Fundido GG25 em Aplicação Industrial*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 134 p.

HELISTÖ, P.; HELLE, A. S.; PIETIKÄINEN, J. *Interface Phenomena Between Oxide Layers and Cemented Carbide Tools*. First International Conference on the Behaviour of Materials in Machining, November, 1988.

HUANG, C. K., TARNG, Y. S., CHIU, C. Y., HUANG, A. P., 2009, "Investigation of machine vision assisted automatic resharpener process of micro-drills", Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, p 5944-5954.

ISO 3685, 1993. *Tool-life testing with single-point turning tools*.

ISO 4288, 1966. *Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture.*

ISO 513, 2004. *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges -- Designation of the main groups and groups of application.*

ISO 8688-2, 1989. *Tool life testing in milling – Part 2: End Milling. International Organization for Standardization.*

KANKAANPÄÄ, H.; PÖNTINEN, H.; KORHONEN, A. S. *Machinability of Calcium Treated Steels Using TiN Coated High Speed Steel Tools.* Materials Science and Technology, vol. 3, February, 1987.

LACALLE, R. F. *Desempenho de ferramentas de metal duro revestidas com Ti-N, Ti-C-N e Ti-Al-N (PAPVD) no torneamento do aço ABNT 4340 temperado e revenido.* 2003. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

LOURENÇO, C. J. A. *Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 303.* Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG., 1996.

LUONG, L. H. S., HEIJKOOP, T. The influence of the scale on friction in hot metal working. 1981. Wear, 71, p. 93-102.

MACHADO, Á. R. ; ABRÃO, A. M. ; COELHO, R. T. ; da SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais.* 1. ed. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 2009. v. 1. 371 p.

MACHADO, Á. R.; SILVA, M. B. *Usinagem dos Metais.* Apostila, DEEME - UFU, 2004, p.174.

MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A. *Desenvolvimento de Aço com Usinabilidade Melhorada e Aços Endurecíveis por Precipitação para Moldes de Injeção de Plástico.* Tecnologia em Metalurgia e Materiais. São Paulo, v.1, n.4, p.11-15, abr.-jun. 2005a.

MESQUITA, R. A., BARBOSA, C. A. *Moldes de Plástico: Otimização da Usinabilidade do Aço P20.* O Mundo da Usinagem. p. 28-30. 2005b.

METALS HANDBOOK, Vol.16 (1989), 9th Edition. *Machining - ASM International*. USA.

MILAN, J. C. G.; MACHADO, A. R.; BARBOSA, C. A. Usinabilidade de aços para moldes de injeção de plástico tratados com cálcio. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 55., 2000, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: ABM, 2000, p. 3206-3215.

MILAN, J. C. G.. *Usinabilidade de Aços para Moldes para Plástico*. 1999. 99 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MILAN, J., C., G. Comportamento tribológico de aços rápidos para laminação a quente. 2004. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

MORAES, M. A. F. Desenvolvimento de Planilhas Eletrônicas para Calcular Incerteza de Medição. 2011. 118 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., 1995, "Planejamentos e otimização de experimentos", vol. 2, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 229 p.

NETO, G.H.R. ; RODRIGUES, P. C. M. ; ABRÃO, A. M. ; PAIVA, A.P. *Determinação da Tensão Residual Média Induzida pela Operação de Fresamento Frontal*. In: 6 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6 COBEF, 2011, Caxias do Sul. ABCM, 2011. v. CD Rom.

OLIVEIRA, A.J., 2007. *Análise do desgaste de ferramentas no fresamento com alta velocidade de aços endurecidos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OSG TAP & DIE, INC. *Cutting Tool Solutions*. Catálogo de ferramentas rotativas. 872 p. 2010.

PEREIRA, J. C. C. *Determinação de Modelos de Vida de Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de*

Resposta (DOE). 2006. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá – MG.

RIBEIRO, J. L. S.; ABRÃO, A. M.; SALES, W. F. *Forças de usinagem no fresamento de aços para matrizes*. In: 16 POSMEC- Simpósio de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2006, Uberlândia. anais do 16 POSMEC, 2006.

RIBEIRO, J. L. S. *Fresamento do Aço VHSUPER nos Estados Recozido e Temperado com Metal Duro e Cermet*. 2007. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ROSSI, G. C. *Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento de Bordas de Chapas Utilizadas para a Fabricação de Tubos de Aço com Costura*. 2007. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI/USP.

SMITH, W. F. *Structure and Properties of Engineering Alloys*. 2.ed., 1993, Mc Graw Hill International Editions, tab. 7-11, p. 330.

SOUSA, J. A. G. *Desempenho de Ferramentas Reafiadas – Furação*. 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

STEMMER, C. E. *Ferramentas de corte I*. 1995. Ed. da UFSC. p. 249.

STEMMER, C. E., 2001., “Ferramentas de corte I”., 5ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 249 p.

STEMMER, G. E. *Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscas, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos*. 1992. Florianópolis: Ed. da UFSC, 314 p.

STOETERAU, R. L.; WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. *Processo de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material*. Apostila, 2004, 180 p.

SUAREZ, M. P. *Fresamento De Canais Da Liga De Alumínio Aeronáutico 7075-T7*. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K., 2000, “*Metal Cutting*”, 4th Edition, Butterworth Heinemann. São Paulo, 1981. 751p.

VIANA, R. *Estudo Da Caracterização De Ferramentas De Corte Texturizadas A Laser E Revestidas Utilizadas No Fresamento Frontal De Ferro Fundido Vermicular*. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

VIANA, R. ; MACHADO, A.R. ; LIMA, M. S. F. ; PEREIRA, A.A. . *Desempenho do TiAlN e do AlCrN na usinagem do ferro fundido vermicular*. Revista Máquinas e Metais, São Paulo (SP), p. 74 - 87, 01 ago. 2011.

VIEIRA, J. M.; VIANA, M. A.; ABRÃO, A. M.; Machado, A. R. *O Desempenho dos Fluidos de Corte no Fresamento Frontal do Aço*. Máquinas e Metais, Ano XXXIV, número 392, Aranda editora, Setembro de 1998.

VILLARES METALS. *Aço para Moldes*. Catálogo de aços para moldes e matrizes. 2011. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/Cat_Acos_Moldes.pdf>. Acessado em: 11/07/2010.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROEDER, R.B. *Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I*. 2002. Tradução do livro: *Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen* - de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis.