

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
TESE DEFENDIDA POR Valdemir Martins
Lira E APROVADA
COMISSÃO JULGADORA EM 26/10/2000
G. Telles
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Otimização de parâmetros de corte na usinagem de roscas em tornos CNC

Autor: **Valdemir Martins Lira**
Orientador: **Geraldo Nonato Telles**

73/00

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Otimização de parâmetros de corte na usinagem de roscas em tornos CNC

Autor: **Valdemir Martins Lira**
Orientador: **Geraldo Nonato Telles**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000
S.P. – Brasil

iii.

2001.01953

UNIDADE BC
 N.º CHAMADA:
T/Unicamp
L670
 V. _____ Ex. _____
 TOMBO BC/ 43694
 PROC. 16-392101
 C D
 PREC# R\$11,00
 DATA 09/02/01
 N.º CPD _____

CM-00154333-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L670 Lira, Valdemir Martins
 Otimização de parâmetros de corte na usinagem de roscas em tornos CNC / Valdemir Martins Lira.--
 Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Geraldo Nonato Telles
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Máquinas-ferramenta – Controle numérico - Programação. 2. Metais - Corte. 3. Roscas (Mecânica). 4. Modelos matemáticos. I. Telles, Geraldo Nonato. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Otimização de parâmetros de corte
na usinagem de roscas em tornos CNC**

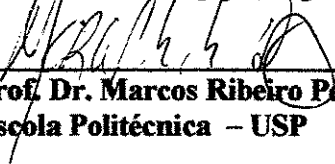
**Autor: Valdemir Martins Lira
Orientador: Geraldo Nonato Telles**



**Prof. Dr. Geraldo Nonato Telles, Presidente
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP**



**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP**



**Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto
Escola Politécnica – USP**

Campinas, 26 de Outubro de 2000

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha querida esposa, pela abdicação de horas de lazer e pela compreensão, para que eu pudesse iniciar, desenvolver e concluir este trabalho ao longo dos últimos 3 anos.

Dedico a nossa amada filha.

Dedico também a minha mãe pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de diversas pessoas, empresas e instituições às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Geraldo Nonato Telles, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, principalmente nas adversidades.

Ao meu colega, tecnólogo Antônio Lopes Miranda, que acredito sem o mesmo, a parte experimental deste trabalho não se realizaria.

Ao meu colega, M.Sc. Rogério Monteiro, pela ajuda em vários momentos.

Ao eng.º Auad da Empresa Bardella, pela ajuda e disposição na viabilização da matéria prima da parte experimental.

Aos eng.ºs João Carosella e Aldair da Sandvik pela ajuda, suporte técnico e disposição na viabilização do ferramental utilizado na usinagem.

À BARDELLA S.A. INDUSTRIAS MECÂNICAS e a SANDVIK Coromant e pela BARDAHL, pelo fornecimento dos insumos.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP) que possibilitou à utilização de equipamentos e laboratórios e ao Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza” (CEETPS) pelo afastamento parcial de minhas atividades como professor.

“A imaginação é mais importante do que o conhecimento”

Albert Einstein

Resumo

LIRA, Valdemir Martins, Otimização de parâmetros de corte na usinagem de roscas em tornos CNC, :
Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2000.
P102. Dissertação (Mestrado)

Nesta pesquisa determinou-se modelo matemático para distribuição racional das diversas “passadas” para corte de roscas em tornos à CNC.

Através de ensaios tecnológicos avaliou-se o modelo e os diferentes métodos de corte de roscas (mergulho radial, de flanco e flanco alternado) de forma a possibilitar proposta para otimização dos parâmetros geométricas para essa operação. Essa otimização permite, com sua racionalização, além da redução de custos operacionais, melhor controle dos esforços de corte e conseqüente melhoria da qualidade.

Palavras Chave

Otimização de parâmetros de corte, Usinagem de roscas, Tornos à CNC, Métodos de corte de roscas, Modelos matemáticos

Abstract

LIRA, Valdemir Martins , Optimization of threading cutting parameters for CNC lathes, Campinas, :
Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. P102.
Dissertação (Mestrado)

A mathematical model for rational “infeed” distribution for threading in CNC lathes was determined, in this research.

By means of technological experiments the model proposed and threading cutting methods (radial, flank and changing flank “infeed”) were analyzed in such a way to obtain the optimization of geometrical parameters setting for threading. The optimization allows, through rationalization not only the reduction cost , but also improved cutting force control in threading operations and consequently an increase in quality.

Key Words

Optimization, CNC lathe, threading cutting methods, mathematical models.

Índice

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 – Introdução	1
1.2 – Objetivos	3
1.3 – Metodologia utilizada	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – O ESTADO DA ARTE	6
2.1 – Considerações Gerais	6
2.2 – Mecanismos para corte de roscas em tornos	8
2.3 – Cortando roscas em tornos convencionais	10
2.4 – Cortando roscas no torno à CNC	11
2.5 – Variáveis no corte de roscas esquerdas ou direitas	11
2.5.1 – Sentido de rotação do fuso (eixo árvore)	12
2.5.2 – Posição do porta ferramenta	12
2.5.3 – Sentido do avanço	13
2.6 – Velocidade de avanço e de corte	14
2.7 – Tipos de insertos e formas de fixação	14

2.7.1 – Inseto de perfil incompleto	14
2.7.2 – Inseto de perfil progressivo	15
2.7.3 – Fixação dos insertos	16
2.8 – Ângulos de ferramentas de roscas	18
2.9 – Avarias e desgaste	18
2.9.1 – Deformação plástica da ferramenta	20
2.9.2 – Aresta postiça de corte e Lascamento da aresta	20
2.9.3 – Quebra da pastilha	21
2.10 – Materiais dos insertos	21
2.10.1 – Metal duro	21
2.10.2 – Cermets	22
2.10.3 – Material Cerâmico	22
2.11 – Fluido de corte	22
2.11.1– Fatores de seleção	23
2.11.2 – Direções de aplicação do fluido de corte	23
2.11.3 – Seleção do fluido de corte nos experimentos	23
2.12 – Métodos de observação do desgaste na ferramenta de corte	24
2.13 – Programação de corte de rosca no torno CNC	25
2.14 – Métodos de corte de roscas em tornos CNC	27
2.14.1 – Mergulho radial	28

2.14.2 – Mergulho de flanco	28
2.14.3 – Mergulho de flanco alternado	29
3 – MODELAGEM TEÓRICA	30
3.1 – Considerações Gerais	30
3.2 – Estratégias para valores de profundidades de corte	31
3.3 – Modelos matemáticos	32
3.4 – Modelos matemáticos de máquinas à CNC	35
3.5 – Modelo de aplicativo	38
3.6 – Modelo proposto	38
3.6.1 – Dedução do modelo proposto	40
3.6.2 – Cálculo da integral da área de corte	42
3.6.3 – Dedução das profundidades de corte em cada passe	43
4 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO PROPOSTO	47
4.1– Forças de usinagem	47
4.2 – Sistemas dinâmicos	48
4.3 – Forças de corte	49
4.4 – Análise de resultados da pressão específica de corte no CR	51
5 – ESTUDO DE CASOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1 – Considerações iniciais sobre os experimentos	54
5.2 – Análise da corrente elétrica da máquina	55

5.3 – Formas de cavacos nos métodos de CR	56
5.4 – Forças de corte nos métodos de CR	58
5.5 – Vida da ferramenta em cada método	62
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	65
6.1 – Conclusões	65
6.2 – Sugestões para próximos trabalhos	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO I	73
ANEXO II	76
ANEXO III	79
ANEXO IV	82
ANEXO V	85
ANEXO VI	90
ANEXO VII	92
ANEXO VIII	94
ANEXO IX	96
ANEXO X	98
ANEXO XI	100

Lista de Figuras

1 – Estratégia de profundidades: (a) constante e (b) variável	2
2.1 Efeito da velocidade de corte na vida da ferramenta	7
2.2 – a. Solução mecânica	9
2.2 – b. Solução eletrônica	9
2.3 Sistema de coordenados do torno CNC	11
2.4 – Posição emborcado do porta-ferramenta	12
2.5.1 – Posição do porta ferramenta e sentido de avanço – Rosca à direita	13
2.5.2 – Posição do porta ferramenta e sentido de avanço – Rosca à esquerda	13
2.6 – Inseto de perfil incompleto	15
2.7 – Inseto de perfil progressivo	15
2.8 – Forma de fixação por parafuso central	16
2.9 – Forma de fixação por grampo	17
2.10 – Sistema de abertura de ranhura	17
2.11 – Ângulos da ferramenta de corte	18
2.12 – Desgaste V_B	19
2.13 : a– antes da usinagem, b–deformação plástica, c– quebra	20
2.14 – Aresta postiça de corte	21
2.15 – Direções do fluxo	23
2.16 – Leitura do desgaste da ferramenta via lupa	24
2.17 – Leitura do desgaste da ferramenta via emissão acústica	25
2.18 – Ciclo básico de programação	26
2.19 – Ciclo automático de programação	27
2.20— Métodos: a– mergulho radial, b– mergulho de flanco, c– mergulho de flanco alternado	29
3.1 – Estratégia de profundidades: (a) constante e (b) variável [repetida da Figura 1]	31
3.2 – Esquema teórico do perfil da rosca	33

3.3 – Estratégia de corte variando o mergulho da ferramenta	39
3.4 – Detalhe do perfil da ferramenta de corte	39
3.5 – Perfil de projeto – Rosca métrica ISO – Dimensões NB97	39
3.6 – Detalhe das relações trigonométricas na ponta da ferramenta	40
3.7 – Detalhe da ponta da ferramenta	42
3.8 – Áreas de corte por passe	43
4.1 – Sistema aberto	48
4.2 – Mergulho radial: valores de profundidade para o modelo proposto	51
4.3 : a– antes da usinagem, b– deformação plástica	52
5.1 – Formas de cavacos	58
5.2 : a– Método de mergulho radial	61
5.3 : b– Método de mergulho de flanco,	61
5.4 : c– Método de mergulho flanco alternado	61
5.5 – Desgaste V_B [repetida da Figura 2.12]	62

Lista de Tabelas

4.1 – Dados de usinagem	50
5.1 – Dados de usinagem	55
5.2 – Dados de usinagem	59
5.3 – Forças de corte	60
5.4 – Resultados de desgaste de flanco	64

Nomenclatura

Letras Latinas

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_i, A_c$ – área da secção de corte em cada passe	[mm ²]
F, F_c – Força de corte	[N]
$F_r, F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}$ – Componentes residuais da força de corte em cada direção	[N]
F_x – Componente da força de corte na direção do eixo dos diâmetros	[N]
F_y – Componente da força de corte na direção tangencial	[N]
F_z – Componente da força de corte na direção do eixo árvore	[N]
h_1, h_2, h_3, h_4, h_i – profundidade de corte	[mm]
h_{total} – altura total do filete de rosca	[mm]
H_A, H_B, H_C – Dimensões da ferramenta	[mm]
i – índice da passada	[adimensional]
K_s – Pressão específica de corte	[N/mm ²]
N – número total de passes	[adimensional]
P – passo da rosca	[mm]
R_f – raio de ponta do filete	[mm]
t – tempo	[minutos]
V_c – velocidade de corte	[m/min]
X – coordenada do diâmetro da peça	[mm]
Z – coordenada do eixo árvore	[mm]

.....

Letras Gregas

α – ângulo de folga	[grau]
β – ângulo de avanço	[grau]
χ – ângulo de flanco	[grau]
$\chi_{inicial}$ – valor do diâmetro da peça para início da rosca de flanco	[mm]
χ_{final} – valor da coordenada em “X” do último passe (diâmetro do fundo da rosca)	[mm]
γ – ângulo de saída	[grau]
λ – ângulo de inclinação	[grau]
θ – ângulo do filete da rosca	[grau]

.....

Abreviações

CNC – Controle Numérico computadorizado
CR – Corte de roscas
PCC – Profundidade de corte constante
PCV – Profundidade de corte variável

.....

Siglas

DEMA – Departamento de Engenharia de Materiais

Capítulo 1

Introdução e objetivos

1.1 – Introdução

A humanidade tem usado peças rosqueadas desde os tempos de Arquimedes (278-212 AC) quando ele cortou uma helicoidal em um cilindro, rebaixando-o com auxílio de uma roda d'água. Nos últimos 35 anos, o rápido desenvolvimento das máquinas ferramentas à CNC (Controle Numérico Computadorizado) com suas estratégias de programação no corte de rosca [TELLES, 1990], planejamento da produção [ARSECULARATNE, 1992] e desenvolvimento de ferramentas de corte [KOELSCH, 1992] proporcionaram um desenvolvimento tecnológico expressivo, com possibilidades de melhoria em aplicações e na qualidade [RADCHENKO, 1989] na usinagem de roscas.

Nas pesquisas efetuadas por: [BRONSHTEIN & ESTERZON, 1984] [DMITRIEVA, 1989] [FREDERICKS, 1978] [TEETS, 1990], nos catálogos de fabricantes de ferramentas [SANDVIK, 1998] [LAYDOWN, 1995] [THREADING, 1996] e em muitos manuais de programação de máquinas à CNC sobre o Corte de Roscas (CR) na análise dos métodos de mergulho radial, de flanco e de flanco alternado, encontra-se basicamente duas estratégias de trabalho, no que se refere ao mergulho da ferramenta em relação à “peça-obra”: Uma estratégia prevê profundidades de corte constantes (PCC) (com conseqüentes áreas das secções de corte variáveis) (*Figura 1a*) e outra com profundidades de corte variáveis (PCV) (com áreas da secção de corte constantes) (*Figura 1b*).

Habitualmente, programadores seguem as recomendações dos fabricantes de ferramentas, os quais orientam, através de tabelas obtidas empiricamente, para a estratégia de PCV, fornecendo os parâmetros geométricos necessários de entrada no programa da máquina à CNC.

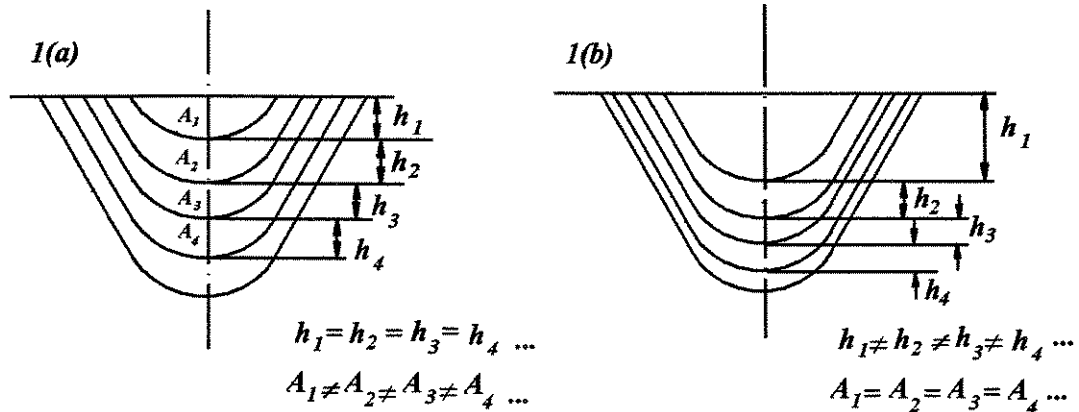


Figura 1 – Estratégias de profundidades de corte: (a) constante e (b) variável

Neste estudo analisaremos a distribuição das profundidades de corte^(*) da ferramenta na direção radial à “peça–obra”. A estratégia utilizada será de PCV, de forma a resultar secções de corte com áreas constantes. Os valores das profundidades de corte em cada passe foram obtidos através de um modelo matemático proposto, que considera o perfil do filete da rosca [FERLINI, 1981]. Este modelo permite controlar os parâmetros geométricos do mergulho com o conseqüente controle da força de corte. O conhecimento da força de corte permite controlar–se a pressão específica, a qual, atingindo valores exagerados, implica em redução da vida da ferramenta [SHAW, 1968].

Inicialmente compararam–se os cálculos teóricos das áreas de corte em cada passe, obtidos dos modelos matemáticos de máquinas à CNC (capítulo 3) com o modelo proposto e, posteriormente, através de ensaios experimentais. Concluiu–se que:

1. Na realidade, somente o modelo proposto proporciona, através da estratégia de PCV, a área de corte efetivamente constante em todos passes;

^(*) Segundo a NBR 6162 a profundidade de corte é denotada por “ a_p ”, mas neste trabalho usaremos a notação “ h ”, uma vez que a grande parte da bibliografia pesquisada assim o faz.

2. Utilizando-se o modelo matemático proposto obteve-se um melhor controle dos esforços de corte, proporcionando aumento de vida da ferramenta, aumento da produtividade e, conseqüentemente, redução de custos de fabricação [NOVASKI, 1989].

Desta forma, optou-se pela utilização do modelo proposto nos ensaios experimentais comparativos entre os métodos de mergulho radial, de flanco e de flanco alternado.

Em toda parte experimental desta pesquisa, trabalhou-se 215 horas na utilização do CNC em CR, na análise de subrotina, nas análises dimensionais das peças e ferramentas, na obtenção dos esforços de corte, que consumiram aproximadamente 120 corpos de prova.

1.2 – Objetivos

O objetivo principal deste estudo é a otimização dos parâmetros de corte no processo produtivo de usinagem de roscas em tornos à CNC, tendo sido, portanto, desenvolvido um modelo matemático para auxiliar na entrada dos dados geométricos e determinar as melhores condições de CR quando da análise dos diversos métodos de mergulho da ferramenta.

1.3 – Metodologia utilizada

Além do modelo matemático desenvolvido (capítulo 3), a validação do mesmo foi feita através de ensaios experimentais^(*) comparativos, fixando-se os parâmetros do processo de usinagem (velocidade de corte, passo da rosca, número de passadas, material da peça-obra, etc) além de mensurar-se, através de dinamômetro pneumático, a força de corte.

Mediante a validação do modelo e sua utilização, a segunda parte experimental dessa pesquisa tratou de verificar, nos métodos de corte de rosca radial, de flanco e de flanco alternado em tornos à CNC, os seguintes itens:

^(*) Os ensaios experimentais dessa pesquisa restringiram-se a corte de roscas métricas externas.

1. Formas de cavacos gerados em cada método;
2. Forças de corte em cada método;
3. Vida da ferramenta em cada método.

Neste capítulo são explicitados resumidamente os tópicos básicos desta dissertação, além de uma introdução/justificativa para o trabalho.

No segundo capítulo, apresentamos um levantamento bibliográfico de forma a localizar o leitor no “estado-da-arte” sobre o assunto.

No terceiro capítulo, detalhamos os modelos matemáticos existentes e o desenvolvimento do modelo matemático proposto.

No quarto capítulo expomos a importância do conhecimento das forças de corte nos processos de usinagem. O modelo proposto é comparado com modelos existentes e validado através de resultados experimentais onde as forças de corte foram mensuradas.

Os resultados experimentais obtidos possibilitaram estudar, no quinto capítulo, os diversos métodos de CR, as formas dos cavacos em cada método além da vida da ferramenta, que foram concluídos no sexto capítulo. Ainda no sexto capítulo, é proposta a elaboração de um gráfico para seleção do número de passes.

Finalmente, esta dissertação contém vários anexos, como segue:

Anexo I : Exemplo de programa em código “G”, utilizando o ciclo básico (G33) – Torno Romi – ECN40-II ;

Anexo II : Exemplo de programa em código “G”, utilizando o ciclo automático (G37) – Torno Romi – ECN40-II;

Anexo III : Exemplo de programa, utilizando o ciclo automático – Torno Romi –
Multiplíc-30;

Anexo IV : Exemplo de programa, utilizando o ciclo automático – Torno Nardini;

Anexo V : Controle de medidas na peça–obra;

Anexo VI : Folha de acompanhamento da análise experimental;

Anexo VII : Informações técnicas da pastilha e do porta–pastilha;

Anexo VIII : Informações técnicas do fluido de corte;

Anexo IX : Informações técnicas da matéria prima;

Anexo X : Informações técnicas da máquina–ferramenta;

Anexo XI : Informações técnicas do dinamômetro pneumático.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica – O estado da arte

2.1 – Considerações gerais

Roscas são empregadas com elementos de máquinas como agentes de fixação (porcas e/ou parafusos) ou como máquinas simples para transformação de movimento de rotação em movimento de translação [DROZDA, 1983] [FERLINI, 1981].

A produção de peças roscadas pode ser feita por diferentes máquinas e processos [DROZDA, 1983]. A escolha da máquina e processo de fabricação dependerá da quantidade de peças, da precisão, da qualidade requerida e do acabamento superficial dos flancos.

O corte de rosca (CR) em tornos é operação de razoável demanda. Na forma de trabalho habitualmente mais utilizada, a rosca é obtida através de passes consecutivos com a ferramenta sendo aprofundada gradativamente, até a obtenção do filete completo, sistema de trabalho esse, comumente identificado como “penteamento-de-rosca”. A limitação maior dessa operação prende-se à vinculação da ferramenta ao ângulo de ponta do perfil básico das roscas de fixação (60° ou 55°). Esse ângulo (fixo) fragiliza a ponta da ferramenta proporcionando uma massa física mínima de material, a qual fica submetida durante a usinagem a grandes quantidades de calor. É importante portanto, o conhecimento dos fenômenos físicos e geométricos envolvidos nessa operação.

O material da ferramenta de corte de rosca tem grande influência na vida da ferramenta e, conseqüentemente, na qualidade do produto [KOELSCH, 1992]. A análise das características físico-mecânicas de diferentes materiais da pastilha, resultam em comportamentos distintos das

curvas de velocidades de corte versus vida da ferramenta. A *Figura 2.1* ilustra alguns materiais ensaiados por MARKEVICH e UZHEIKO em 1990: a curva 1 corresponde à pastilha de composto 02, a curva 2 à pastilha fabricada com composto 05 e aresta sem reforço, a curva 3 corresponde a pastilha manufaturada com composto 06 e aresta reforçada. Os ensaios foram feitos para corte de rosca de 2 mm e profundidades de corte constante de 0,05 mm por passe. O resultado deste estudo possibilitou a fabricação de roscas cilíndricas com precisão e redução do número de passadas.

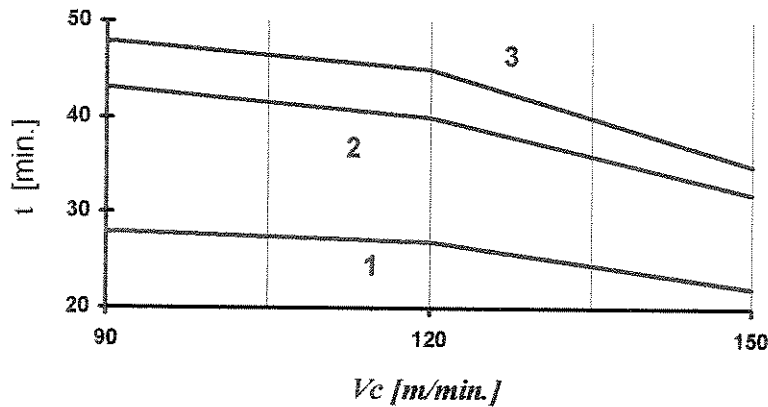


Figura 2.1 – Efeito da velocidade de corte na vida da ferramenta para diferentes materiais da pastilha – corte de roscas [adaptado de MARKEVICH & UZHEIKO, 1990]

Na pesquisa tecnológica do corte de metais, os índices de qualidade (precisão, rugosidade superficial, etc.) de peças fabricadas e as grandezas tecnológicas (vida da ferramenta, parâmetros de vibração, etc.) são influenciados por um considerável número de fatores de caráter variável (quantitativo e qualitativos, simples e complexos), podendo ser verificados através da análise das condições ótimas de CR [RADCHENKO & KARPVICH, 1989].

Um estudo realizado por STIGH em 1993 visa analisar através do método de elementos finitos a força do deslocamento no CR. O método dos elementos finitos possibilita o estudo em 3 dimensões da peça além de estudar os efeitos isotrópicos do comportamento do material durante o processo de usinagem.

Uma outra linha de estudo analisa a seleção das condições ótimas no CR (velocidade de corte, método de mergulho da ferramenta, número de passadas, etc.), para reduzir os custos desta

operação. Tais condições de CR foram obtidas por um modelo matemático elaborado por BOBROV & SADOV em 1983. A vida da ferramenta e velocidade de corte são relacionadas através de curvas com valores máximo e mínimo. A relação entre a vida da ferramenta com as grandezas envolvidas no corte de roscas (profundidade em cada mergulho h_i , velocidade de corte V_c), são obtidas empiricamente e expressos em equação matemática.

Por fim, o estado da arte indica a existência de “ilhas de soluções” de procedimentos usados tecnologicamente para orientação do sistema CNC para determinar a ótima condição automática para CR, de maneira a auxiliar o planejamento e a estratégia da usinagem [ARSECULARATNE, 1992] [THAKAR & SHANKER, 1993].

2.2 – Mecanismos para corte de roscas em tornos

O corte de rosca é um caso particular do torneamento [SIMON, 1973], onde o passo da rosca, que é o avanço longitudinal (direção Z do eixo da máquina) da ferramenta, é bem maior que no torneamento convencional e é o que diferencia em termos de transmissão mecânica nos tornos convencionais, *Figura 2.2-a*. Desde 1930, trabalhos tratam do assunto de maneira particular, com o objetivo de desenvolver mecanismos que possam oferecer aos tornos convencionais possibilidade de realizar esta operação de maneira automatizada, com a menor intervenção do operador. Posteriormente o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia do Controle Numérico (CN), e finalmente o Controle Numérico Computadorizado (CNC) trouxe uma grande vantagem em relação às máquinas convencionais, pois as transmissões mecânicas foram substituídas por sistemas de controle eletrônico, *Figura 2.2-b*. O auto controle é um tipo de controle que além de praticamente funcionar sem a intervenção do operador, proporciona:

- A simplificação das tarefas e contínua redução dos custos de fabricação;
- Solução satisfatória de problemas de programação dos métodos de corte de roscas.

Solução mecânica:

a – motorização, *b* - caixa de transmissão, *c* - redução de transmissão de avanço, *d* - caixa de transmissão com gama de seleção de redução, que pode ser selecionado manualmente e *f* - comando de transmissão do fuso, que tem um passo fixo, feito, normalmente, por uma rosca ACME com passo entre 3 e 24 mm ou 1/2". Tem-se ainda a porca *g* do fuso. O carro longitudinal da máquina é representado por *h*. O avanço axial é dado por *i*, que tem o seu deslocamento perpendicular ao plano de trabalho. Por fim o porta-ferramenta é representado por *k*.

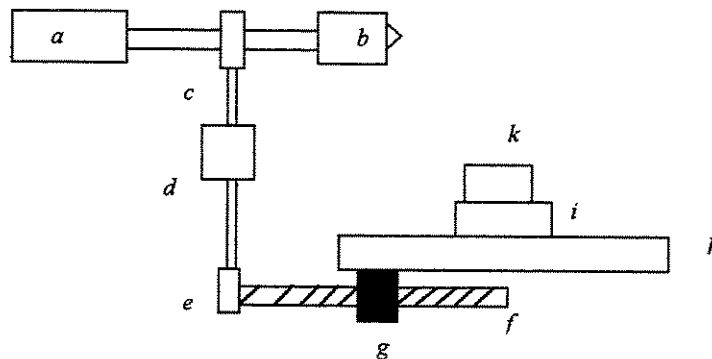


Figura 2.2 – a. Solução mecânica [adaptada de SIMON, 1973]

Solução Eletrônica:

l - fuso principal, *m*- gerador de pulso digital, *n* - parte física do torno, *o* - amplificador e emissor de pulso, *p* - unidade de processamento de pulsos rápidos, *q* - unidade de processamento de pulsos lentos, *r* - indexador de pulsos (1 pulso por revolução do fuso *l*), *s* - interpolador que está de acordo com a frequência do pulso para o corte de roscas, *t* - gerador de função de frequência selecionada, *u* - ajuste do passo desejado, *v* - interpolação normal do pulso de frequência, *w* - chave de comutação para seleção do tipo de frequência (corte de rosca ou interpolação normal).

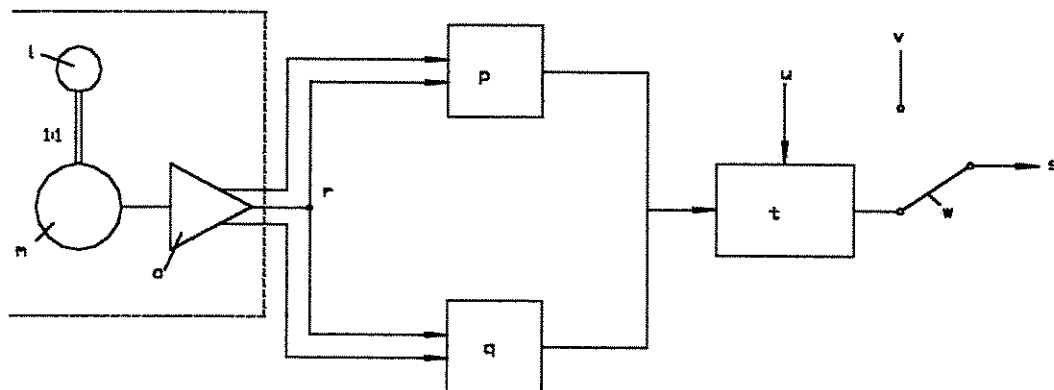


Figura 2.2 – b. Solução Eletrônica [adaptada de SIMON, 1973]

2.3 – Cortando roscas em tornos convencionais

O CR no torno convencional é uma operação morosa, porque a ferramenta terá de executar várias passadas para deixar a rosca completamente pronta, sendo que o trabalho do operador, como veremos abaixo, é fundamental neste processo, pois o mesmo terá de tomar decisões de posicionamento da ferramenta, de parada do carro, afastamento da ferramenta, reversão do fuso, durante todo o processo de CR.

O processo básico de CR no torno convencional têm as seguintes etapas:

1. – A peça–obra deve ser torneada no diâmetro nominal e eventualmente chanfrada a 45° na extremidade e eventual rasgo de saída de ferramenta;
2. – Engatar na caixa Norton o passo desejado;
3. – Ligar o torno, encostar a ferramenta na peça, de modo que somente risque o material ;
4. – Deslocar manualmente na direção axial a ferramenta para fora da peça, aproximadamente três vezes o passo da rosca;
5. – Zerar o anel graduado, engatar a porca bipartida e deixar que a ferramenta corra sobre a peça–obra. Desligar o torno e verificar o passo da rosca com o pente (calibre);
6. – Inverter o sentido de rotação do motor e com o carro engatado, retornar a ferramenta ao ponto inicial de corte (zero do anel graduado);
7. – Avançar a ferramenta transversalmente à peça–obra na profundidade de corte desejada e executar o primeiro passe;
8. – No final da rosca, retirar a ferramenta da peça e inverter a marcha do torno, retornando a ferramenta;
9. – Nos passes subsequentes repetir a etapa 7 aprofundando a ferramenta até a altura total do filete da rosca;
10. – Após o último passe deve–se realizar um repasse de acabamento com o mesmo valor transversal do último passe.

2.4 – Cortando roscas no torno à CNC

Como foi visto no item 2.2, o avanço é um valor chave e coincide com o passo. Esse sincronismo é obtido por diversos meios, dependendo do tipo de máquina, sendo os mais comuns: fuso de avanço, eixo de cames e o Controle Numérico Computadorizado (CNC), sendo hoje, inclusive fornecido com opções de ciclos fixos para otimizar a geração do perfil da rosca.

O sincronismo do avanço longitudinal da ferramenta (eixo Z do torno) (*Figura 2.3*), com a rotação do fuso é obtido por meio de um sensor especial (encoder). O encoder é conectado mecanicamente ao eixo árvore, o qual tem a função de informar (através de código de sinais – pulsos), a posição angular do eixo árvore e a velocidade ao comando da máquina à CNC [DMITRIEVA, 1989]. Este sensor possibilita perfeito sincronismo entre rotação e avanço durante o ciclo de CR. Este sincronismo é importante, pois o CR é um caso particular de torneamento, que requer um avanço constante da ferramenta, atravessando longitudinalmente a superfície rotacionada da peça–obra. O resultado é uma helicóide, gerada pela ponta do inserto.

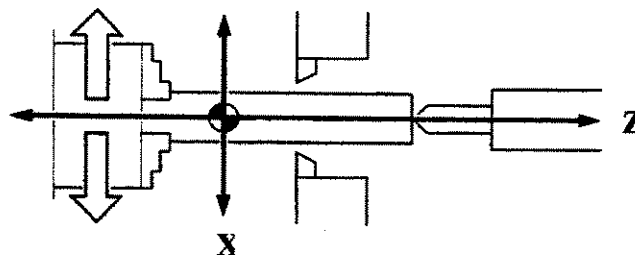


Figura 2.3 – Sistema de coordenadas do torno CNC

2.5 – Variáveis no corte de roscas esquerdas ou direitas

Além das grandezas tecnológicas existentes no CR, os detalhes do posicionamento do porta–ferramenta, do sentido de rotação do fuso (eixo árvore) e da direção de avanço, devem ser consideradas no corte de roscas esquerdas ou direitas. Uma rosca direita pode ser cortada em um torno (CNC ou convencional) em ambos sentidos (horário ou anti–horário) de rotação do fuso, idem para roscas esquerdas. A consideração do ponto de início do avanço é fundamental para se fabricar rosca esquerda ou direita, que pode ser em direção a placa ou ao inverso desta.

2.5.1 – Sentido de rotação do fuso (eixo árvore)

As máquinas à CNCs dispõem de diversas formas construtivas (motor de CA ou CC, torre dianteira ou traseira, sensores, guias lineares, fusos de esferas recirculantes, etc.) [MANUAL...,1996] [MACHADO, 1986], de maneira a permitir o controle, com precisão, do sentido da rotação (horário ou anti-horário) do eixo-árvore. Desta maneira, a escolha da rotação do fuso não fica dependente da posição do porta ferramenta (direito ou esquerdo) ou da direção de avanço longitudinal (sentido contra a placa ou para fora da placa). Ambas são boas opções a serem utilizadas. Contudo, para o fluxo de cavaco, o melhor seria que o porta ferramenta fosse fixado na torre emborcado, ou seja, com inserto voltado para baixo (*Figura 2.4*).

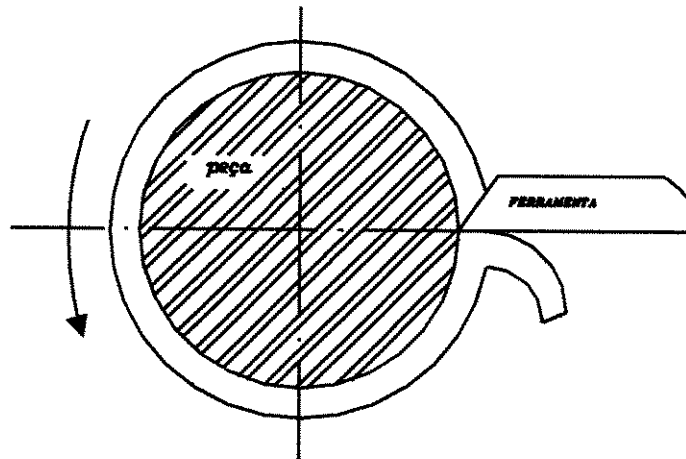


Figura 2.4 – Posição emborcado do porta-ferramenta

2.5.2 – Posição do porta ferramenta

O porta-ferramenta (esquerdo ou direito) pode ser posicionado normalmente ou emborcado, durante o CR direita ou esquerda. O tipo de rosca depende ainda do sentido de giro do eixo-árvore e do avanço (*Figura 2.5.1 e Figura 2.5.2*). Um exemplo é uma rosca direita (*Figura 2.5.1-a*) sendo cortada com porta-ferramenta direito com avanço para a placa comprimindo o inserto contra o calço e o eixo árvore girando no sentido anti-horário^(*)

^(*) Olhando-se do contra-ponto para a placa

2.5.3 – Sentido do avanço

O Avanço longitudinal da ferramenta no sentido para a placa é a melhor opção. Quando a ferramenta de CR inicia o corte, existem forças [TRENT, 1977] que surgem com o contato da ferramenta na “peça–obra”. Devido à forma da ponta ferramenta, uma força de tração ou compressão lateral é gerada em ambos os lados da peça e no inserto. Ao avançar para a placa, esta força tende a comprimir a peça na face da castanha da placa. No entanto, avançando para fora da placa tende–se a tracionar a peça para fora, requerendo maiores cuidados com a fixação, eventualmente necessitando contra–ponto.

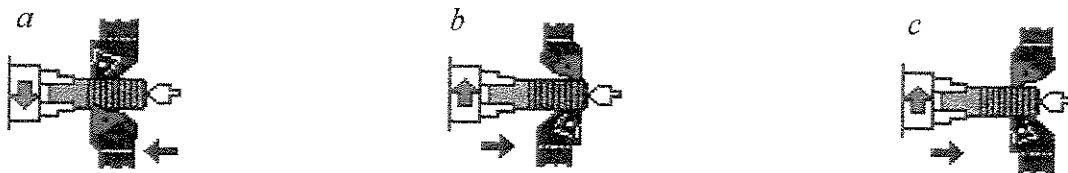


Figura 2.5.1 – Posição do porta ferramenta e sentido de avanço - Rosca à direita [adaptada de Sandvik, 1998]

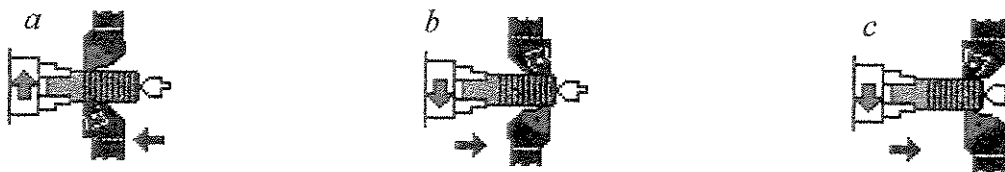
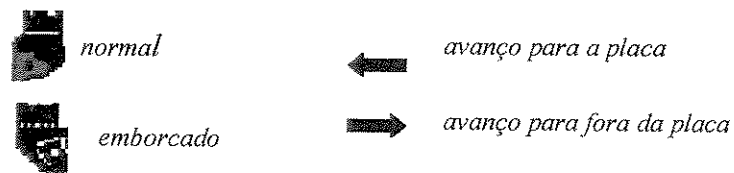


Figura 2.5.2 – Posição do porta ferramenta e sentido de avanço - Rosca à esquerda [adaptada de Sandvik, 1998]



2.6 – Velocidade de avanço e de corte

A velocidade de avanço para abertura de roscas é determinada pelo passo de rosca e número de entradas. Tanto a *rpm* quanto o avanço longitudinal estão relacionados com o passo da rosca. O CR é raramente realizado com velocidade de avanço maior que 4m/min.

A velocidade de corte para o CR é função do par ferramenta-peça e a especificação da rosca: passo da rosca, valores das profundidades em cada mergulho e raio de ponta. Conforme estudo feito por MARKEVICH & UZHEIKO em 1990 para diferentes materiais da ferramenta, determinou-se um campo ótimo entre a velocidade de corte 90 m/min. e 120 m/min. (*Figura 2.1*), sendo que acima deste valor a vida da ferramenta decresce rapidamente.

2.7 – Tipos de insertos e formas de fixação

Nesse item, só analisaremos sistemas com insertos intercambiáveis com perfis padronizados, que corresponde à forma atual de trabalho.

2.7.1 – Inseto de perfil incompleto

Insertos de perfil incompleto são mais utilizados, conforme a *Figura 2.6*. Estes insertos podem cortar uma “gama” de passo baseada no raio da ponta da ferramenta, a qual deve estar dentro da tolerância do raio da raiz da rosca. A maioria dos fabricantes de ferramentas oferecem dois ou mais tamanhos de raios de ponta e especificam sobre os limites de passo de roscas que podem ser gerados por elas. Os modelos de perfis incompleto oferecem máxima flexibilidade e mínimo estoque de ferramenta.

Se houver recalque do material, muitas vezes é necessário, uma operação complementar (de torneamento cilíndrico) para “calibrar” o diâmetro nominal da rosca.

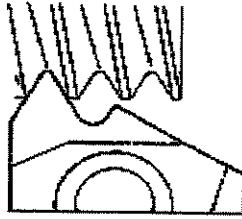


Figura 2.6 - Inserto de perfil incompleto

2.7.2 – Inserto de perfil progressivo

O inserto de perfil incompleto é mais utilizado, porque oferece flexibilidade, exige pequena folga de rosca e minimiza as forças de corte sobre a ferramenta. Existem algumas desvantagens do perfil incompleto quando comparada com a perfil progressivo (*Figura 2.7*). O inserto de perfil incompleto necessita de um número maior de passadas porque efetivamente uma ponta corta.

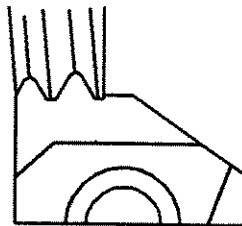


Figura 2.7 – Inserto de perfil progressivo

As formas de perfil progressivo são utilizadas para altas produções. Elas foram projetadas de maneira a formar rosca que, progressivamente, vão mergulhando radialmente o inserto na peça, ocupando o que virá a ser o vão do filete. A vantagem principal é a redução do número de passes, pois este inserto possui várias pontas, e tais pontas possuem tamanhos diferentes o que possibilita o trabalho simultâneo das mesmas, resultando num baixo tempo de usinagem e aumento da vida da ferramenta.

Insertos de perfil progressivo são utilizadas nas indústrias automotivas e petroquímicas [Sandvik, 1998]. Existem várias desvantagens da perfil progressivo, dentre elas, a necessidade de inserto diferente para passos diferentes, não é indicada para material de difícil corte, pois as forças de cortes geradas são elevadas em cada aresta, devido ao projeto que pré determina as alturas das arestas. Por fim, estas formas de insertos necessitam de espaço para a saída da ferramenta no final da rosca.

2.7.3 – Fixação dos insertos

Existem três formas básicas disponíveis de ferramentas intercambiáveis para CR [MODERN...,1994], são elas: triangular com fixação por parafuso central, triangular com fixação por grampo, e sistema de fixação idêntico aos das ferramentas para abertura de ranhura. Como primeira escolha, a maioria dos fabricantes recomendam as triangulares com fixação por parafuso central (*Figura 2.8*), pois têm muitas vantagens: o custo é baixo por serem padronizadas; a forma padronizada do porta-ferramenta de usinagem (isto é, esquerdo ou direito); é de fácil uso; podem ser usadas para corte de rosca esquerda ou direita; existe grande volume de material que apoia a aresta de corte proporcionando rigidez mecânica; o inserto tem três arestas úteis de corte e o mesmo inserto é usado para CR em DI (diâmetro interno) ou DE (diâmetro externo). No corte moderado de uma rosca, o desempenho da pastilha triangular com fixação por parafuso central é melhor que as demais formas.

A desvantagem deste formato, provem do fato do inserto ser retificado com aproximadamente 7° de folga (α) (*Figura 2.11*) no formato físico da aresta, o que possibilita o corte de muitas roscas com passos diferentes, mas produzindo uma folga excessiva somado ao fato da aresta de corte não ser simétrica, deixando a aresta enfraquecida, o que resulta numa força de corte maior num dos flancos de corte, limitando a vida do inserto.

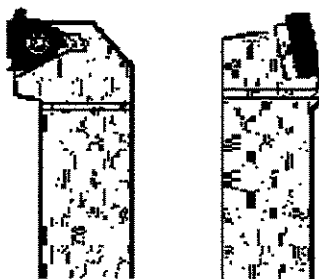


Figura 2.8 – Forma de fixação por parafuso central

No caso de insertos fixados por grampo (*Figura 2.9*), o grampeamento é paralelo à face da pastilha e consome certo tempo para fixar. O porta-ferramenta pode facilmente ser fixado de cabeça para baixo^(*). Isto permite uma força bem distribuída na face do inserto que esta sendo usada para fixar, resultando numa maior vida da ferramenta. Além disso, o inserto é grampeado facilmente por um parafuso no centro que não impede o fluxo de cavaco. Alguns tipos permitem fixar o inserto com apenas ½ volta no parafuso de fixação.



Figura 2.9 – Forma de fixação por grampo

O sistema de fixação usado em inserto para CR (*Figura 2.10*) é semelhante ao de abertura de ranhura (“sangramento”). Ele têm, como vantagens, um grande volume de material apoiando a aresta de corte e são indicadas quando o espaço de saída da ferramenta é limitado (*Figura 2.10.b*). A desvantagem deste sistema reside no fato que cada inserto tem apenas duas pontas de corte (*Figura 2.10.a*). Se uma aresta é rompida, a outra aresta poderá ser inutilizada.

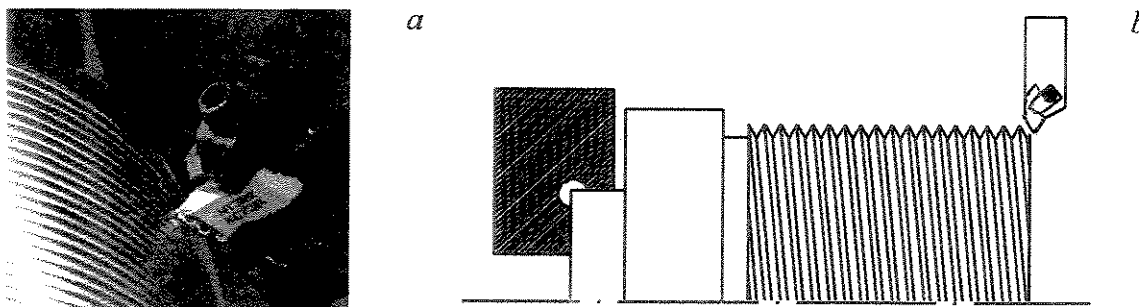


Figura 2.10 – Sistema de abertura de ranhura

^(*)Evidentemente isto requer a montagem de um suporte diferente na torre porta-ferramenta de forma a preservar a centragem da ponta da pastilha.

2.8 – Ângulos de ferramentas de roscas

As ferramentas de CR têm de ter um adequado ângulo de folga (α_o) (Figura 2.11), maior que o ângulo de flanco (χ_r) devido à área de contato, neste processo de usinagem, ser grande entre peça e ferramenta. No caso do ângulo de folga (α_o) os valores mudam para diferentes ângulos de hélice da rosca. No uso de ferramentas intercambiáveis, a seleção do calço está relacionado com o diâmetro da peça e passo da rosca, conforme indicações de fabricante. Normalmente, este sistema tem um ângulo de inclinação (λ_s) de 1° incorporado pelo porta ferramenta e relacionado pelo ângulo de saída (γ_o).

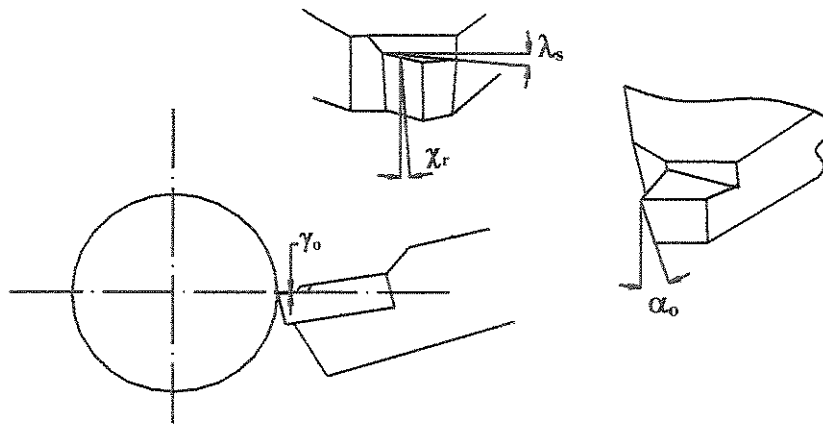


Figura 2.11 – Ângulos da ferramenta de corte [adaptada da NBR 6163 – Geometria da cunha de corte]

2.9 – Avarias e desgastes

Avarias: ocorrem nas ferramentas como resultado da ação de vários fatores de carga sobre a aresta de corte durante a usinagem. Estas cargas são, principalmente, de natureza mecânica, térmica, química e abrasiva (KRAMER, 1986). No caso específico de CR, é ainda pior, pois a área “em trabalho” da pastilha é mínima desgastando mais em seus pontos frágeis do que os insertos normais.

Desgaste da ferramenta: quando a ferramenta está sendo utilizada, ela vai perdendo partículas: é uma remoção contínua de partículas microscópicas.

Abaixo é apresentado uma síntese dos fenômenos causadores do desgaste:

1. aresta postiça de corte: muito comum em materiais dúcteis (grande zona plástica) estes materiais são bastante aderentes à ferramenta, e isto causa um acúmulo de cavaco na ferramenta, cada vez maior, até ocorrer um desprendimento de grande quantidade de material depositado o qual arrasta consigo parte da ferramenta (*Figura 2.14*);
2. abrasão: dependente da velocidade de corte, afeta mais o desgaste de flanco (V_B) (*Figura 2.12*).
3. aderência: dois materiais em contato à grande pressões, têm a tendência de adesão com a migração de partículas de um material para outro, provocando desgaste na ferramenta;
4. difusão: a medida que a temperatura aumenta a “agitação” das moléculas aumenta, sendo comum utilizar-se material mais resistente ao calor (cerâmico) como cobertura do inserto, para minimizar o desgaste.
5. Oxidação: a água (contida nos fluidos de corte), o ar, somados a altas temperaturas geram o desgaste na ferramenta.

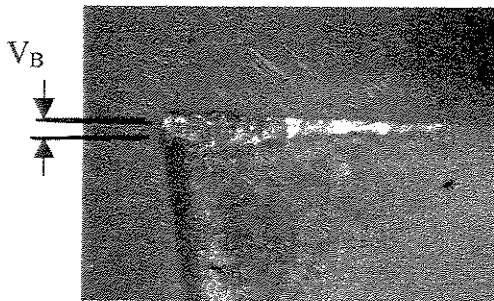


Figura 2.12 – Desgaste V_B [mm]

Por fim o material da peça, da ferramenta, e os parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) e etc, influenciam no desgaste da ferramenta. Muito embora, em linhas gerais podemos afirmar que os fenômenos 1 e 3 são resultados da baixas

velocidades de corte e os fenômenos 2, 4 e 5 são devido às altas velocidades de corte, que é o parâmetro preponderante na vida da ferramenta.

2.9.1 – Deformação plástica da ferramenta

Aparece como resultado da combinação de altas temperaturas e pressões (na ponta do inserto), altos valores de comprimento de corte, particularmente no CR devido à forma física do inserto, altas velocidades, à altas dureza dos materiais e eventual refrigeração insuficiente. Este problema provoca deficiência do controle do cavaco e o aumento desta deformação pode levar à quebra da pastilha (*Figura 2.13*).



Figura 2.13: a – antes da usinagem, b – Deformação plástica, c – quebra

2.9.2 – Lascamento da ferramenta

No afã de redução de tempos, programadores muitas vezes exageram na solicitação da ferramenta, a qual submetida à grande pressão específica tem parte de sua aresta de corte desprendida, caracterizando o fenômeno de lascamento.

2.9.3 – Quebra da pastilha

Como foi visto, as avarias e desgastes da ferramenta ao crescerem podem gerar a quebra da ferramenta (*Figura 2.13-c*). Outros fatores que contribuem para a quebra são: altura do centro incorreta, ferramenta muito dura, ângulo de cunha pequeno, raio de ponta pequeno e carga excessiva sobre a ferramenta.

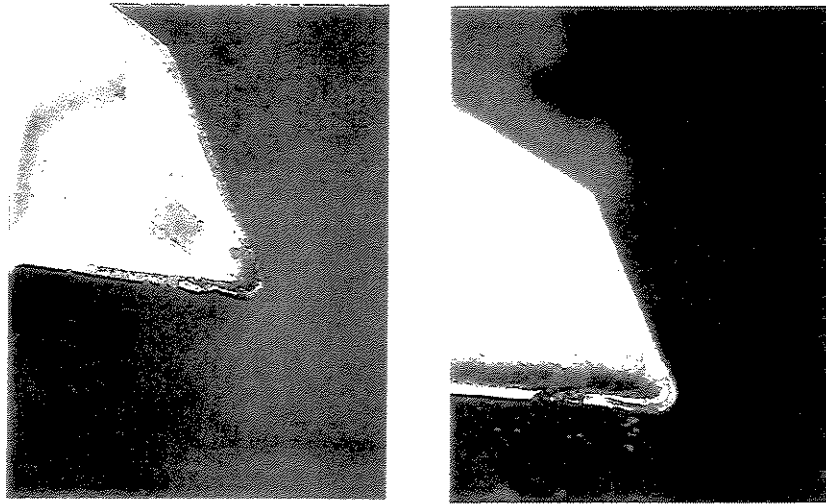


Figura 2.14: Aresta postiça de corte

2.10 – Materiais dos insertos

Insertos para CR geralmente são feitos dos mesmos materiais para torneamento normal. A mais importante diferença, todavia, é que nas ferramentas de CR há geração maior de calor, então os insertos necessitam ou de maior resistência ao calor, ou de um eficiente mecanismo de fluxo de fluido refrigerante de corte, como refrigerante através do inserto ou de pressão alta. O quebra-cavacos incorporado também tem um papel importante no desempenho da ferramenta, o que foi possível de obter-se com a tecnologia de sinterizar as ferramentas de metal duro.

2.10.1 – Metal duro

O metal duro proporciona dureza a altas temperaturas, tenacidade +(resistência ao choque) e resistência ao desgaste. São propriedades que se exige de qualquer material utilizado em

ferramentas de usinagem. Uma outra característica do metal duro quando da aplicação é o seu coeficiente de dilatação térmica, sendo a metade do valor do aço em temperaturas desde a ambiente até 675°C. Essa característica ajuda a minimizar a avaria de deformação plástica no CR, pois esse processo gera temperaturas elevadas. A seleção das velocidades no CR quando da utilização do metal duro variam de acordo com os seguintes fatores: dureza do material da peça–obra e com a classe da ferramenta, pastilha com ou sem cobertura.

2.10.2 – Cermets

Recebem este nome pois contêm uma fase cerâmica e uma fase metálica, que no CR são uma alternativa econômica, pois as velocidades de corte podem ser tão rápidas quanto no metal duro [KOELSCH, 1992]. Entretanto, custam mais que o metal duro. Têm capacidade de cortar metais de dureza superior, e não desenvolver aresta postiça no fio de corte.

2.10.3 – Material cerâmico

O material cerâmico possui algumas propriedades que são muito interessantes para uma ferramenta de usinagem, tais como: dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química (evita a difusão em usinagem com altas velocidades). Atualmente, algumas classes de cerâmicas apresentam boa tenacidade, o que diminui as trincas e quebras das pastilhas, mas ainda não é muito utilizado no CR devido às forças de usinagem serem elevadas em relação a forma física, limitante pelo ângulo do perfil da rosca, da ponta da pastilha, que ocasionam quebras frequentes de pastilhas.

2.11 – Fluido de corte

A seguir serão apresentados itens importantes para melhor seleção e utilização do fluido de corte na usinagem e também a justificativa do tipo fluido escolhido no experimento.

2.11.1 – Fatores de seleção

Há vários fatores a serem considerados na seleção de um fluido de corte, tais como: o material da peça a ser usinada, o material da ferramenta de corte, a operação de corte, se causa dano à saúde do operador (não insalubre), questão econômica [MOTTA & MACHADO, 1995].

2.11.2 – Direções de aplicação do de corte

As principais direções de aplicação dos fluidos de corte podem ser vistas na *Figura 2.15*. A literatura é bastante abrangente quanto a essa questão. Algumas pesquisas consideram que as direções “A” e “C” devem ser utilizadas simultaneamente na aplicação do fluido de corte. Poucos recomendam a direção “B”.

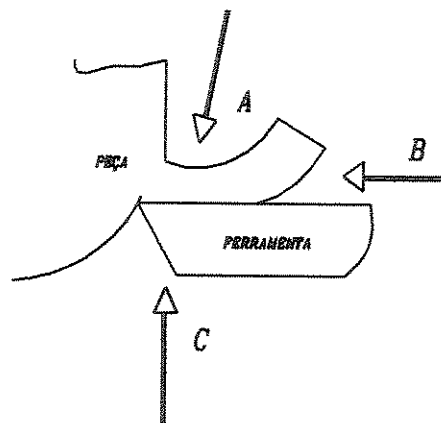


Figura 2.15 – Direções do fluxo

2.11.3 – Seleção do fluido de corte nos experimentos

O objetivo é controlar as variáveis no processo de usinagem sem que exista uma dispersão das condições de usinagem dos experimentais com o encontrado no “chão de fábrica”.

Neste estudo utilizamos a direção “A” de fluxo, e o fluido de corte utilizado nos experimentos foi selecionado de acordo com as especificações do fabricante (ver detalhes no Anexo VIII), que recomenda para este processo de torneamento um fluido de corte sintético solúvel em água.

2.12 – Métodos de observação do desgaste na ferramenta de corte

O desgaste da ponta do inserto e/ou do flanco influencia na dimensão e na qualidade da superfície. As informações sobre estes estados podem ser usadas para selecionar a mudança da ferramenta para evitar a sua quebra e manipular os parâmetros tecnológicos no processo de controle da vida da ferramenta. Os Métodos de observações do desgaste [DU & ELBESTAWI, 1995] podem ser:

1. Direto: mede o desgaste em termos da perda de material da ferramenta usando uma lupa (*Figura 2.16*) ou através de observação da superfície desgastada usando outros métodos ópticos.

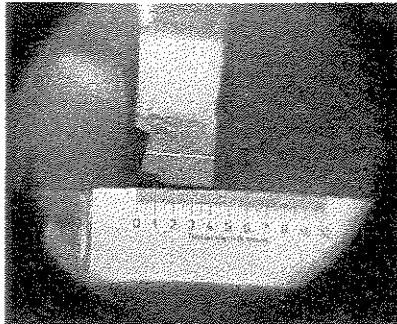


Figura 2.16 – Leitura do desgaste da ferramenta via lupa

2. Indireto: Estima o desgaste da ferramenta pelo relacionamento da mesma com o sinal de um transdutor que mede e compara uma outra grandeza advinda do processo, por exemplo: força de corte, temperatura, vibração, rotação do motor, ou emissão acústica [WASCHKIES & SKLARCZYK, 1994], sendo que a coleta de dados é implementada conforme (*Figura 2.17*).

Os métodos diretos são mais confiáveis, embora eles sejam impróprios no ambiente da manufatura, com exceção da observação feita com lupa. No que se refere ao método indireto o mais utilizado é o sinal da força de corte, que varia proporcionalmente com o desgaste da ferramenta.

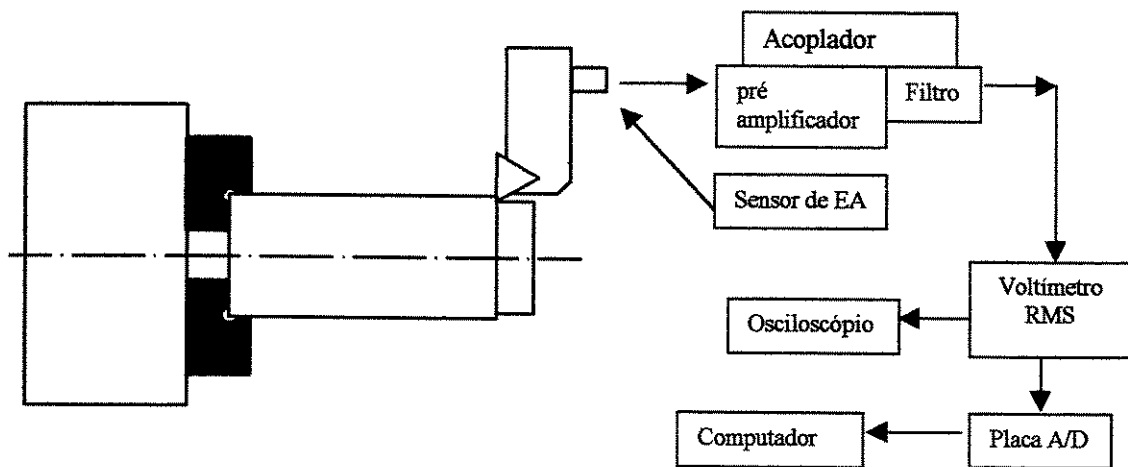


Figura 2.17 – Leitura do desgaste da ferramenta via emissão acústica [adaptada de FIGARI, 1995]

2.13 – Programação de corte de rosca no torno CNC

A máquina-ferramenta à CNC utilizada nos experimentos foi o ECN-40-II Romi [MANUAL...,1986]. Para esta máquina, no ciclo de CR, encontramos duas formas de programação: Programação linha-a-linha utilizando o código G33 (ciclo básico) (Figura 2.18) e programação automática de código G37 (ciclo automático) (Figura 2.19). As formas de entradas no ciclo de CR são feitas como segue :

G33(*X*) Z *K* (*A*) (*I*), onde:

(*X*) = profundidade por passada ou diâmetro final da rosca (absoluta)

Z = Posição final do comprimento da rosca (absoluta)

K = Passo da rosca (mm ou polegada) (incremental)

(*A*) = Abertura angular entre as entradas da rosca (absoluta)

(*I*) = Conicidade incremental no eixo *X* para rosca cônica ou passo para rosca na face (diâmetro) (incremental).

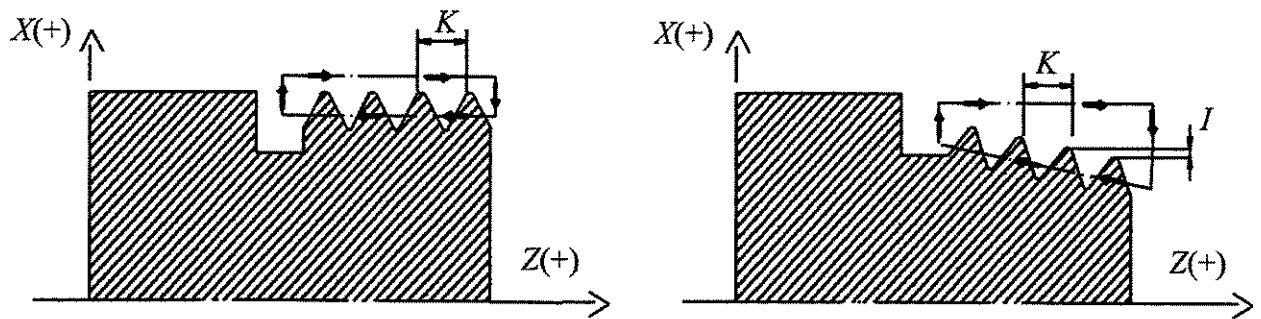


Figura 2.18 – Ciclo básico de programação [adaptada da Romi, 1986]

Para o ciclo automático, temos os seguintes dados de entrada:

G37 X Z (I) K $h_{inicial}$ E (A) (B) (W) (U) (L), onde:

X = profundidade final de CR (diâmetro)(absoluta)

Z = Posição final do comprimento da rosca (absoluta)

(I) = Conicidade incremental no eixo X para rosca cônica (diâmetro) (incremental)

K = Passo da rosca (mm ou polegada) (incremental)

$h_{inicial}$ = Profundidade para o primeiro passe

h_{total} = altura do filete no diâmetro

O valor da profundidade para o primeiro passe ($h_{inicial}$), é obtido pela aplicação da seguinte fórmula:

$$h_{inicial} = \frac{h_{total}}{\sqrt{N}} \quad (2.1)$$

N = nº total de passadas

E = Distância de aproximação para início de CR \Rightarrow E = diâmetro posicionado – diâmetro externo (diâmetro incremental)

(A) = Abertura angular entre as entradas da rosca (graus)

(B) = Ângulo de alimentação para o sistema composto (graus)

(U) = Profundidade do último passe de rosca (diâmetro) (incremental)

L = Número de repetição do último passe da rosca (acabamento)

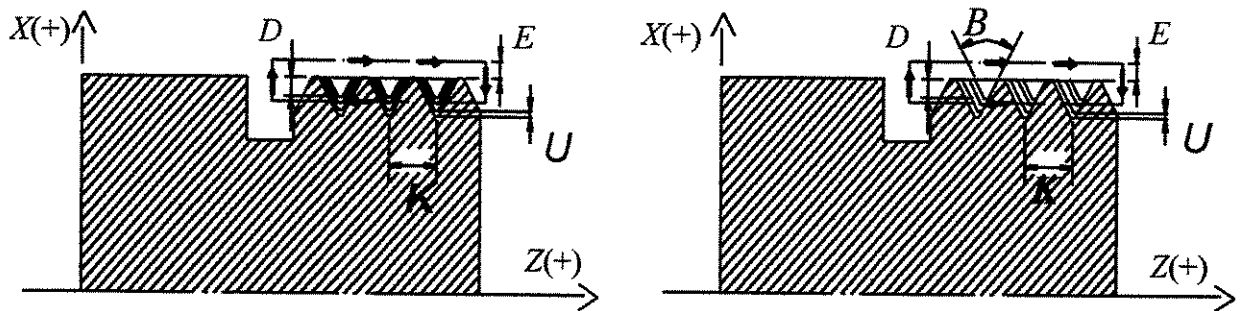


Figura 2.19 – Ciclo automático de programação [adaptada da Romi, 1986]

As formas de programação apresentadas acima são válidas para as máquinas ECN-40-II e para o Galaxy [MANUAL..., 1986] [MANUAL..., 1996]. A forma de programação varia de fabricante para fabricante. Algumas formas de programação de ciclo automático serão discutidas no capítulo 3 deste estudo (também o porquê da escolha do ciclo básico nos experimentos).

2.14 – Métodos de corte de roscas em tornos CNC

Existem três tipos diferentes de métodos de mergulho da ferramenta utilizados durante os passes para chegar até a profundidade de corte plena, que é a profundidade total da rosca (h_{total}). São eles: Radial, Flanco e Flanco alternado. Segundo TEETS [1990] e MODERN [1994] as características dos métodos de corte de roscas no CNC são as seguintes:

2.14.1 – Mergulho radial

Mergulho radial (*Figura 2.20-a*) é o método usual se o material da rosca é de fácil corte (dureza em torno de 165 HB). Ele permite formação suave de cavacos e desgaste homogêneo da pastilha, é apropriado para passos finos. Pode ocorrer trepidação, má formação do fluxo do cavaco em materiais de corte difícil, devido ao “encunhamento” da ferramenta, pois as duas arestas cortam. O “encunhamento” da ferramenta proporciona um maior desenvolvimento de calor na ponta da pastilha, pois os fios de corte ficam atritando com as superfícies que levam inevitavelmente à uma redução na vida da mesma.

A seqüência de profundidades de corte pode ser uniforme (constantes incrementalmente) ou decrescente, sendo a última utilizada para tentar uma área de corte constante em todas passadas e amenizar o problema do “encunhamento”.

2.14.2 – Mergulho de flanco

O método de mergulho de flanco (*Figura 2.20-b*) tem várias vantagens sobre o mergulho radial, como por exemplo, maior facilidade na remoção do cavaco e melhor dissipação do calor. Porém, para materiais difíceis temos um elevado esforço de compressão na ponta da ferramenta. Este método é aplicado pelo posicionamento inclinado entre 1° a 5° (graus) em relação ao ângulo do perfil da rosca, sendo este, o ponto de partida para usinagem do perfil da rosca.

O controle dos cavacos se dá quando eles são direcionados para fora. Apropriado para roscas maiores e CR interno onde existam problemas de escoamento dos cavacos e vibração. A formação do cavaco é similar ao do torneamento convencional, ou seja helicoidal, tornando o cavaco mais fácil de formar e guiar, apesar de ser mais longo, embora tendo contato com apenas um dos flancos da ferramenta.

2.14.3 – Mergulho de flanco alternado

Ainda segundo TEETS [1990] e MODERN [1994] o método de mergulho de flanco alternado (*Figura 2.20-c*) tem todas as vantagens do avanço de flanco e também igual distribuição de esforços em ambos flancos. Este método, embora permita desgaste homogêneo da pastilha e vida útil longa é raramente utilizado devido à dificuldade da programação da máquina CNC em relação aos métodos anteriores^(*).

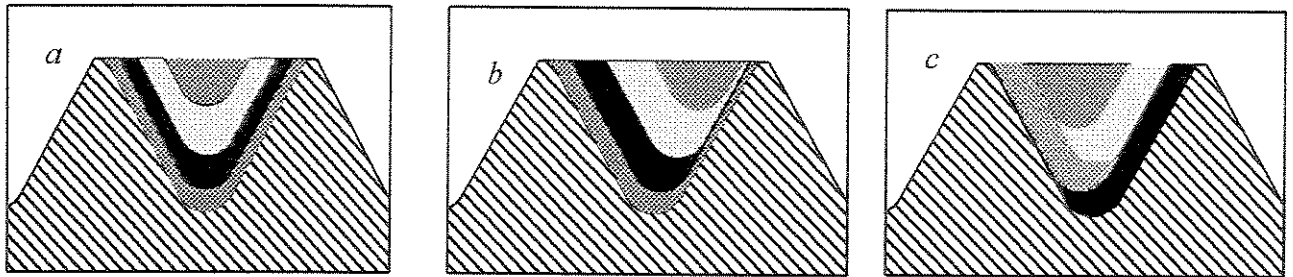


Figura 2.20 – Métodos: a– mergulho radial, b– mergulho de flanco, c– mergulho de flanco alternado

^(*) Com os modernos CNCs, caso necessário, o usuário pode pré-definir subrotinas para reduzir essa dificuldade.

Capítulo 3

Modelagem Teórica

3.1 – Considerações gerais

Parâmetros de corte para usinagem, no que se refere a operações de corte de roscas em tornos à CNC, são baseados em tabelas tecnológicas (determinadas experimentalmente) e modelos físico–matemáticos do fenômeno em si. Evidentemente, além do próprio material da “peça–obra” e da ferramenta de corte, a geometria da ferramenta é fator determinante para a definição das condições de corte.

O processo de fabricação de peças por “penteamento” da rosca recai em situação onde o avanço é bem superior ao do torneamento cilíndrico, ocasionando portanto, esforços notáveis sobre a pastilha. Uma vez que a pastilha tem seu perfil limitado pelo vão do filete da rosca, conclui–se pela necessidade de modelo matemático não simplista para controlar os esforços de corte e concomitante otimização do CR.

A forma mais simples de otimização de condições de operação pode ser realizada pela aplicação de cálculo diferencial para obter a velocidade de corte ideal para o mínimo custo, máxima produção ou lucro. A otimização depende de muitos fatores requerendo algoritmos que possam fornecer mais dados sobre as variáveis que envolvam o processo de usinagem [WEE & NEE, 1990].

3.2 – Estratégias para valores de profundidades de corte

Esta operação na maioria dos casos, segue as estratégias apresentadas pelos fabricantes [SANDVIK, 1998] [LAYDOWN, 1995] [THREADING, 1996] que orientam para as profundidades de corte variáveis (*Figura 3.1-b*) em relação à coordenada X . Tais recomendações são sugeridas apenas como valores iniciais, ficando uma lacuna na decisão de quantos passes, e principalmente quais valores de profundidades quando a geometria da ponta da ferramenta muda.

As pesquisas efetuadas por: [ARSECULARATNE, 1992] [MARKEVICH & UZHEIKO, 1990] [RADCHENKO & KARPVICH, 1989] [TEETS, 1990] para CR consideram de uma maneira geral como dado de entrada a profundidade de corte constante (PCC) (*Figura 3.1-a*) em relação a coordenada X , o que implica em área de corte (e força de corte) crescentes.

O aumento da força de corte tem como consequência o aumento no calor desenvolvido nas últimas “passadas”, isto para a PCC. A força e o calor, são fatores que SHAW em 1968 e BOOTHROYD em 1985, consideraram decisivos no desgaste da ferramenta. Logo para obter-se esforços tendendo a valores constantes é necessário utilizar-se seqüência de profundidades de corte variáveis (PCV) (*Figura 3.1-b*).

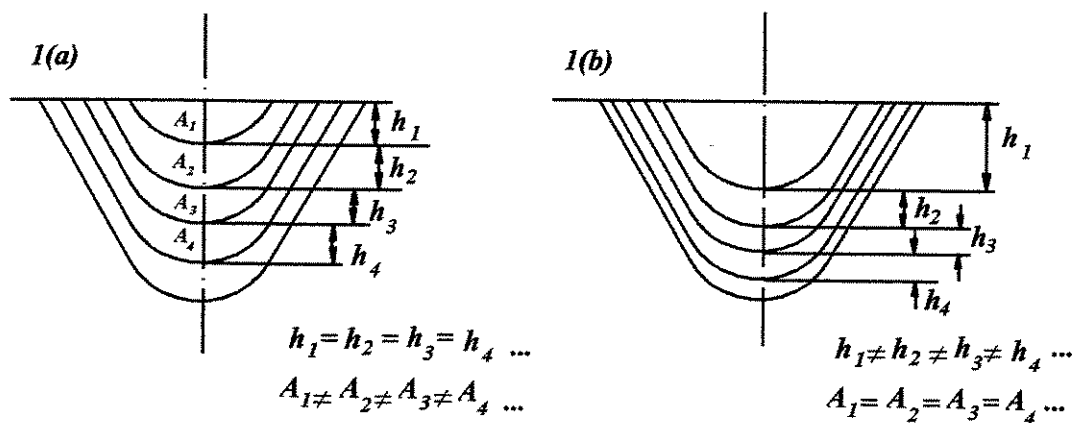


Figura 3.1 – Estratégias de profundidades de corte: (a) constante e (b) variável [repetida da Figura 1]

3.3 – Modelos matemáticos

Alguns modelos que serão apresentados referem-se ao corte de roscas cilíndricas em tornos à CNC, tendo-se portanto o passo da rosca numa direção paralela ao eixo Z do torno e as profundidades paralelas ao eixo X dos diâmetros.

É razoável admitir-se que o balanço de esforços uniformes nas diversas passadas da ferramenta é conseguido impondo-se áreas de corte constante, uma vez que a força de corte é proporcional à área de corte, considerando-se também que a variação dos raios (diâmetros) programados em cada passe não é significativo para cálculo da potência de corte de cada passe. Isto implica portanto, em uma série de profundidades de corte, com decréscimo não lineares. Para um melhor entendimento da questão vejamos por exemplos os seguintes modelos:

Os modelos apresentados por FREDERICKS em 1978 (Equação 3.1) e MACHADO em 1986 (Equação 3.2), são equivalentes para a distribuição das profundidades de corte. Tais modelos não consideram o perfil da ferramenta, ou seja o raio de arredondamento da ponta da ferramenta.

$$x_i = \left(1 - \sqrt{\left(\frac{i-1}{N}\right)}\right) x_{inicial} + \left(\sqrt{\left(\frac{i-1}{N}\right)}\right) x_{final} \quad (3.1)$$

$$h_i = h_{total} \sqrt{\frac{i}{N}} \quad (3.2)$$

No *Gráfico 3.1*, observa-se um valor alto da profundidade (0,386 mm) para o primeiro passe, que pode ser prejudicial ao desempenho da ferramenta e levar à quebra da mesma, pelo valor excessivo da pressão específica de corte, que está relacionada com a área de corte, e além do que a curva das áreas de corte^(*), para os demais passes não se mantêm constante.

(*) As áreas de corte, para todos os pontos dos gráficos 3.1 a 3.6, foram determinadas uma a uma utilizando-se a geometria elementar (triângulo com ponta arredondada).

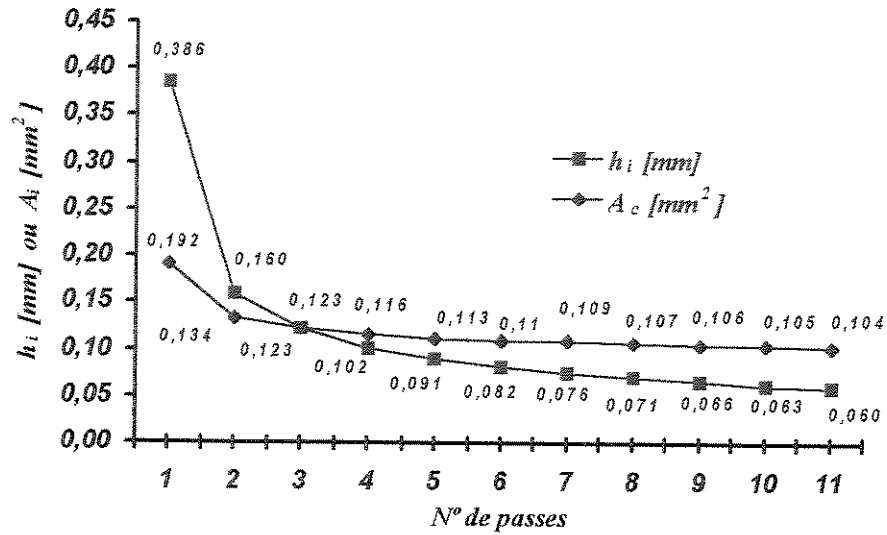


Gráfico 3.1 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_i), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se (3.1) e (3.2)

A Equação 3.3, desenvolvida por BRONSHTEIN e ESTERZON em 1984, considera o perfil da rosca através de um trapézio (FIGURA 3.2) e tendo como base do trapézio o parâmetro C (ponta da ferramenta), onde os valores da profundidade em cada passe são dados em função da profundidade de contato ($h_{contato}$) (FIGURA 3.4).

$$h_{i(contato)} = \sqrt{\left(\frac{C}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}\right)^2 + \frac{i}{N} \left(\frac{A_{trapezio}}{\tan \frac{\alpha}{2}}\right)} - \frac{C}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (3.3)$$

A área do trapézio é dada por: $A_{trapezio} = Ch_{contato} + (h_{contato})^2 \text{tg}30^\circ$, sendo a profundidade de contato dada por: $h_{contato} = 0,5413p$ (segundo NB97 para rosca métrica ISO), onde p é o passo da rosca.

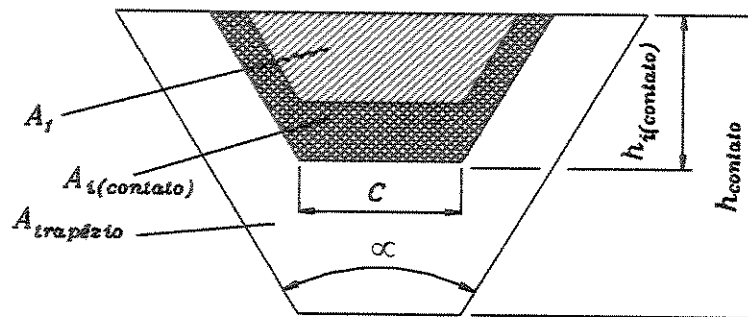


Figura 3.2 – Esquema teórico do perfil da rosca

O parâmetro da ponta da ferramenta (C) é dada por: $C = \frac{2R_f(1 - \sin \frac{\alpha}{2})}{\cos \frac{\alpha}{2}}$

Ao aplicar valores na equação (3.3) para rosca métrica de passo ($p=2$ mm) e raio da ferramenta ($R_f=0,26$ mm), obtemos os seguintes resultados:

$$h_{\text{contato}} = 1,082 \text{ mm};$$

$$C = \frac{2R_f(1 - \sin \frac{\alpha}{2})}{\cos \frac{\alpha}{2}} \Rightarrow C = 0,30 \text{ mm};$$

$$A_{\text{trapézio}} = Ch_{\text{contato}} + (h_{\text{contato}})^2 \text{tg}30^\circ \Rightarrow A_{\text{trapézio}} = 1,00 \text{ mm}^2.$$

Utilizando-se a equação 3.3 e calculando-se as respectivas áreas determinou-se as curvas do Gráfico 3.2, onde foram lançados as profundidades de contato $h_{i(\text{contato})}$ e correspondentes áreas de contato $A_{i(\text{contato})}$ em função do número de passes. O modelo resulta áreas constantes a partir do segundo passe ($0,0901 \text{ mm}^2$). Por outro lado, antes de usar o modelo para inserir valores do parâmetro X (eixo dos diâmetros) no programa do CR em tornos à CNC, o usuário deverá somar o valor da profundidade da ponta da ferramenta aos valores de $h_{i(\text{contato})}$, para obter-se o valor de cada profundidade de corte (h_i) que devem ser inseridos no programa.

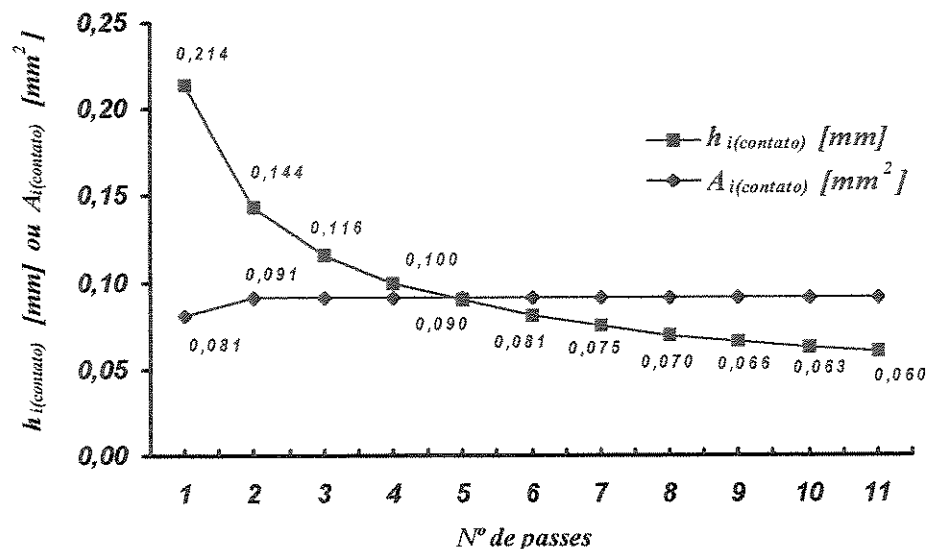


Gráfico 3.2 – Profundidade de contato em cada passe $h_{i(\text{contato})}$ ou Área de contato em cada passe $A_{i(\text{contato})}$, passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{\text{total}} = 1,08$ mm – aplicando-se (3.3)

3.4 – Modelos matemáticos para máquinas à CNC

Como já foi mencionado, fabricantes fornecem Unidades de Controle Numérico, com opções de programar o CR passada por passada ou através de Macro Instruções. Uma análise inicial indica que a maioria dos fabricantes utilizam Macro Instruções com estratégia de profundidades de corte gradativamente reduzidas, numa tentativa de balanceamento dinâmico dos esforços em todas as passadas. Geralmente, as Macro Instruções dos CNC são diferentes de máquina para máquina no que se refere à programação do ciclo de CR, tendo particularidades tanto na elaboração da programação dos parâmetros de entradas e nas respostas durante sua execução. As particularidades que serão verificadas abaixo, têm como objetivo estudar as respostas dos valores de profundidades de corte por passe durante a execução do programa no ciclo automático de programação. A Equação 3.4 abaixo é aplicada ao ciclo automático de CR dos CNCs Romi ECN 40-II e Galaxy [MANUAL, 1986] [MANUAL, 1996].

$$h_{inicial} = \frac{h_{total}}{\sqrt{N}} \quad (3.4)$$

A Equação 3.4, equivale a equação 3.2, mas expressa apenas o valor do primeiro passe, que o programador do torno inclui no bloco do programa para o CR, sendo que os demais valores o

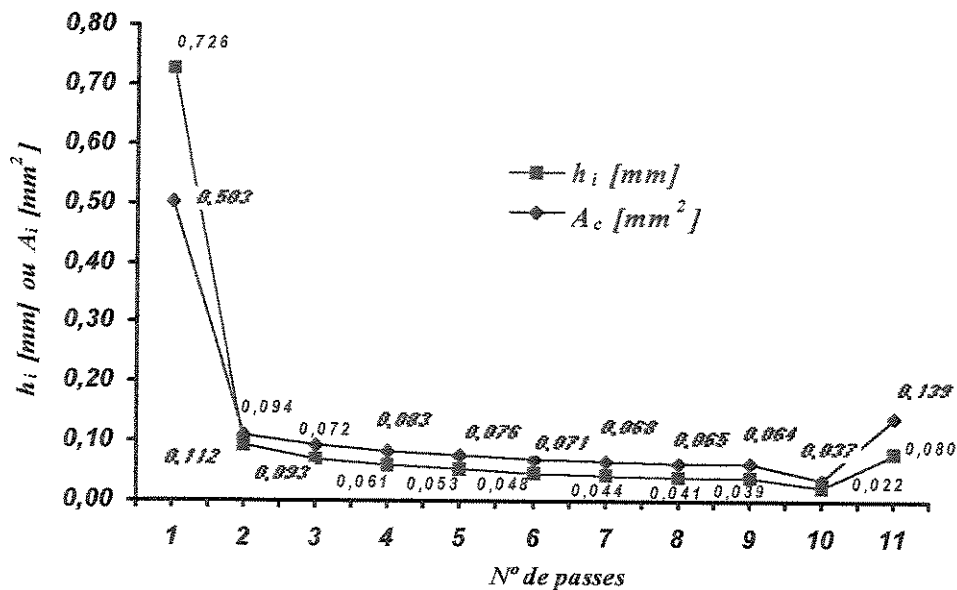


Gráfico 3.3 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_i), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se (3.4)

próprio software da máquina calcula automaticamente (ver detalhes no Anexo II). Observa-se (Gráfico 3.3) que o software da máquina, processa e apresenta valores de profundidades sem manter as áreas de corte constantes sendo que o valor do primeiro passe é muito alto, o que solicita de forma excessiva a ferramenta de corte.

Para alguns tornos CNC para o CR o ciclo de programação é feito através de opções de eventos, ou seja evento furação, evento fresamento, evento corte de roscas, etc. Por exemplo para a programação do torno MULTIPLIC 30 Romi [MANUAL, 1996], feito a escolha evento corte de roscas, os dados de entrada são inseridos como segue:

- h_f (altura do filete)
- h_p (profundidade por passe)
- p (passo)
- X (valor do eixo dos diâmetros)
- Z (valor do eixo árvore da máquina)
- N (n.º de passes)

Com esta forma de programação, verifica-se que o ciclo de CR do software deduz as profundidades com valores constantes (ver detalhes no Anexo III), não aplicando portanto o conceito de áreas constantes de corte (Gráfico 3.4).

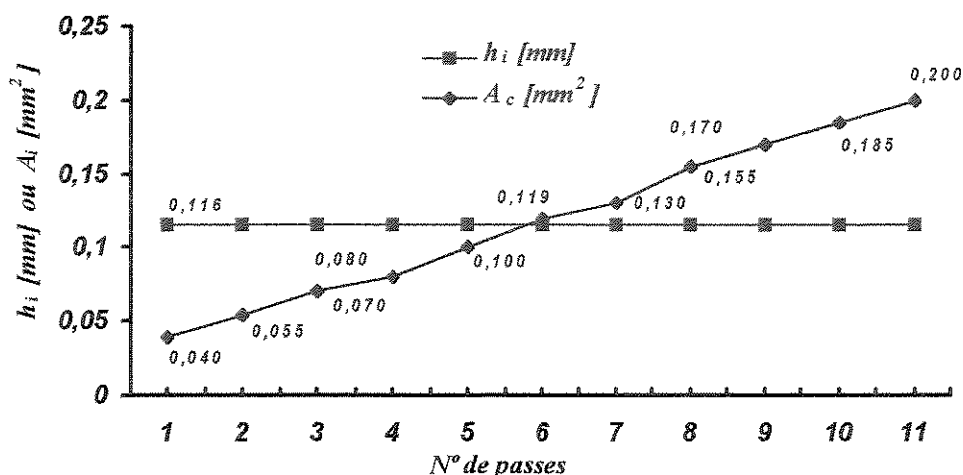


Gráfico 3.4 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_c), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se o evento corte de rosca do torno MULTIPLIC 30

Um outro exemplo é o ciclo de CR do torno Nardini – ECO [MANUAL, 1993]. Esta máquina dispõe de um ciclo fixo que realiza a operação completa de CR (interna, externa, paralela e cônica), onde o cálculo da profundidade em cada passe (ver detalhes no Anexo IV) é feito através de uma progressão aritmética (Equação 3.5).

$$\begin{aligned}
 h_0 &= k \\
 h_1 &= k - c \\
 h_2 &= k - 2 \times c \\
 &\bullet \\
 &\bullet \\
 &\bullet \\
 h_i &= k - i \times c \\
 k &= 2 \times \frac{(h_{total} - h_{acabamento})}{(N + 1)} \\
 c &= \frac{k}{N}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Com este procedimento a curva de profundidade tem valores decrescentes (*Gráfico 3.5*), mas a área de corte aumenta somente até o 5º passe. Com isso os esforços de corte aumentam também. Por outro lado, no corte de materiais muito dúcteis, os valores para os últimos passes são indesejáveis, pois pode ocorrer o empastamento de material na região de corte.

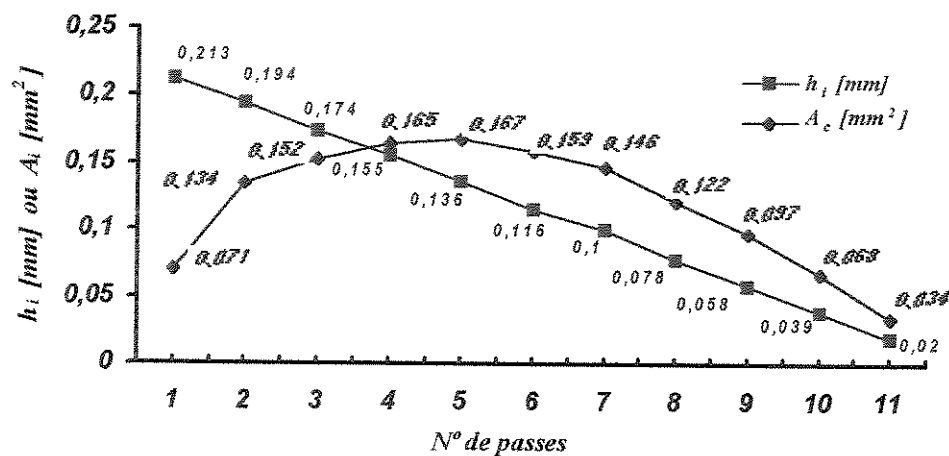


Gráfico 3.5 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_i), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se (3.5)

3.5 – Modelo de aplicativo

Os valores das profundidades de corte obtidos pelo aplicativo [SANDVIK, 1997] são distribuídos, sem considerar o raio da ferramenta. Com isso não há um controle dos esforços de corte como mostra a curva com os valores das áreas de corte, *Gráfico 3.6*.

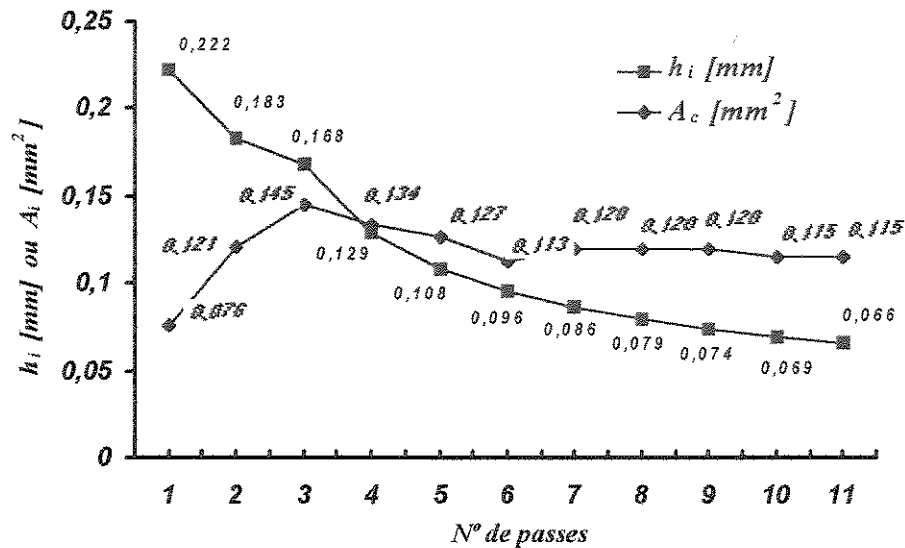


Gráfico 3.6 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_c), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se o software da SANDVIK

Os modelos apresentados, proporcionam a série reduzida de profundidade de corte, apesar de não utilizarem o perfil do filete ou da ferramenta de corte e, conseqüentemente, não aplicam o conceito de áreas efetivamente constantes de corte, com exceção do modelo apresentado por BRONSHTEIN e ESTERZON.

3.6 – Modelo proposto

Considerando que em todos os passes a área do cavaco deve ser constante, para obter-se uma força de corte praticamente constante em todos os passes, deve-se variar as profundidades de corte (h_i) em cada passe (*Figura 3.3*) de modo a conseguir-se esta premissa.

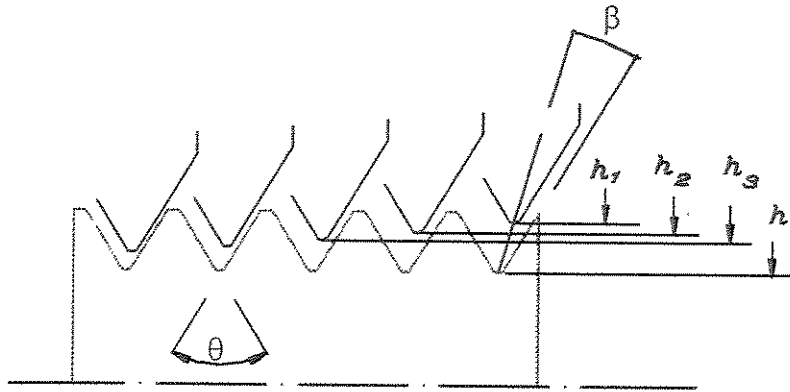


Figura 3.3 – Estratégia de corte variando o mergulho da ferramenta

As considerações sobre o perfil real da ferramenta de corte (ver detalhes no Anexo VII) (Figura 3.4) e o perfil de projeto do filete [FERLINI, 1981] (Figura 3.5), ditado por normas técnicas, são fundamentais para desenvolver o modelo matemático e obter as profundidades por passe em relação a coordenada X e, conseqüentemente, a área de corte constante.

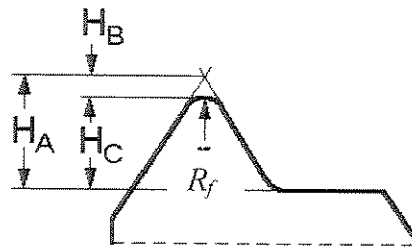


Figura 3.4 – Detalhe do perfil da ferramenta de corte

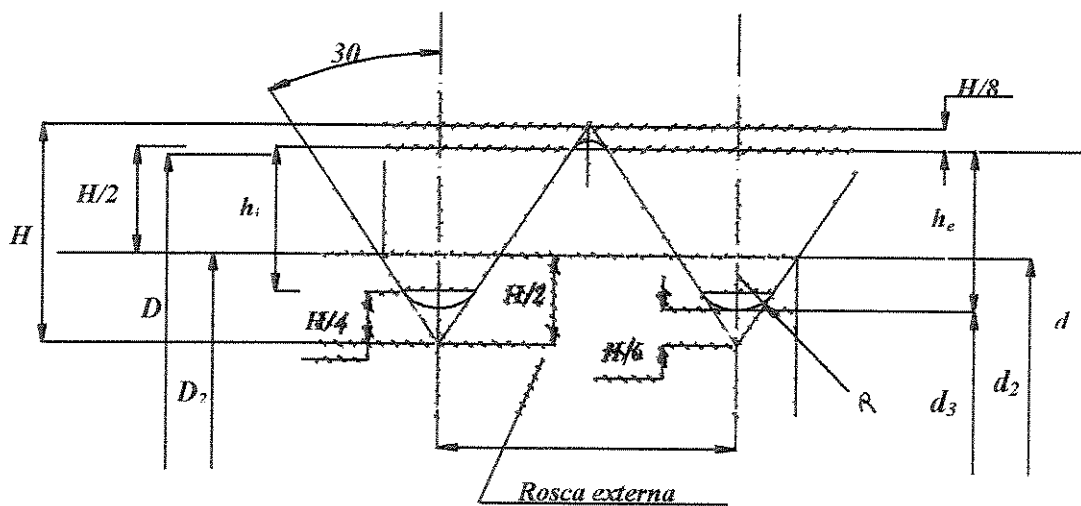


Figura 3.5 – Perfil de projeto – Rosca métrica ISO – Dimensões NB97 – Norma Brasileira para desenho técnico

3.6.1 – Dedução do modelo proposto

A *Figura 3.6* ilustra as relações trigonométricas existentes na ponta de uma ferramenta, para corte de roscas, com raio de arredondamento.

Para o desenvolvimento do modelo, manteve-se o sistema de coordenadas padrão utilizado em tornos à CNC, ou seja :

eixo árvore do torno \Rightarrow coordenada Z ;

eixo dos raios (diâmetros) \Rightarrow coordenada X .

Assim sendo, nas deduções à seguir tem-se:

Para $f(z)$, usada para o cálculo da parte circular do perfil, como função dependente de Z e $g(x)$), usada para o cálculo da parte linear do perfil, como função dependente de X (o que requer para a análise de $g(x)$ a visualização da figura rotacionada a 90°)

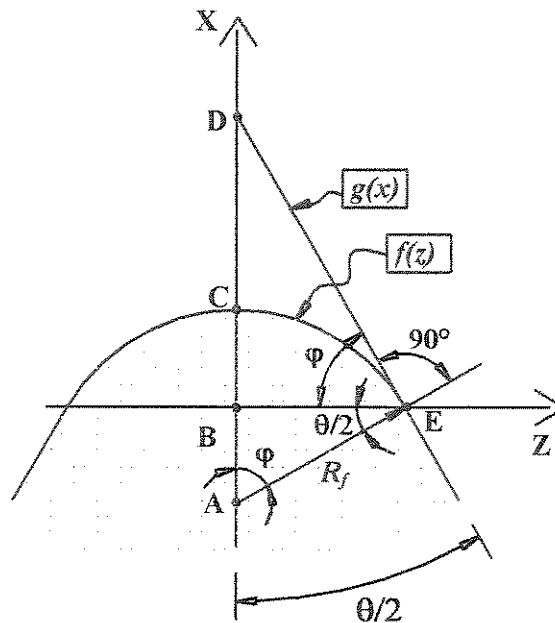


Figura 3.6 – Detalhe das relações trigonométricas na ponta da ferramenta

As relações trigonométricas são escritas da seguinte forma:

$$AB = R_f \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}$$

$$BE = \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} DB \text{ ou } BE = R_f \cos \frac{\theta}{2}$$

$$CB = R_f - AB$$

$$CB = R_f - R_f \operatorname{sen} \frac{\theta}{2}$$

$$DB = R_f \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\operatorname{sen} \frac{\theta}{2}}$$

Como nosso estudo restringi-se à roscas métricas ($\theta = 60^\circ$), vem:

$$AB = \frac{R_f}{2}$$

$$CB = \frac{R_f}{2}$$

$$BE = 1,5 R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$ está na forma literal para ser simplificada no cálculo das deduções das profundidades em cada passe (3.6.3).

Conforme a *Figura 3.6*, e pelo fato do centro do raio da ferramenta (ponto A) estar no eixo dos X (com $Z = 0$) podemos impor para $f(z)$ uma função quadrática sem o termo do 1º grau, logo temos:

$$f(z) = a_1 z^2 + c_1$$

Vamos determinar portanto os parâmetros a_1 e c_1 .

$$\text{Para } z = 0 \quad f(0) = CB = \frac{R_f}{2} \quad \therefore c_1 = \frac{R_f}{2}$$

$$\text{Para } z = BE \text{ tem-se } f(z) = 0$$

Logo tem-se:

$$0 = a_1 z^2 + c_1$$

$$0 = a_1 \left(1,5R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^2 + \frac{R_f}{2} \therefore a_1 = -\frac{1}{4,5R_f \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}}$$

\therefore A função quadrática particularizada para os parâmetros a_1 e c_1 , têm a seguinte forma:

$$f(z) = \frac{R_f}{2} - \frac{z^2}{4,5R_f \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}} \quad (3.6)$$

Para a equação geral da reta $g(x) = b_2 x + c_2$, a função linear particularizada para rosca métrica fica escrita da seguinte forma:

$$g(x) = 1,5R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} x \quad (3.7)$$

3.6.2 – Cálculo da integral da área de corte

O valor da área hachurada (*Figura 3.7*) representa a metade da área de corte da ferramenta e será obtida utilizando-se as funções representadas pelas equações (3.6) e (3.7). (observe *Figura 3.6*) que para rosca métrica $AB = \frac{R_f}{2}$.

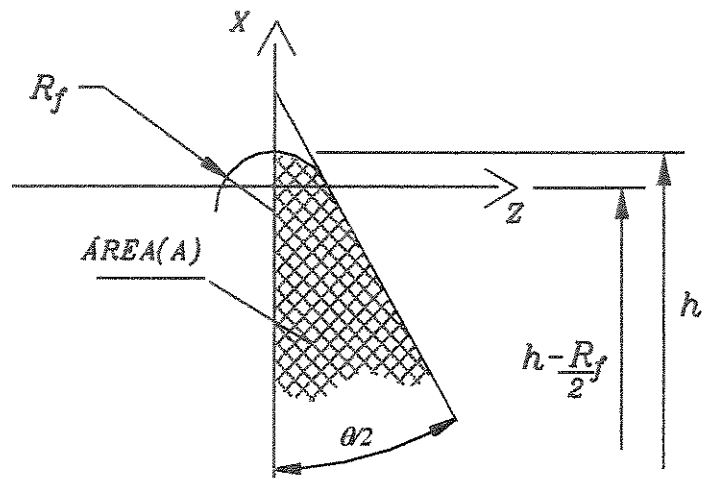


Figura 3.7– Detalhe da ponta da ferramenta

Parte arredondada :

$$f(z) = \frac{R_f}{2} - \frac{z^2}{4,5R_f \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}} \quad (3.6)$$

Reta :

$$g(x) = 1,5R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} x \quad (3.7)$$

Daí temos a seguinte integral de área (A) :

$$A = \int_0^{1,5R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}} \left(\frac{R_f}{2} - \frac{z^2}{4,5R_f \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2}} \right) \cdot dz + \int_{-x}^0 \left(1,5R_f \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} x \right) \cdot dx \quad (3.8)$$

Resolvendo a integral , obtemos a seguinte equação:

$$A = \frac{R_f^2}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + \left\| -1,5R_f x \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{x^2}{2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right\| \quad (3.9)$$

, logo para se obter a área total a equação (3.8) é multiplicada por 2, daí obtemos:

$$A = R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 3 R_f x \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + x^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (3.10)$$

Na equação (3.9) substituindo $x = h - \frac{R_f}{2}$ e resolvendo, obtemos :

$$A = 2 R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (3.11)$$

3.6.3 – Dedução das profundidades de corte em cada passe(h_i)

Para a força de corte tender a um valor constante em todas as passadas, as áreas de corte têm que ter os mesmos valores (*Figura 3.8*), portanto temos :

$$A_1 = A_2 = A_3 = \dots = \frac{A_t}{N} \quad (3.12)$$

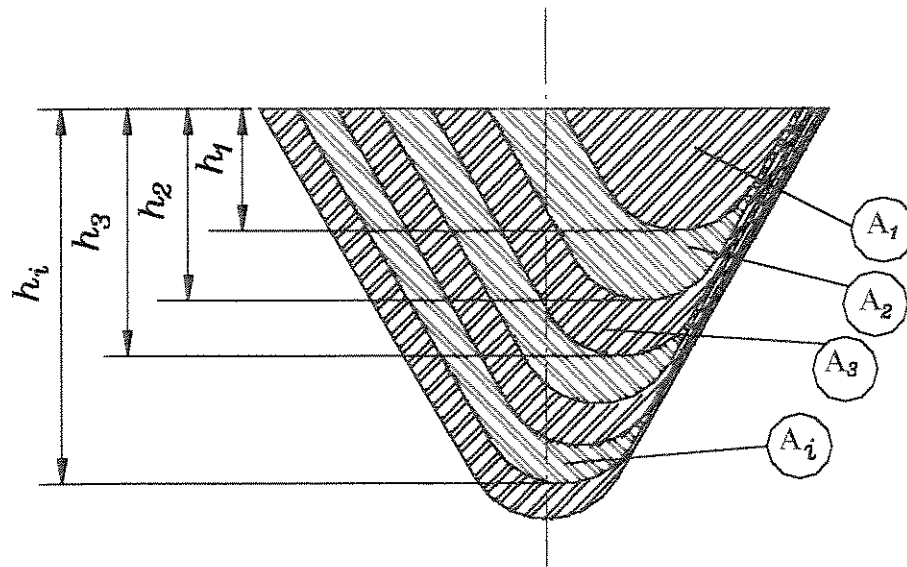


Figura 3.8– Áreas de corte por passe

$$A_1 = h_1^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h_1 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

$$A_2 = h_2^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h_2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - 1 \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N}$$

$$A_3 = h_3^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h_3 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - 2 \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N}$$

•
•
•

$$A_i = h_i^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h_i \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - (i-1) \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N} \quad (3.13)$$

Como as áreas em cada passe são iguais podemos escrever que:

$$A_1 = A_2 = A_3 \dots A_i = \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N} \quad (3.14)$$

Podemos então deduzir e escrever que:

equação (3.13) = equação (3.14):

$$\begin{aligned} h_i^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h_i \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - (i-1) \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N} \\ = \frac{\left[h^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + 2R_f h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} R_f^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right]}{N} \end{aligned}$$

Resolvendo a igualdade obtemos a profundidade em cada passe da seguinte forma:

$$h_i = \sqrt{\left(\frac{5}{4}\right) R_f^2 + \left(\frac{i}{N}\right) \left[h^2 + 2R_f h - \left(\frac{1}{4}\right) R_f^2 \right]} - R_f \quad (3.15)$$

Ao aplicar valores na equação 3.15, no *Gráfico 3.7*, observa-se que a área de corte permanece constante, entre os passes, pois a variação do raio do fundo do filete da rosca, ou seja raio da ferramenta, faz parte do modelo. Desta forma o modelo proposto é um algoritmo que envolve as grandezas geométricas da rosca, auxiliando na entrada dos parâmetros geométricos para a programação de tornos à CNC no mergulho da ferramenta de corte no eixo dos diâmetros (X).

Por fim, ao manter as áreas de corte constantes as forças de corte serão controladas, favorecendo o acabamento superficial da peça, minimizando o desgaste da ferramenta.

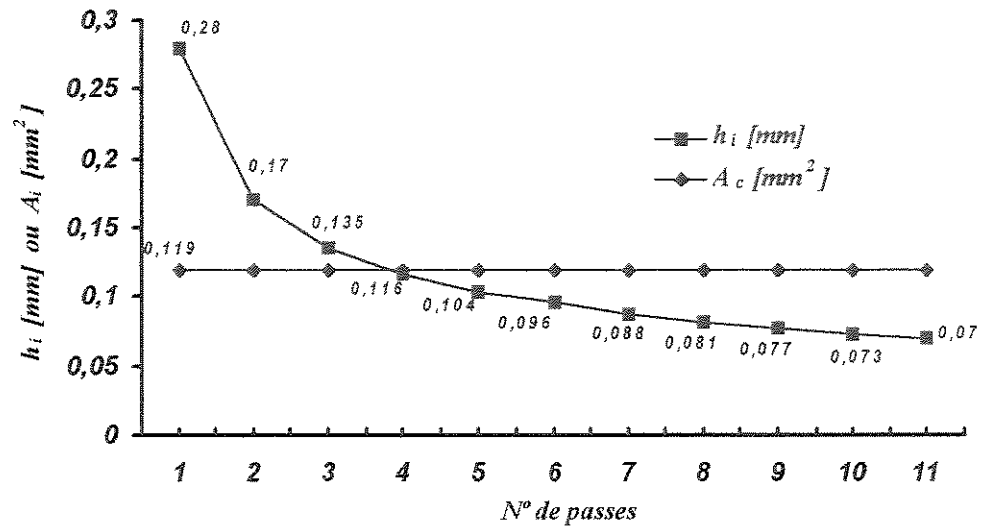


Gráfico 3.7 – Profundidade em cada passe (h_i) ou Área de corte em cada passe (A_c), passo = 2 mm, $R_f = 0,26$ mm e $h_{total} = 1,28$ mm – aplicando-se (3.15)

Capítulo 4

Validação experimental do modelo proposto

4.1 – Forças de usinagem

É sabido que os esforços de corte são influenciados por uma série de fatores (material da peça, material e geometria da ferramenta, velocidade de corte, lubrificação e área de corte). Portanto o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam na qualidade do produto, no controle da temperatura de corte, e o desgaste da ferramenta [DINIZ, 1999].

As forças de usinagem são consideradas como uma ação da ferramenta sobre a peça. Se existe controle de quase todos os aspectos mencionados acima, excetuando-se os aspectos geométricos da ferramenta de corte de rosca, há necessidade de um modelo que realmente auxilie na determinação correta das áreas de corte para o conseqüente controle dos esforços de corte.

A definição das condições de corte em operações de torneamento de desbaste cilíndrico pressupõe a correta utilização da capacidade da Máquina-Ferramenta, diferindo razoavelmente, para o caso em questão: corte de rosca, onde os esforços são bem inferiores, mas não dispensando a necessidade do conhecimento dos mesmos, uma vez que a ferramenta em si é fator limitante dos esforços.

O emprego do modelo proposto (fórmula 3.15) deve proporcionar esforços de corte constantes, o que requer comprovação experimental.

Comparou-se então, os esforços de corte utilizando-se a fórmula 3.15 e a distribuição de passes utilizados em dois modelos de tornos CNC: ECN-40-II, o qual emprega a estratégia de profundidades de corte variável (PCV) e o MULTIPLIC 30* que emprega a estratégia de profundidades de corte constante (PCC).

As medições dos esforços de corte foram feitas em torno convencional, equipado com dinamômetro com coluna pneumático (detalhes anexo XI), “emulando” os tornos CNC, devido a impossibilidade de fixação do corpo do dinamômetro nos tornos CNCs.

4.2 – Sistemas dinâmicos

Para entender o comportamento dos sistemas dinâmicos, são necessários modelos (equações) que descrevem o relacionamento entre os estímulos (input) e as respostas (output) no sistema. Essas equações podem ser usadas para prever o comportamento do sistema em determinadas situações .

Modelos são baseados nas leis da Física (Mecânica, Elétrica, Térmica, Fluidos, etc.), logo deve-se descobrir o modelo matemático através de equação diferencial em situação física específica e achar a solução apropriada dessa equação [EDUARDS & PENNEY, 1993]

Para determinar-se a força de corte (*Figura 4.1*) é necessário elaborar-se um modelo que represente de forma mais realista possível as entradas, que no torneamento são: Velocidade de corte, Área de corte, Material da peça, Material da ferramenta, Fluido de corte, avanço, profundidade de corte, sendo que no CR temos ainda o número de passes. Saídas, típicas são: Desgaste da ferramenta, Acabamento.

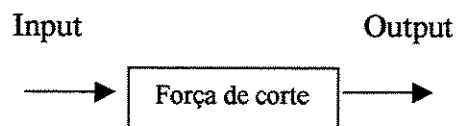


Figura 4.1 – Sistema aberto

* Os tornos à CNC ECN-40-II e o MULTIPLIC 30 são equipamentos produzidos pelas indústrias ROMI

Todos pesquisadores indicam a importância da área de corte na determinação precisa da força de usinagem. Por exemplo, DANAI em 1992 propõe um modelo para análise dos esforços no torneamento, como segue:

$$F = F_c + F_r \quad (4.1)$$

A primeira parcela (F_c – força de corte) do modelo acima, é escrito da seguinte forma: $F_c = \alpha A_c$, onde: α é uma constante de proporcionalidade e A_c é a área da secção. A outra parcela (F_r – força residual) que surge devido ao “encunhamento” do par ferramenta-peça. Logo a equação (4.1) é rescrita como segue:

$$F = \alpha A_c + F_r \quad (4.2)$$

Ainda para o modelo da força de usinagem (F) tem-se as componentes tangencial (Y), direção do eixo árvore (Z) e eixo dos diâmetros (X), respectivamente:

$$F_y = \alpha_y A_c + F_{ry} \quad (4.3)$$

$$F_z = \alpha_z A_c + F_{rz} \quad (4.4)$$

$$F_x = \alpha_x A_c + F_{rx} \quad (4.5)$$

Com este modelo as componentes são determinadas para valores diferentes de área de corte.

4.3 – Força de corte

Os valores de força de corte (F_c), conforme ilustram os gráficos, apresentam a média dos valores de 5 testes para cada modelo ensaiado, e servem como dados comparativos entre a curva do modelo proposto com as de máquinas à CNC. Os dados de corte (velocidade de corte, passo de rosca, etc) estão na tabela a seguir, sendo que os dados da ferramenta de corte estão no anexo VII. Os experimentos feitos compararam resultados para corte de rosca de passo 2 mm e raio de ferramenta 0,2 mm.

TABELA 4.1 – Dados de usinagem

NÚMERO DE PASSES	11
RAIO DA FERRAMENTA (mm)	0,2
ALTURA DO FILETE (mm)	1,28
RPM	1180
VELOC. DE CORTE (m/min.)	122
DIAMETRO DA PEÇA (mm)	33
PASSO (mm)	2
FLUÍDO DE CORTE	não
MERGULHO RADIAL	sim
TEMPO DE USINAGEM/PASSE (Seg.)	8
DUREZA (HB)	200
COMPRIMENTO DE USINAGEM DA ROSCA (mm)	400

Profundidade em cada passe (h _i) [mm]			
Passe	Fórmula 3.15	ECN 40-II	MULTIPLIC 30
1º	0,29	0,73	0,116
2º	0,17	0,09	0,116
3º	0,14	0,07	0,116
4º	0,12	0,06	0,116
5º	0,11	0,05	0,116
6º	0,10	0,04	0,116
7º	0,09	0,04	0,116
8º	0,08	0,04	0,116
9º	0,07	0,04	0,116
10º	0,06	0,02	0,116
11º	0,05	0,08	0,116

Cada ponto representativo de força de corte (F_c), lançado em cada curva (*Gráfico 4.1*) trata-se na realidade da média de 5 experimentos, onde pode-se observar que para o modelo proposto a força de corte tem a menor variação observada, e isto se deve a diferença de profundidades de corte entre uma passada e a consecutiva (*Figura 4.2*) que é de décimos (tendendo a centésimos). Nos passes finais, ocorre um pequeno aumento na força de corte, em função do correspondente “encunhamento” progressivo da ferramenta, mas tendo variação desprezível comparados com os demais modelos.

A utilização do Ciclo Fixo de Usinagem (G37) do ECN-40-II indicou uma força de corte bastante alta (1200 N) na primeira passada, caindo a seguir para as passadas subsequentes. A utilização do torno 30 DX32R, indica um aumento progressivo da força de corte, atingindo no último passe 900 N. Portanto a conclusão que se chega é que o modelo proposto possibilitou uma melhor distribuição das forças de corte entre as passadas: ferramenta submetida à valores próximos das forças em todas as passadas.

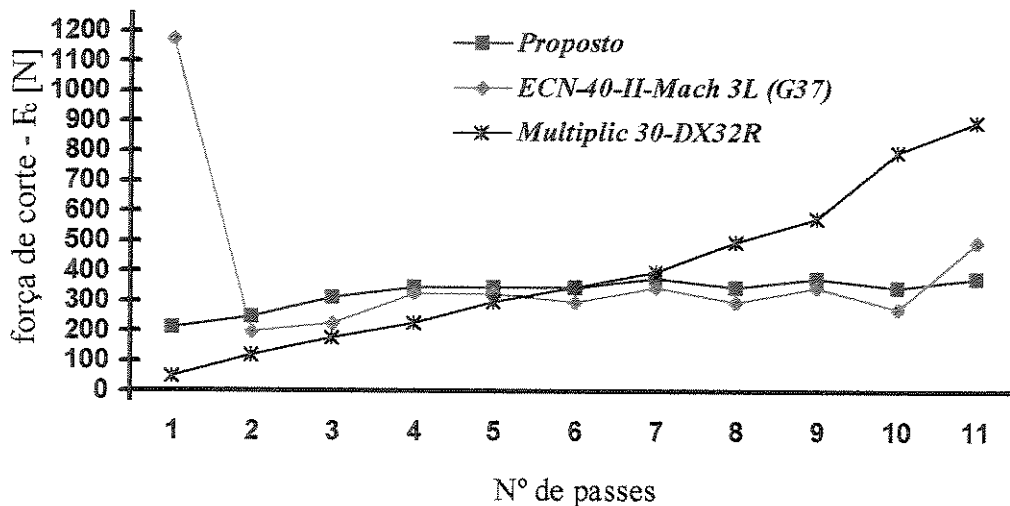


Gráfico 4.1 - Força de corte x nº de passes

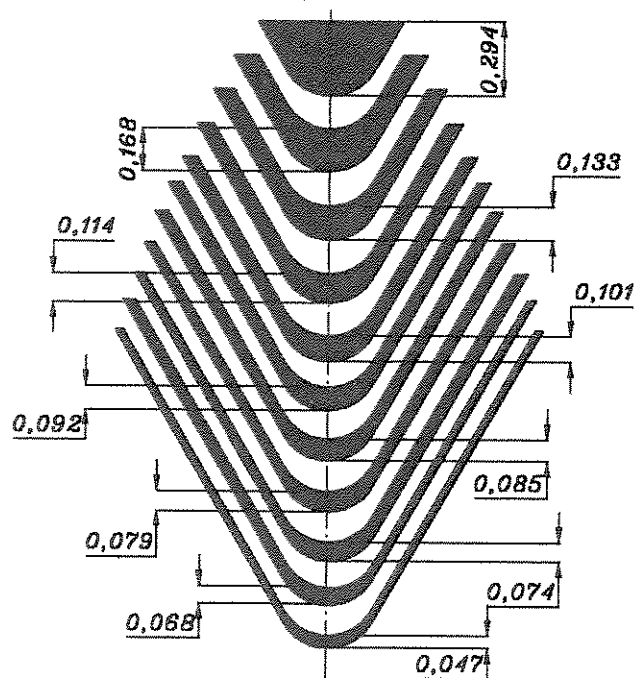


Figura 4.2 – Mergulho radial: valores de profundidades para o modelo proposto

4.4 – Análise de resultados da pressão específica de corte no CR

As curvas contidas no Gráfico 4.2, foram obtidas utilizando as forças de corte mensuradas conforme 4.3 e a equação da pressão específica de corte, apresentada por FERRARESI em 1977:

$$K_s = \frac{F_c}{A} \quad (4.6)$$

Ao resolver a relação (equação 4.6): força de corte ($F_c = 1200$ N, ciclo automático (G37) do torno CNC ECN 40-II, *Gráfico 4.1*) pela área de corte ($A_c = 0,468$ mm², obtida pela fórmula 3.14), obtêm-se a pressão específica de corte ($K_s = 2564,1$ N/mm²) (*Gráfico 4.2*). O valor obtido da pressão específica de corte com a alta temperatura (≈ 1200 graus) gerada pelo CR, tornará mais propenso o surgimento da deformação plástica (*Figura 4.3-b*), que constitui uma avaria, como se fosse um forjamento da aresta, fazendo com que a aresta perca muito de sua forma original e levar a quebra. Se o problema fosse no torneamento normal (cilíndrico), a providência seria no sentido de, antes de mudar os parâmetros de usinagem, selecionar uma classe de pastilha menos tenaz, ou seja com maior dureza à quente, e verificar a possibilidade de mudança do fluido de corte, mas no CR a forma da rosca determina a geometria do inserto, deixando pouca liberdade para reforçar a ponta do raio das ferramentas (por exemplo: $r_c = 0,07$ mm – 0,39 mm para rosca métrica) e o alto valor da profundidade no primeiro passe tem grande influência para o aparecimento desta avaria. A solução é a utilização do modelo proposto que proporciona uma área de corte ($A_c = 0,119$ mm²) constante em todos passes, uma força de corte ($F_c = 200$ N, *Gráfico 4.1*) no primeiro passe, e isto resulta num valor de pressão específica de corte ($K_s = 1680,7$ N/mm², este valor é praticamente constante comparados com os demais modelos) e uma aresta sem deformação. É importante também, como será visto no Capítulo 5, o controle do cavaco para evitar que o mesmo envolva a peça e destrua a ponta da ferramenta no final da operação.

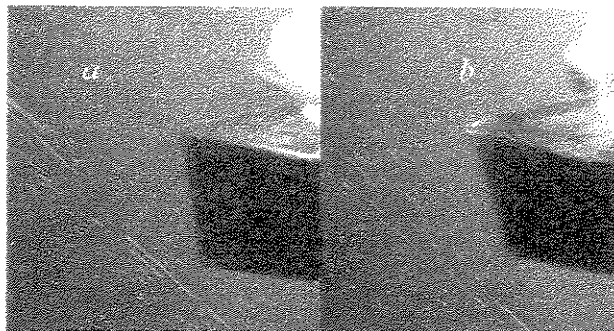


Figura 4.3: a – antes da usinagem , b – Deformação plástica

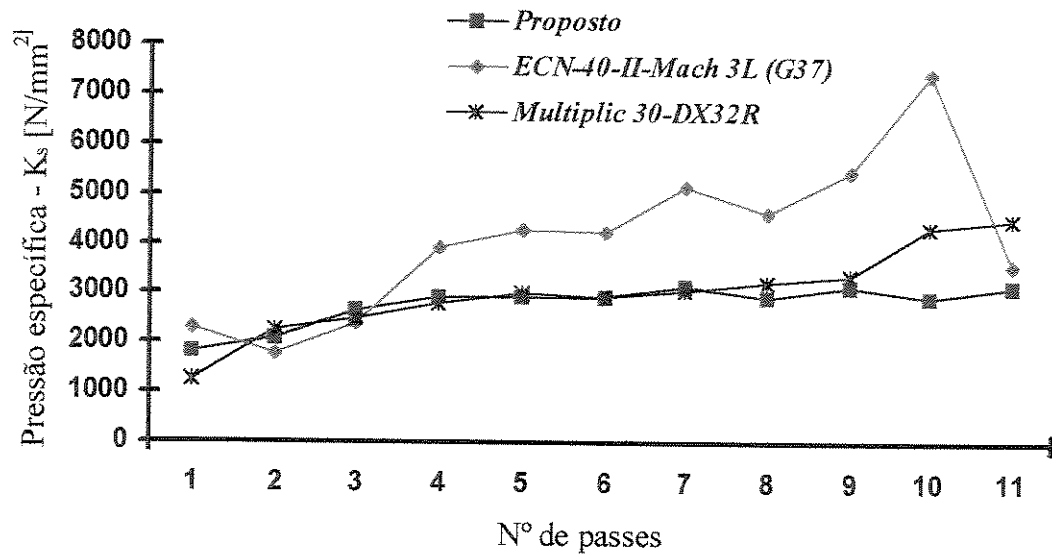


Gráfico 4.2 - Pressão específica de corte x nº de passes

Capítulo 5

Estudo de casos, Resultados e Discussões

5.1 – Considerações iniciais sobre os experimentos

A identificação do método de CR é importante não só para otimização dos dados tecnológicos e geométricos, que levam à automação do processo de fabricação, mas também para um melhor aproveitamento da ferramenta no que se refere à diminuição do desgaste e consequente aumento do tempo de vida da mesma.

Nesse capítulo apresentaremos resultados da aplicação do modelo proposto (fórmula 3.15) em 3 métodos (casos) habitualmente empregados no meio produtivo:

- Corte de roscas pelo método: mergulho radial
- Corte de roscas pelo método: mergulho de flanco
- Corte de roscas pelo método: mergulho de flanco alternado (Zig-Zag)

As verificações da corrente elétrica, forma do cavaco e vida da ferramenta foram feitas no torno Romi-ECN-40-II utilizando-se o ciclo básico de programação (G33) (vide detalhes no anexo I) e valores de profundidades do modelo matemático proposto (Fórmula 3.15). Não utilizou-se a macro intrusão (G37) (vide detalhes no anexo II) porque a mesma não mantém áreas de corte constante e pode levar aos problemas citados no capítulo 4.

O levantamento de esforços de corte, para os 3 métodos de CR, foi feito utilizando novamente um torno convencional, devido a impossibilidade de fixação do dinamômetro no torno CNC.

Como ferramenta empregou-se insertos de perfil único (incompleto) código R166.0G-16VM01-002, cujos detalhes podem ser vistos no anexo VII.

5.2 – Análise da corrente elétrica da máquina

A corrente elétrica foi observada no torno CNC sendo que os dados de usinagem para leitura da corrente foram os seguintes:

TABELA 5.1 – Dados de usinagem

NÚMERO DE PASSES	08
RAIO DA FERRAMENTA (mm)	0,2
ALTURA DO FILETE (mm)	1,28
RPM	1180
VELOC. DE CORTE (m/min.)	137
DIAMETRO DA PEÇA (mm)	37
PASSO (mm)	2
FLUÍDO REGRIGERANTE	não
MERGULHO RADIAL	sim
TEMPO DE USINAGEM/PASSE (Seg.)	8
DUREZA (HB)	200
COMPRIMENTO DE USINAGEM DA ROSCA (mm)	400

Os valores da corrente efetiva, são médias resultantes de 5 repetições (*Gráfico 5.1*) não permitindo uma relação com a vida da ferramenta, pois as profundidades de corte são pequenas no CR, sendo que os valores analisados dão margem a erros devido a fatores alheios a usinagem, tais como: desbalanceamento do motor, do eixo árvore e mesmo da própria placa.

Com isso podemos concluir que durante o processo de CR, a potência consumida pelo motor principal da máquina não é significativamente menor quando a ferramenta está nova e não necessariamente aumenta à medida que a ferramenta se desgasta, logo não é possível monitorar a vida da ferramenta através da análise da corrente consumida pelo motor principal da máquina para o CR.

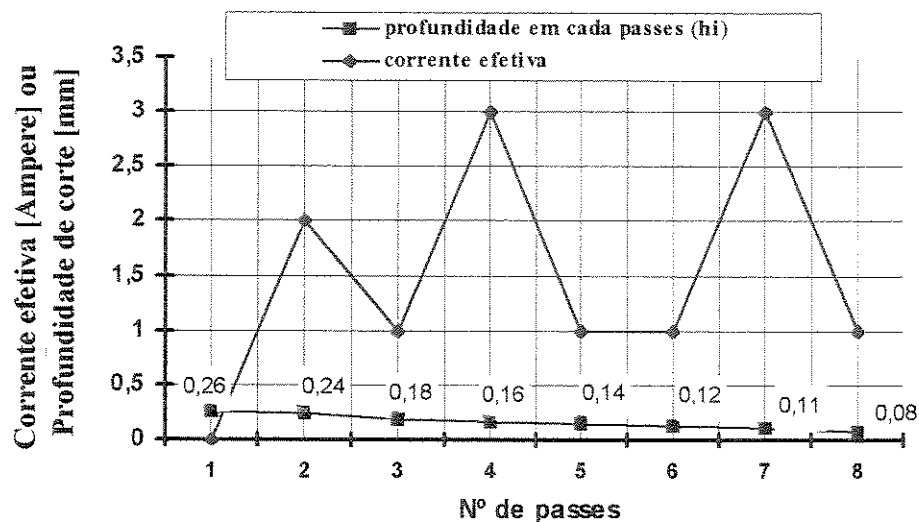


Gráfico 5.1 - método: mergulho radial, com valores de profundidades obtidos do catálogo da sandvik, 1998.

5.3 – Formas de cavacos nos métodos de CR

A formação do cavaco e a energia mecânica associada à formação do mesmo, devido ao atrito com a ferramenta e o atrito com a peça, influenciam diversos fatores ligados a usinagem, tais como desgaste da ferramenta, esforços de corte, calor gerado na usinagem, e a penetração do fluido refrigerante. A energia (calor) produzida varia de acordo com o tipo de usinagem, material da peça, e da ferramenta, condições de usinagem e a geometria da ferramenta.

Como este estudo visa a otimização dos parâmetros geométricos e da vida da ferramenta no CR, onde a geometria da ferramenta, condições de usinagem (dados tecnológicos: velocidade de corte, profundidade de corte, avanço) e material da peça (ABNT 1045 trefilado) são os mesmos para os três métodos de CR, a análise será feita na forma de cavaco gerado em cada método e as conseqüências que a forma do cavaco pode trazer à ferramenta e ao produto acabado.

Para tanto vejamos as formas de cavacos (*Figura 5.1*) produzidos em cada passe na análise do método, para um passo de rosca de 1.5 mm e um número de passes de 5, com mais um repasse de acabamento :

Mergulho radial:

- 1° PASSE – forma de cavaco espiral
- 2°, 3°, 4° e 5° PASSES – Formas de cavaco em fita

Mergulho de flanco:

- 1° PASSE – forma de cavaco espiral
- 2°, 3°, 4° e 5° PASSES – Formas de cavaco em helicoidal longo

Mergulho alternado:

- 1° PASSE – forma de cavaco espiral
- 2° PASSE – Forma de cavaco em helicoidal curto
- 3° PASSE – Forma de cavaco em fita
- 4° PASSE – Forma de cavaco em helicoidal longo
- 5° PASSE – Forma de cavaco em fita

O método de mergulho radial apresenta, em quase todos os passes, cavaco em forma de fita, classificada como a pior forma de cavaco na usinagem de materiais dúcteis em torneamento comum, pois o mesmo poderá ter as seguintes implicações:

- insegurança ao operador;
- Possível dano a ferramenta e à peça;
- Dificuldade para o manuseio e armazenagem;
- Forças de corte elevadas, temperatura e vida da ferramenta baixa.

Logo o método de mergulho radial não é indicado, pois o cavaco poderá danificar o acabamento superficial da peça. O método de mergulho de flanco alternado produz em dois passes o cavaco em forma de fita, e isto poderá levar aos mesmos inconvenientes apresentados

durante a usinagem, e uma vida pequena da ferramenta, comparado o método de flanco, que gera cavaco helicoidal do segundo passe em diante.

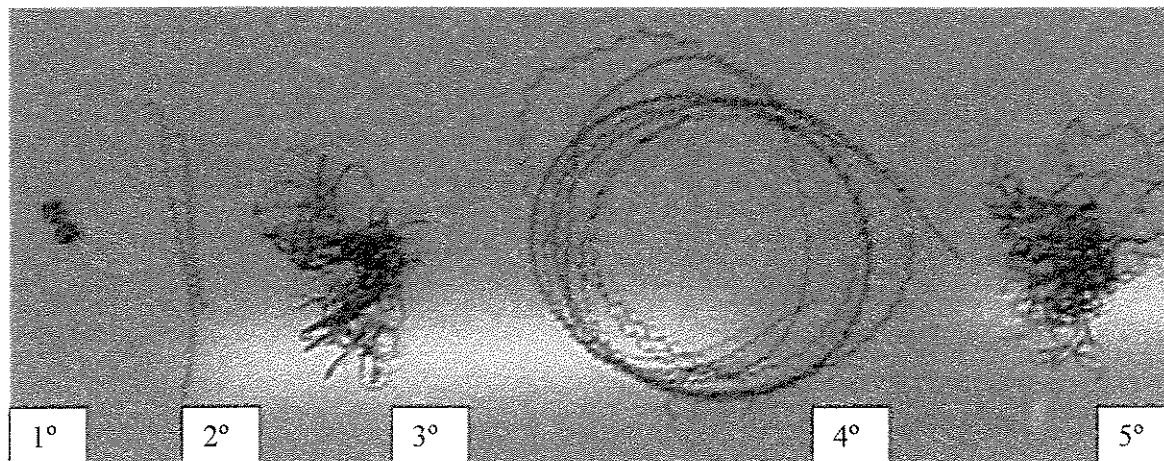


Figura 5.1 – Formas de cavacos

5.4 – Forças de corte nos métodos de CR

Como foi exposto no Capítulo 4, o conhecimento dos esforços de corte é importante para a usinagem dos metais. Portanto, o *Gráfico 5.2* apresenta os valores da força de corte, utilizando os valores de profundidades obtidos pelo modelo proposto. A obtenção dos esforços de corte foi feita através da utilização do dinamômetro (detalhes anexo XI) montado em um torno convencional, sendo que para cada método foram feitos 5 testes. Os valores dos esforços determinados entre as várias possibilidades foram utilizados comparativamente.

Os dados de corte (velocidade de corte, passo de rosca, etc.) estão na tabela abaixo, os dados do corpo de prova e da ferramenta de corte estão nos anexos IX e VII, respectivamente. No primeiro passe a maior profundidade utilizada foi igual a 0,35 mm (para raio de ponta da ferramenta = 0,2 mm) e 0,12 mm para o último passe. O número de passes foi igual a 5, com mais um repasse (sexto passe) de mesma coordenada do último.

TABELA 5.2 – Dados de usinagem

NÚMERO DE PASSES	05	PROFUNDIDADE EM
RAIO DA FERRAMENTA (mm)	0,2	CADA PASSE (h_i)
ALTURA DO FILETE (mm)	0,94	0,35
RPM	1180	0,20
VELOC. DE CORTE (m/min.)	107	0,15
DIAMETRO DA PEÇA (mm)	29	0,13
PASSO (mm)	1,5	0,11
FLUÍDO REGRIGERANTE	não	
TEMPO DE USINAGEM/PASSE (Seg.)	10	
DUREZA (HB)	200	
COMPRIMENTO DE USINAGEM DA ROSCA (mm)	180	

Na tabela 5.3 são apresentados, os valores de força de corte dos diferentes métodos, utilizando o modelo proposto, estiveram próximos para cada passe. As ferramentas utilizadas no experimento não sofreram quaisquer desgastes na aresta de corte devido aos esforços e as medidas do perfil de filete da rosca também ficaram dentro das tolerâncias com qualidade 6g (ver detalhes no anexo V), observou-se através de microscópio óptico um bom acabamento, sem imperfeições nos flancos do filete, na raiz do filete de rosca para cada método.

Para o método de mergulho de flanco, usou-se um ângulo de avanço (β) igual a 5° (Figura 5.3) e obteve-se uma redução dos esforços de corte, com valor máximo de 375 N, com relação ao método de mergulho radial (Figura 5.2), com valor máximo de 400 N, uma vez que no método de mergulho de flanco não ocorre o efeito do “encunhamento” da ferramenta. Também foi comprovado o desgaste assimétrico das arestas de corte da pastilha, pois praticamente apenas um dos flancos usina, e isso se deve a forma de cavaco helicoidal do segundo passe em diante, conforme exposto no item 5.3 deste capítulo.

Nos experimentos o método de flanco alternado solicitou mais a ferramenta com valor máximo de 425 N. Os altos valores de solicitação podem causar um aumento da temperatura de corte e até mesmo a quebra da ferramenta. Ao contrário da afirmação de TEETS [1990] este método não distribui os esforços de corte entre ambos flancos da ferramenta e também a vida útil da pastilha poderá ser reduzida, como mostra o gráfico 5.2. Na geração de cavacos, em dois passes (Figura 5.4) é em forma de fita, e este fato influi negativamente no fluxo do mesmo.

TABELA 5.3 – Forças de corte

N.º passes	Profundidade em cada passe(h_i) [mm]	Força de corte (N)		
		Radial	Flanco	Alternado
1	0,35	275	250	250
2	0,20	325	325	325
3	0,15	325	300	340
4	0,13	375	375	425
5	0,11	400	325	400
6	Passo em vazio	100	100	100

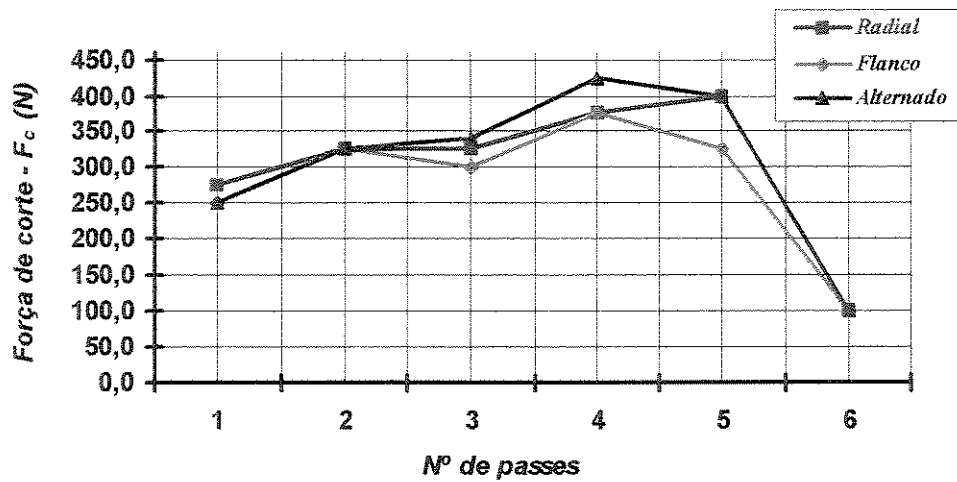


Gráfico 5.2 - força de corte por passe em cada método

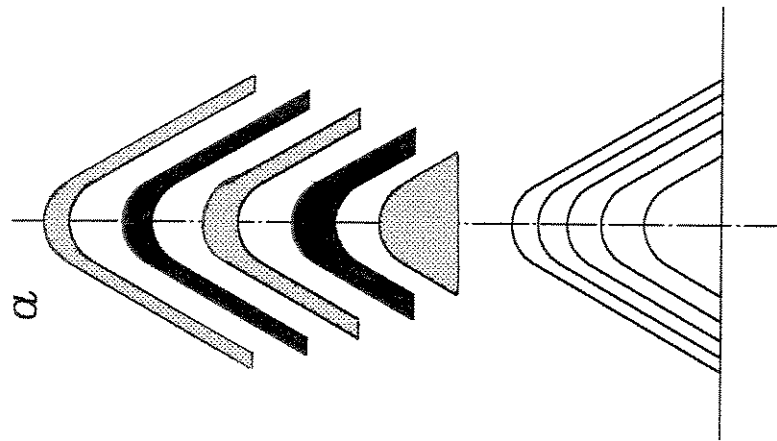


Figura 5.2 – Método de mergulho radial

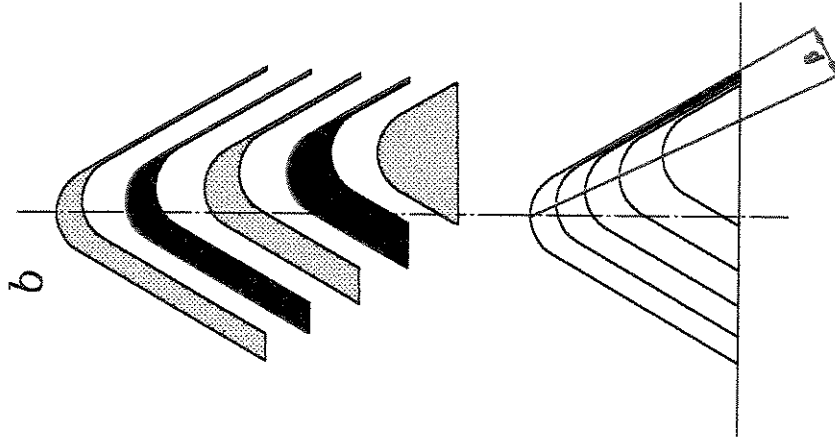


Figura 5.3 – Método de mergulho de flanco

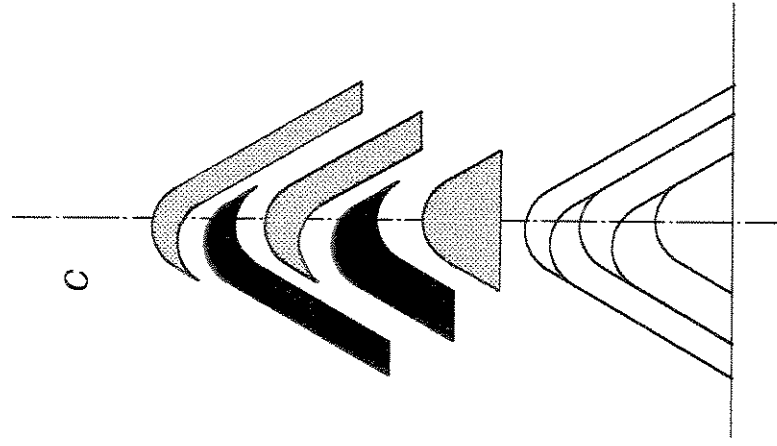


Figura 5.4 – Método de mergulho flanco alternado

5.5 – Vida da ferramenta em cada método

A determinação do tempo de vida da ferramenta nos três métodos foi verificado em termos do desgaste $V_B = 0,2$ mm (*Figura 5.5*) que é valor onde a ferramenta têm uma sobre vida sem que ocorra a quebra da pastilha ou até mesmo no comprometimento do produto acabado em termos de tolerâncias e rugosidades.

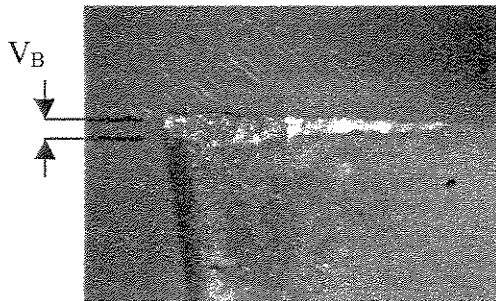


Figura 5.5 – Desgaste V_B [mm] [repetida da Figura 2.12]

As condições de intercambiabilidade e tolerâncias em roscas são obtidas através do controle de 5 (cinco) elementos durante a fabricação, quão sejam:

1. Diâmetros:
 - 1.1 diâmetro maior
 - 1.2 diâmetro menor;
2. Passo;
3. Ângulo de perfil ;
4. Raios (crista e raiz).

Para tanto o controle de tais medidas de tolerância no produto foram feitas através de observações em um microscópio óptico universal onde o produto tinha que manter uma qualidade de tolerância 6, posição “g” (ver detalhes no anexo V) para roscas de uso geral do tipo comercial [FERLINI, 1981].

Existe, no método radial, devido ao mergulho da ferramenta ser perpendicular em direção a peça–obra, uma aresta efetiva de corte maior gerando assim grande calor em todos os passes, e ainda o cavaco enrola–se no suporte e na peça sendo jogado na placa da máquina, prejudicando assim o corte e, conseqüentemente, o acabamento do produto. Tais inconvenientes permitiram apenas trabalhar um lote de 30 peças, com 180mm de comprimento livre de usinagem da rosca para cada peça.

Apesar dos esforços de corte não serem, na somatória, o maior (com relação aos outros métodos), o tempo de vida ficou em torno de 14min. Com estas informações e os dados da *TABELA 5.2* pode–se determinar, para o método radial, o percurso de corte^(*) (L_c) que é um dado que expressa a vida da ferramenta, logo temos: $L_c = 1495$ metros. Para os métodos de flanco e flanco alternado, para cada aresta de corte, utilizando–se um lote de 36 peças, e um percurso de corte: $L_c = 1816$ metros, foi obtido um tempo de vida da ferramenta (t) de 17^(**) min (este valor representa um corte otimizado, tanto dos parâmetros tecnológicos, quanto da produtividade). Concluí–se pelos resultados da soma A+B, *TABELA 5.4*, que não existe diferença efetiva no desgaste total utilizando um método ou outro, pois apesar do método de flanco alternado manter um bom fluxo de cavacos nos passes e alternância dos deslocamentos no eixo árvore da máquina, proporciona uma maior solitação da ferramenta e, conseqüentemente uma redução do tempo de vida da ferramenta. Por outro lado o método de flanco, em termos de programação é mais fácil, que o de flanco alternado, já que alguns fabricantes de máquinas à CNC possuem opção de inserir o ângulo de avanço (β) no programa, embora tais máquinas não disponham de modelos matemáticos, inseridos em seu software, que consideram o perfil da ferramenta.

^(*) O percurso de corte foi calculado pela fórmula: $L_c = \frac{V_c t}{1000}$, onde V_c é a velocidade de corte em [m/min.] e t é o tempo de vida da ferramenta em [min.] para o lote produzido com a mesma ferramenta.

^(**) Mantido critério de fim de vida da ferramenta com $V_B = 0,2$ mm.

TABELA 5.4 – Resultados de desgaste de flanco (V_B) para os métodos de flanco e flanco alternado, obtidos para um tempo de vida da ferramenta de 17 minutos.

Desgaste de flanco V_B [mm]					
Flanco			Flanco alternado		
Face A	Face B	Face A+B	Face A	Face B	Face A+B
0,1	0,27	0,37	0,23	0,14	0,37
0,11	0,19	0,30	0,2	0,15	0,35
0,1	0,31	0,41	0,21	0,17	0,38
0,13	0,19	0,32	0,23	0,14	0,37

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos

6.1 – Conclusões

1. O modelo proposto permite obter a profundidade de corte por passe " h_i " em função do passo da rosca, do número total de passadas e do raio da ferramenta de corte com a restrição de área de corte constante;
2. Os parâmetros geométricos podem ser otimizados quando da elaboração dos programas de usinagem de rosca em tornos à CNC;
3. O modelo matemático proposto permite o controle da força de corte e, conseqüentemente da pressão específica de corte.
4. Com relação aos parâmetros de entrada no ciclo automático dos tornos à CNC, de uma maneira geral não são considerados o conceito de áreas constantes de corte. Como o corte de rosca é operação de razoável demanda, em muitas empresas é interessante desenvolver-se subrotinas conforme modelo proposto, utilizando o ciclo de programação básico (linha a linha) (ver detalhes no Anexo I) para que se possa controlar os parâmetros geométricos.
5. O modelo proposto pode ser utilizado em pós-processadores de linguagens automáticas para CNC;
6. Os métodos de mergulho de flanco e flanco alternado proporcionam um melhor controle no fluxo do cavaco e ainda obtiveram valores de desgastes de flancos próximos, comparados

com o método de mergulho radial, embora o método de flanco alternado tenha somatória de esforços maior que o de flanco.

6.2 – SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Este estudo possibilita o desenvolvimento trabalhos futuros como por exemplo:

1. O desenvolvimento de modelos para os demais perfis (Whitworth, Round DIN 405, British Standard-BSPT, ACME e API);
2. O estudo desta estratégia nas operações de fresamento de engrenagens;
3. O estudo de viabilização do modelo em software de máquinas à CNC;
4. A análise dimensional de projeto e confecção de machos para corte de roscas [SKF , 1987];
5. O modelo proposto auxilia também no projeto de cames para torno automático conforme estudo de construção de perfis para cames feito por IVASHKEVICH [1985];
6. Construção de gráfico para número total de passes em função do passo da rosca, velocidade de corte, dureza do material, pois as tabelas encontradas nos manuais de fabricantes são limitadas. Como foi visto anteriormente, é importante considerar os parâmetros geométricos na programação da rotina de corte de roscas e dos métodos para conhecer e controlar os esforços de corte. Portanto, o modelo proposto possibilita, obter valores de profundidades de corte por passes sem variar a área de corte, e possibilitando, construir um gráfico em função do passo da rosca, da dureza do material e da velocidade de corte.

O número total de passes influencia cada valor de profundidade. Com isso pode-se verificar através de estudos os valores dos esforços de corte e, conseqüentemente, da pressão específica de corte. Como exemplo pode-se citar o estudo realizado por KÖNIG em

1973, que verificou a pressão específica de corte, variando a velocidade de corte, o material da peça, tratamento térmico e espessura de corte, em operações de torneamento.

Referências Bibliográficas

- ARSECULARATNE, J. A.; HINDUJA, S.; BARROW G. Optimum cutting conditions for turned components. Proceedings of the Mechanical Engineers, Part B. Journal of Engineering Manufacture, v. 206, n. B1, p 15-31, 1992.
- BOBROV, V.F.; SADOV, V.A. Selection of optimum cutting rates in multi-pass thread-turning. Soviet Engineering Research, Moscow, v. 3, n. 6 , p. 49-50, Jun. 1983.
- BOOTHROYD, G. Fundamentals of metal machining and machine tools. 8. ed., McGRAW-Hill, Washington., 1985. p.92-107
- BRONSHTEIN, G.V.; ESTERZON, M.A. Planning multi-pass thread-cutting cycles in NC lathes. Soviet Engineering Research, Moscow, v. 4, n. 6 , p. 61-63, Jun. 1984.
- DANAI, K.; NAIR, R.; MALKIN, S. An improved model for force transients in turning. Journal of Engineering for Industry, v. 114, n. 4, p.400-403, Nov. 1992.a
- DANAI, K.; NAIR, R.; MALKIN, S. Turning process identification through force transients. Journal of Engineering for Industry, v.114, n. 1, p. 01-07, Feb. 1992 b.
- DINIZ, A.E. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Editora mm, 1999. p. 63-78
- DMITRIEVA, T.P. et al. Algorithm for acceleration modes in thread-cutting operations in NC machines. Soviet Engineering Research , v.9,, n.5, p. 91-93, Jun .1989.

- DROZDA, T. J.; WICK, C. Tool and manufacturing engineers handbook. 4. ed., McGRAW-HILL, Michigan: 1983. p.12.1-12.142.
- DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. Automated monitoring of manufacturing processes, part 2: applications. Journal of Engineering for Industry, v.117, n. 4, p. 133-141, May. 1995.
- EDWARDS, C.H.; PENNEY, D.E. Equações diferenciais elementares. 3. ed., Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro: 1995. P. 01-44
- FERLINI, Paulo de Barros, Normas para desenho técnico mecânico. Porto Alegre: Editora Globo, 1981. p. 55-96
- FERRARESI, Dino, Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda, 1981.
- FREDERICKS, G. Threading algorithm suitable for computer numerically controlled turning centers. International Journal of Machine Tools Design & Research, Oxford, v. 18, n. 4, p. 29-31, 1978.
- IVASHKEVICH, O.P. Calculation of thread-cutting cam profiles. . Soviet Engineering Research , v.5,, n.10, p. 62-64, Oct.1985.
- KASAHARA, K.; SATO H.; TANI Y. Phase characteristics of self-excited chatter in cutting. Journal of Engineering for Industry, v.114, n. 4, p. 393-399, Nov. 1992.
- KOELSCH, James R.. Turning on threading & grooving. Manufacturing Engineering, v. 109, n. 1, p. 59-61, Jul. 1992.
- KONIG, W.; ESSEL, K. Spezifische Schitzkraftwerte fur Zerspanung Metallischer Werstoffe. Dusseldorf. Verlag Stahleisen, 1973.

- KRAMER, B. M., A comprehensive tool wear model. Annals of the CIRP, v.35, n.1, p. 69-70, 1986
- LAYDOWN threading system. Madison Hts: Valenite Inc., 1995. p.40
- MACHADO, A. O controle numérico aplicado às máquinas ferramentas. Ícone, São Paulo, 1986. p. 120-134.
- MANUAL de operação e programação.. São Paulo: Nardini, 1993. p.13-17 a 13-24
- MANUAL de programação. São Paulo: Indústrias Romi S/A, 1986. p.22-30
- MANUAL de providências iniciais. São Paulo: Indústrias Romi S/A, 1996. p.1.1-2.50
- MARKEVICH, Yu. B.; UZHEIKO, V.I.; CHETVERIKOVA, I.A. Use of cutting tools equipped with inserts made of composites to restore cylindrical thread rolling dies. Soviet Engineering Research, v. 10, n.10, p. 106-109, 1990.
- MODERN metal cutting. Sandviken: Sandvik Coromant, 1994. p.IX2-IX53
- MOTTA, M.F.; MACHADO, A.R. Fluidos de corte: Tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção. Máquinas e Metais, São Paulo, p. 44-56, Set. 1995.
- NOVASKI, Olivio. Uma contribuição ao estudo das condições econômicas de usinagem. Campinas: FEM, UNICAMP, 1983. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1983. p.103
- PIGARI, Almir Cezer. Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica. Campinas: FEM, UNICAMP, 1995. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995. p 85-87.

- RADCHENKO, S.G.; KARPVICH, L.G. Analysis of the point diagram of a quality index of a technological process. Soviet Engineering Research, Moscow, v. 9, n.10, p. 66-67, fev.1989.
- SANDVIK CoroGuide Versão 97.1. São Paulo: Sandvik Coromant, 1997.
- SANDVIK. São Paulo: Sandvik Coromant, 1998. p.C1-C53
- SCHAEDLICH, Siegfried. Precision tools and precision inspection equipment for screw thread manufacture. Wire, v.42, n. 1, p. 166-169, Feb. 1992.
- SHAW, Milton C. Metal cutting principles. Cambridge:3.ed., 1968.p. 3.1-3.17
- SIMON, Wilhelm. The numerical control of machine tools. London:1^a.ed., 1973.p. 318-321
- SKF, ferramentas- manual técnico. São Paulo: SKF Ferramentas S/A, 1987. p. 171 a 169
- STIGH, Ulf. Finite element study of threading dislocations. Mechanics of Materials, v. 14, n.3, p. 179-187, Jan. 1993.
- TEETS, Bradley R. Single-point threading with today's tooling options. Modern Machine Shop, v.62, n. 8, p. 62-72, Jan. 1990.
- TELLES, Geraldo Nonato. S.P.A.T.: sistemas de programação automática em tornos. Campinas: FEM, UNICAMP,1990. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1990. p 82-92.
- THAKAR, Girish.; SHANKER, Kripa.; JAIN V.K. An integrated process planning and NC part programming system for rotacional components. Computers in Industry, v. 21, n.3, p. 341-357, Apr. 1993.

THREADING. Werkzeugem-Hartstoffe: Kennametal Hertel, 1996. p.64

TRENT, E.M. Metal cutting. Butterworths, London, 1977. p.31-48

WEE, E.H.T.; NEE, A.Y.C.; GOH, T.N. Off-line adaptive optimization of CNC lathe turning. International Journal of Production Research. V.28, n.12, p.2157-2170, 1990.

WASCHKIES, E.; SKLARCZYK, C.; HEPP, K. Tool wear monitoring at turning. Journal of Engineering for Industry, v.116, n. 4, p. 521-524, Nov. 1994.

YAGISHITA, H.; SAKAI, Y. On synchronous motion accuracy and torsional rigidity in a threading machine. Annals of the CIRP, v. 37, n. 1, p. 361, 1988.

Anexo I

Programação em código “G” ciclo básico(linha a linha) Torno ECN-40-II-Romi

Exemplo de programação em código “G” utilizada nos experimentos

N10;TESTE-ROSQUEAMENTO-Avanço radial-20#
N20G99#
N30GX-254.52Z-378.#
N40G92X495.48Z727.#
N50G54#
N60T0101;(DESBASTE)#
N70GX300.Z350.#
N80M6#
N90S44M3;(600RPM)#
N100G4D4#
N110S48;(850RPM)#
N120GX33.5Z420.#
N130G1Z15.5F.3#
N140GX300.Z350.#
N150T0202M6;(ACABAMENTO)#
N160S88;(1700RPM NA TABELA, 1684 REAL)#
N170GX33.Z420.#
N180G1Z15.5F.15#
N190GX300.Z350.#
N200S84;(1180RPM NA TABELA, 1185 REAL)#
N210T1313M6;(ROSQUEAMENTO)#
N220GX32.2071Z420.:(1§ PASSADA-PROF. 0,793MM NO DIAMETRO)#
N230G33Z15.5K2.#
N240GX38.#
N250Z420.#
N260X31.7733.:(2§ PASSADA-PROF. 0,4338MM NO DIAMETRO)#
N270G33Z15.5K2.#
N280GX38.#

N290Z420.#
N300X31.4330;(3§ PASSADA-PROF. 0,3404MM NO DIAMETRO)#
N310G33Z15.5K2.#
N320GX38.#
N330Z420.#
N340X31.1434;(4§ PASSADA-PROF. 0,2896MM NO DIAMETRO)#
N350G33Z15.5K2.#
N360GX38.#
N370Z420.#
N380X30.8869;(5§ PASSADA-PROF. 0,2564MM NO DIAMETRO)#
N390G33Z15.5K2.#
N400GX38.#
N410Z420.#
N420X30.6544;(6§ PASSADA-PROF. 0,2326MM NO DIAMETRO)#
N430G33Z15.5K2.#
N440GX38.#
N450Z420.#
N460X30.4400;(7§ PASSADA-PROF. 0,2144MM NO DIAMETRO)#
N470G33Z15.5K2.#
N480GX38.#
N890Z420.#
N900X200.Z350.#
N910M2#

Anexo II

Ciclo automático (G37) - Torno ECN-40-II-Romi

-Ciclo automático (G37)

Cálculo da Profundidade para a primeira passada ($h_{inicial}$)

$$h_{inicial} = \frac{h_{total}}{\sqrt{N}}$$

$$h_{total} = \text{Altura do filete no } \emptyset \quad h_{total} = 1,28 \times 2 = 2,56 \text{ mm}$$

1-Exemplo : Para N.º de passes = 11 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,77$, mas a máquina realiza efetivamente 5 passes, mesmo especificando-se o último passe em 0,02mm.

2-Exemplo : Para N.º de passes = 8 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,905$, mas a máquina realiza efetivamente 4 passes.

3-Exemplo : Para N.º de passes = 15 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,66$, mas a máquina realiza efetivamente 6 passes.

4-Exemplo: Para N.º de passes = 32 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,452$, mas a máquina realiza efetivamente 11 passes.

5-Exemplo : Usando $h_{inicial} = 1,28$ mm (no raio), temos:

Para N.º de passes = 11 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,385$, mas a máquina realiza efetivamente 15 passes.

Análise das alturas (h_i) para G37

Do 4º-Exemplo, temos : Para N.º de passes = 32 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,452$, mas a máquina realiza efetivamente 11 passes.

$$1^\circ \text{ passe } \Rightarrow \emptyset 31,000 \text{ mm} - \emptyset 29,5480 \text{ mm} = 1,4520 \text{ mm}, h_i = 1,4520 \div 2 = 0,726 \text{ mm.}$$

$$2^\circ \text{ passe } \Rightarrow \emptyset 29,5480 \text{ mm} - \emptyset 29,3608 \text{ mm} = 0,1872 \text{ mm}, h_i = 0,1872 \div 2 = 0,0936 \text{ mm.}$$

$$3^\circ \text{ passe } \Rightarrow \emptyset 29,3608 \text{ mm} - \emptyset 29,2174 \text{ mm} = 0,1434 \text{ mm}, h_i = 0,1434 \div 2 = 0,0717 \text{ mm.}$$

- 4° passe $\Rightarrow \varnothing 29,2174 \text{ mm} - \varnothing 29,0960 \text{ mm} = 0,1214 \text{ mm}$, $h_i = 0,1214 \div 2 = 0,0607 \text{ mm}$.
- 5° passe $\Rightarrow \varnothing 29,0960 \text{ mm} - \varnothing 28,9893 \text{ mm} = 0,1067 \text{ mm}$, $h_i = 0,1067 \div 2 = 0,0533 \text{ mm}$.
- 6° passe $\Rightarrow \varnothing 28,9893 \text{ mm} - \varnothing 28,8928 \text{ mm} = 0,0965 \text{ mm}$, $h_i = 0,0965 \div 2 = 0,0482 \text{ mm}$.
- 7° passe $\Rightarrow \varnothing 28,8928 \text{ mm} - \varnothing 28,8041 \text{ mm} = 0,0887 \text{ mm}$, $h_i = 0,0887 \div 2 = 0,0443 \text{ mm}$.
- 8° passe $\Rightarrow \varnothing 28,8041 \text{ mm} - \varnothing 28,7216 \text{ mm} = 0,0825 \text{ mm}$, $h_i = 0,0825 \div 2 = 0,0412 \text{ mm}$.
- 9° passe $\Rightarrow \varnothing 28,7216 \text{ mm} - \varnothing 28,6440 \text{ mm} = 0,0776 \text{ mm}$, $h_i = 0,0776 \div 2 = 0,0388 \text{ mm}$.
- 10° passe $\Rightarrow \varnothing 28,6440 \text{ mm} - \varnothing 28,6000 \text{ mm} = 0,0440 \text{ mm}$, $h_i = 0,0440 \div 2 = 0,0220 \text{ mm}$.
- 11° passe $\Rightarrow \varnothing 28,6000 \text{ mm} - \varnothing 28,4400 \text{ mm} = 0,1600 \text{ mm}$, $h_i = 0,1600 \div 2 = 0,0800 \text{ mm}$.

Do 5°-Exemplo, usando $i_{inicial} = 1,28 \text{ mm}$ (no raio), temos:

Para N.º de passes = 11 $\Rightarrow h_{inicial} = 0,385$, mas a máquina realiza efetivamente 15 passes.

- 1° passe $\Rightarrow \varnothing 31,000 \text{ mm} - \varnothing 29,6150 \text{ mm} = 1,3850 \text{ mm}$, $h_i = 1,3850 \div 2 = 0,6925 \text{ mm}$.
- 2° passe $\Rightarrow \varnothing 29,6150 \text{ mm} - \varnothing 29,4555 \text{ mm} = 0,1595 \text{ mm}$, $h_i = 0,1595 \div 2 = 0,07975 \text{ mm}$.
- 3° passe $\Rightarrow \varnothing 29,4555 \text{ mm} - \varnothing 29,3332 \text{ mm} = 0,1223 \text{ mm}$, $h_i = 0,1223 \div 2 = 0,06115 \text{ mm}$.
- 4° passe $\Rightarrow \varnothing 29,3332 \text{ mm} - \varnothing 29,2300 \text{ mm} = 0,1032 \text{ mm}$, $h_i = 0,1032 \div 2 = 0,0516 \text{ mm}$.

Com os resultados acima podemos verificar que o ciclo automático do software não segue o número de passes especificado pelo programador. Verificamos, ainda, que, se aplicarmos os valores que resultam da máquina, sobretudo no 1° passe, a ferramenta poderá quebrar.

Anexo III

Ciclo automático - Torno MULTIPLIC 30-Romi

Forma de programação

Exemplo 1:

- h_f (altura do filete) = 1,28 mm
- h_p (profundidade por passe no diâmetro) = 0,2 mm
- P (passo) = 2 mm
- X (valor do eixo dos diâmetros) = 40 mm (para efeito de cálculo)
- Z (valor do eixo árvore da máquina) = 50 mm (para efeito de cálculo)
- N (n.º de passes) = 7 passes

O software da máquina apresenta os seguintes resultados:

$$1^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 40,00 \text{ mm} - \varnothing 39,80 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$2^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,80 \text{ mm} - \varnothing 39,60 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$3^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,60 \text{ mm} - \varnothing 39,40 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$4^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,40 \text{ mm} - \varnothing 39,20 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$5^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,20 \text{ mm} - \varnothing 39,00 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$6^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,00 \text{ mm} - \varnothing 38,80 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}, h_i = 0,20 \div 2 = 0,10 \text{ mm.}$$

$$7^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 38,80 \text{ mm} - \varnothing 38,720 \text{ mm} = 0,08 \text{ mm}, h_i = 0,08 \div 2 = 0,04 \text{ mm.}$$

Exemplo 2 :

- h_f (altura do filete) = 1,28 mm
- h_p (profundidade por passe no diâmetro) = 0,128 mm
- P (passo) = 2 mm

- X (valor do eixo dos diâmetros) = 40 mm (para efeito de cálculo)
- Z (valor do eixo árvore da máquina) = 50 mm (para efeito de cálculo)
- N (n.º de passes) = 10 passes

O software da máquina apresenta o seguinte resultado:

$$1^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 40,00 \text{ mm} - \varnothing 39,872 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$2^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,872 \text{ mm} - \varnothing 39,744 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$3^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,744 \text{ mm} - \varnothing 39,616 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$4^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,616 \text{ mm} - \varnothing 39,488 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$5^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,488 \text{ mm} - \varnothing 39,36 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$6^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,36 \text{ mm} - \varnothing 39,232 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$7^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,232 \text{ mm} - \varnothing 39,104 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$8^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 39,104 \text{ mm} - \varnothing 38,976 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$9^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 38,976 \text{ mm} - \varnothing 38,848 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

$$10^\circ \text{ passe} \Rightarrow \varnothing 38,848 \text{ mm} - \varnothing 38,720 \text{ mm} = 0,128 \text{ mm}, h_i = 0,128 \div 2 = 0,064 \text{ mm.}$$

Com esta forma de programação verifica-se que o ciclo automático da máquina deduz as profundidades com valores constantes.

Anexo IV

Ciclo automático - Torno ECO CNC-Nardini

Os termos incrementais da progressão aritmética são:

$$h_0 = k$$

$$h_1 = k - c$$

$$h_2 = k - 2 \times c$$

•

•

•

$$h_i = k - i \times c$$

$$k = 2 \times \frac{(h_{total} - h_{acabamento})}{(N + 1)}$$

$$c = \frac{k}{N}$$

Onde:

$$K = 2 * (\text{PROF INC} - \text{ACABAMEN}) / (\text{N PASSAD} + 1)$$

$$c = k / \text{N PASSAD}$$

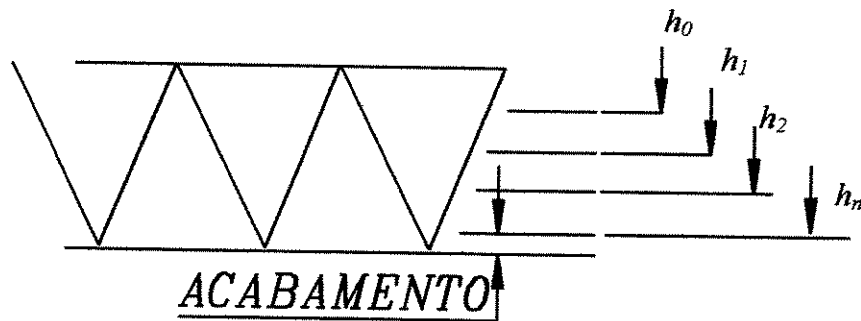


FIGURA IV.1 – Profundidade por passe

PROF INC

Este parâmetro deve ser programado como valor incremental, ele é a profundidade total da rosca, e este valor pode ser positivo ou negativo, dependendo do tipo de rosca (interna ou externa).

ACABAMEN

Se desejado, programa-se neste parâmetro um valor para acabamento, que corresponde à última passada de rosca com incremento para corte de material.

Caso seja diferente de 0, este valor é subtraído da profundidade incremental da rosca, após as passadas de desbaste é realizado uma passada de acabamento. O valor programado deve ser sempre positivo.

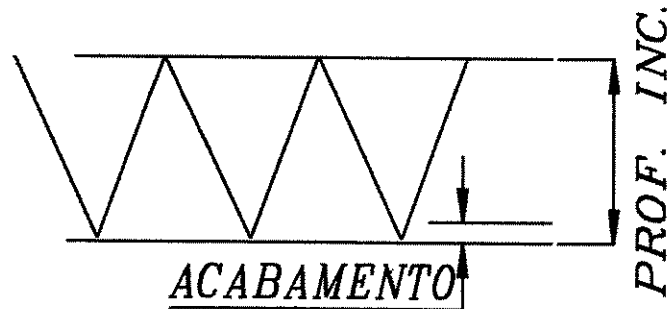


FIGURA IV.2 – Profundidade de acabamento

N PASSAD

Determina o número de passadas de desbaste que deve ser executado. O valor programado não inclui a passada de acabamento caso o parâmetro ACABAMEN esteja programado diferente de 0.

Anexo V

Controle de medidas na peça

A verificação das medidas nas peças foram feitas de acordo com a norma NB-97- Tolerâncias em rosca métrica ISO, descrita abaixo.

CLASSE DE TOLERÂNCIAS RECOMENDADAS

Para reduzir a quantidade de calibradores e de ferramentas, as tolerâncias de rosca externa devem ser escolhidas de preferência pela tabela abaixo

TABELA V.1 – Classes de tolerância recomendadas para rosca externa

Série de tolerância	Posição de tolerância <i>e</i>			Posição de tolerância <i>g</i>			Posição de tolerância <i>h</i>		
	S	N	L	S	N	L	S	N	L
Fina							3 <i>h</i> 4 <i>h</i>	(4 <i>h</i>)	5 <i>h</i> 4 <i>h</i>
Média		6 <i>e</i> *	(7 <i>e</i> 6 <i>e</i>)	5 <i>g</i> 6 <i>g</i>	6 <i>g</i> *	7 <i>g</i> 6 <i>g</i>	5 <i>h</i> 6 <i>h</i>	(6 <i>h</i>)	7 <i>h</i> 6 <i>h</i>
Grossa					(8 <i>g</i>)	9 <i>g</i> 8 <i>g</i>			

As classes de tolerâncias indicadas por “*” devem ter preferência de escolha, as indicadas por () devem ser escolhidas em segundo lugar e as sem indicação devem ser evitadas

Na tabela acima temos a série de tolerâncias:

- Fina: Para roscas de precisão, quando uma pequena variação do ajuste é necessária;
- Média: De uso geral para parafusos e porcas do tipo comercial;
- Grossa: Somente no caso em que não há exigência de maior precisão

Posição para roscas externas:

- *b, c, e, g* ⇒ com afastamento de referência negativa
- *h* ⇒ com afastamento de referência zero

Qualidade de tolerância:

- Menor que 6 \Rightarrow Série de tolerância fino e contato curto (S);
- Igual a 6 \Rightarrow Série de tolerância média e contato normal (N);
- Maior que 6 \Rightarrow Série de tolerância grossa e contato longo (L);

O comprimento de contato entre os filetes de duas roscas acopladas é a distância, medida paralelamente ao eixo, comuns às duas roscas, compreendida por dois pontos extremos que delimitam, no acoplamento, os flancos simultaneamente em contato.

A classificação nos três grupos (S, N e L) é determinado em tabela em função do diâmetro maior básico e passo, que para este trabalho o $d = 22,5$ mm até 45 mm e passo = 2 mm, temos:

TABELA V.2 – Comprimento de contato

Comprimento de contato			
S	N		L
Até (inclusive)	De (exclusive)	Até (inclusive)	Acima de (exclusive)
8,5	8,5	25	25

CÁLCULO DOS DIÂMETROS PARA CONTROLE

Os valores dos diâmetros calculados, através da norma, serão utilizados como parâmetros de controle das peças e seguem a qualidade de tolerância 6 , posição “g” e série fina.

CÁLCULO DO DIÂMETRO EXTERNO (d)

Para a peça temos:

$$d = 33 \text{ mm (diâmetro externo nominal)}$$

$$a_i = a_s + t$$

$$a_s = -38\mu\text{m, para passo} = 2 \text{ mm e posição "g"}$$

$$t_d = 280\mu\text{m, para passo} = 2 \text{ mm e qualidade de tolerância 6}$$

$$\therefore a_i = -38 + 280 \Rightarrow a_i = 242\mu\text{m}$$

$$d_{max.} = d + a_i = 33,242\text{mm}$$

$$d_{min.} = d + a_s = 32,962\text{mm}$$

CÁLCULO DO DIÂMETRO EFETIVO (d_2)

$$d'_2 = d_{max.} - 0,64957p = 31,9428\text{mm}$$

$$d''_2 = d_{min.} - 0,64957p = 31,66286\text{mm}$$

$$a_i = a_s + t$$

$$a_s = -38\mu\text{m, para passo} = 2 \text{ mm e posição "g"}$$

$$td_2 = 170\mu\text{m, para passo} = 2 \text{ mm, qualidade de tolerância 6 e diâmetro até 45mm}$$

$$\therefore a_i = -38 + 170 \Rightarrow a_i = 132\mu\text{m}$$

$$d_{2max.} = d'_2 + a_i = 32,0748\text{mm}$$

$$d_{2min.} = d''_2 + a_s = 31,6248\text{mm}$$

CÁLCULO DO DIÂMETRO MENOR (d_3)

$$d'_3 = d_{max.} - 1,22687p = 30,788\text{mm}$$

$$d''_3 = d_{min.} - 1,22687p = 30,508\text{mm}$$

$$a_i = a_s + t$$

$$a_s = -38\mu\text{m}, \text{ para passo} = 2 \text{ mm e posição "g"}$$

$$td_3 = td_2 + 72p = 314\mu\text{m}$$

$$\therefore a_i = -38 + 314 \Rightarrow a_i = 276\mu\text{m}$$

$$d_{3max.} = d'_3 + a_i = 31,064\text{mm}$$

$$d_{3min.} = d'_3 + a_s = 30,47\text{mm}$$

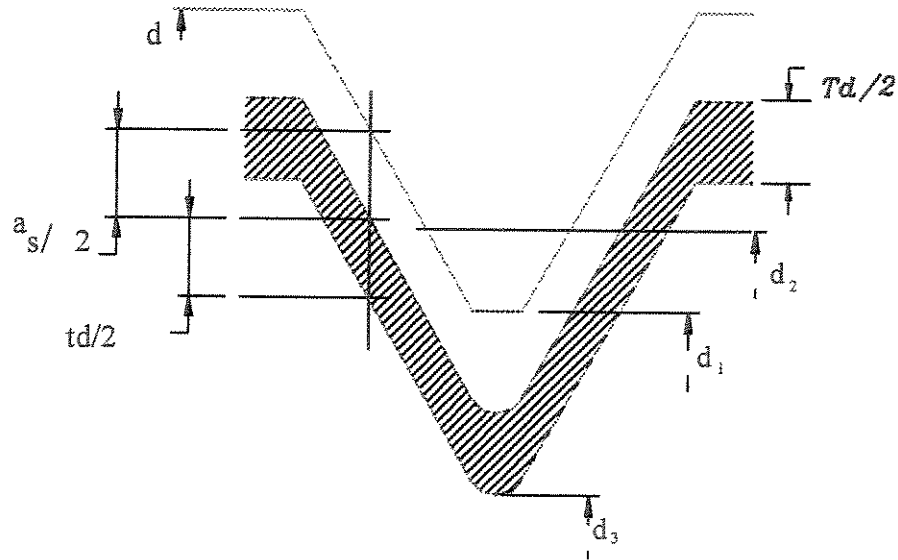


FIGURA V.1 – Medidas para controle

Anexo VI

Folha de análise experimental

Folha de análise experimental

DATA / /99

3.1 Dados $\theta = 30^\circ$ e $R = 0.20$ mm
 $h = 1.28$ mm

N = _____ (Passadas)
 Fluido de corte : sim / não

MODELO : PROPOSTO

TABELA 09 –Folha de análise experimental

RPM				
Vc(m/min.)				
Ø(mm)				
DUREZA (HB)				
T.USIN./PASSE (Seg.)				
CORPO				
FACE				
		RADIAL	FLANCO	INCREMENTAL
Passada	hi = xi	Δxi	$Z = (h - hi) \cdot \text{tg}(90^\circ - \alpha)^*$	Área / passada(Ai) mm ²
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

* FLANCO - $\text{tg}(90^\circ - \alpha)$, onde $\alpha = \beta + 60^\circ$, para $\beta = 5^\circ$, temos : $\text{tg}25^\circ$

OBS.:

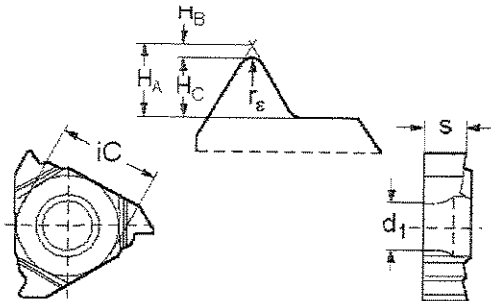
Anexo VII

Dados da pastilha e do suporte

DADOS DA FERRAMENTA E DO SUPORTE

(FABRICANTE: SANDVIK)

-Código da pastilha: R166.OG-16VM01-002



Onde:

Dimensões: $H_A = 2,64 \text{ mm}$, $H_B = 0,20 \text{ mm}$,
 $H_C = H_A + H_B = 2,64 \text{ mm} + 0,20 \text{ mm} = 2,84 \text{ mm}$
 $r_\epsilon = 0,20 \text{ mm}$
 $iC = 9,525 \text{ mm}$
 $d_1 = 4,4 \text{ mm}$
 $s = 3,97 \text{ mm}$

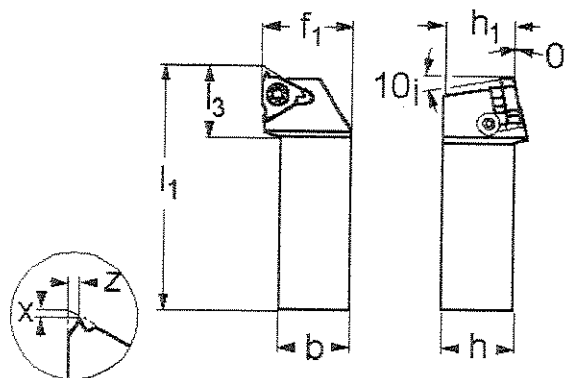
-Classe: 1020 (COBERTURA DE NITRETO DE TITÂNIO) VIA PVD (DEPOSIÇÃO FISÍCA DE VAPOR)

-Indicada para aços → AISI/ SAE – 1045

→ DUREZA BRINELL (HB) = 150HB

→ VELOC. DE CORTE = 155 M/MIN.

-Código do Suporte: R166.4FG-2525-16



Onde :

Dimensões: $h = 25 \text{ mm}$, $h_1 = 25 \text{ mm}$, $b = 25 \text{ mm}$,
 $L_1 = 150 \text{ mm}$, $L_3 = 22,2 \text{ mm}$ e $f_1 = 32 \text{ mm}$

Anexo VIII

Dados do fluído de corte

DADOS DO FLUIDO DE CORTE:

(FABRICANTE: BARDAHL)

Código do fluido de corte: MAXLUB RECUT 2

Características:

É um fluido de corte sintético solúvel em água;

Aplicável aos processos de usinagem em geral(torneamento, fresagem, escariamento, serragem e retífica);

Possui características de extrema pressão, que proporcionam maior durabilidade da ferramenta com altas velocidades de corte e avanços, além de um ótimo acabamento de superfície

Modo de usar:

Utilizar na proporção de 3% a 6% em água, conforme a dureza do metal.

Características típicas:

TABELA VIII.1 – Características do fluido de corte

Cor(visual)	Âmbar
Densidade 20/4°C	1,0249
Índice de refração	1,374
Índice de refração(3% em água)	1,3347
Índice de refração(6% em água)	1,3354
pH	9,3
Espuma	0/0

Anexo IX

Dados da matéria prima e dos ensaios de dureza

- DADOS DA MATÉRIA PRIMA

(FABRICANTE: BARDELLA)

- Matéria Prima: AÇO CARBONO TREFILADO 1045, conforme norma EB-1512

- DADOS DO ENSAIO DE DUREZA DA MATÉRIA PRIMA:

(LABORATÓRIO DE ENSAIOS- UNICAMP)

- Máquina: Pantec-RBS
- Ensaio pelo sistema Rockwell (DIN 50.103)
- Dados para o ensaio:

TABELA IX.1 – Escala de dureza

Escala Rockwell	Penetrador	Carga	Leitura	Faixa de dureza aproximada(HV/HB)	Pré-carga
HRB	Cone Ø 1/16"	100Kp	interna	53 - 230	10Kgf

Anexo X

Dados técnicos da máquina utilizada nos ensaios

-DADOS TÉCNICOS DA MÁQUINA UTILIZADA NOS ENSAIOS

(FABRICANTE: ROMI)

Torno à comando numérico Romi – Modelo ECN 40 II

- O torno ECN-40-II incorpora o Comando Numérico Computadorizado (CNC) Romi MACH-3L;
- Os movimentos longitudinais e transversais são proporcionados por dois servo-motores especiais com velocidades constantes, acoplados aos fusos de esferas recirculantes(ball-screw) através de correias dentadas;
- A parte elétrica-eletrônica está contida em um armário metálico na parte posterior do torno;
- O painel de comando está fixo na parte dianteira do torno;
- A torre elétrica automática permite a utilização de 8 ferramentas

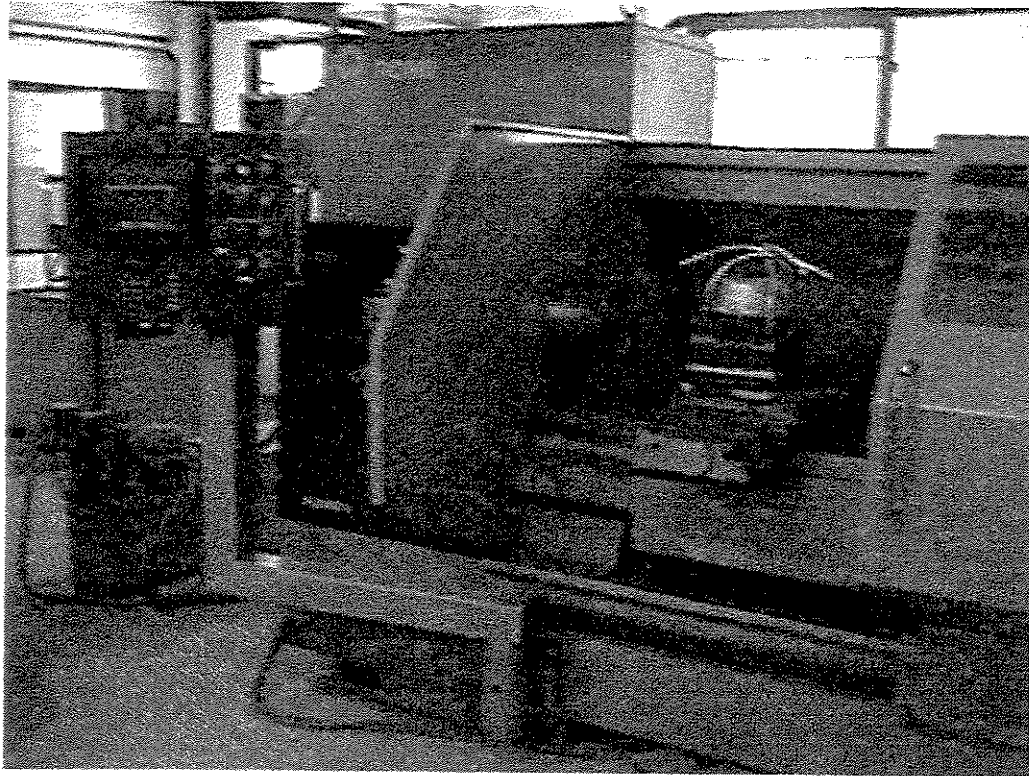


FIGURA IX.1 –Torno CNC Romi – modelo ECN 40-II

Anexo XI

Dados técnicos do dinamômetro com coluna pneumática

-DADOS TÉCNICOS DO DINAMÔMETRO

(FABRICANTE: MECALIX)

O dinamômetro permite obter valores da força de corte e de avanço pela deformação de mola.

A fixação do dinamômetro é feita no porta ferramenta do torno.

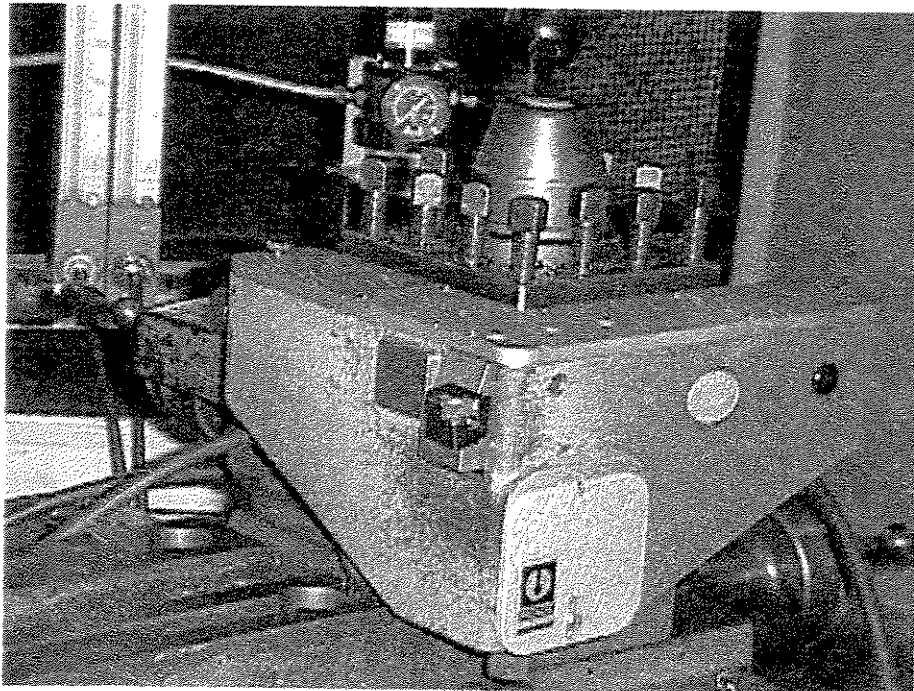


FIGURA X.1–Dinamômetro pneumático

-DADOS TÉCNICOS DA COLUNA PNEUMÁTICA

(FABRICANTE: SOLEX)

Na coluna pneumática da força de avanço a leitura tem divisões de 20 N em 20 N até um valor máximo de 1500 N.

Na coluna pneumática da força de corte a leitura tem divisões de 100 N em 100 N até um valor máximo de 3500 N.

O valor da pressão de trabalho no regulador de pressão deve estar em torno de 1 bar(valor de calibragem).

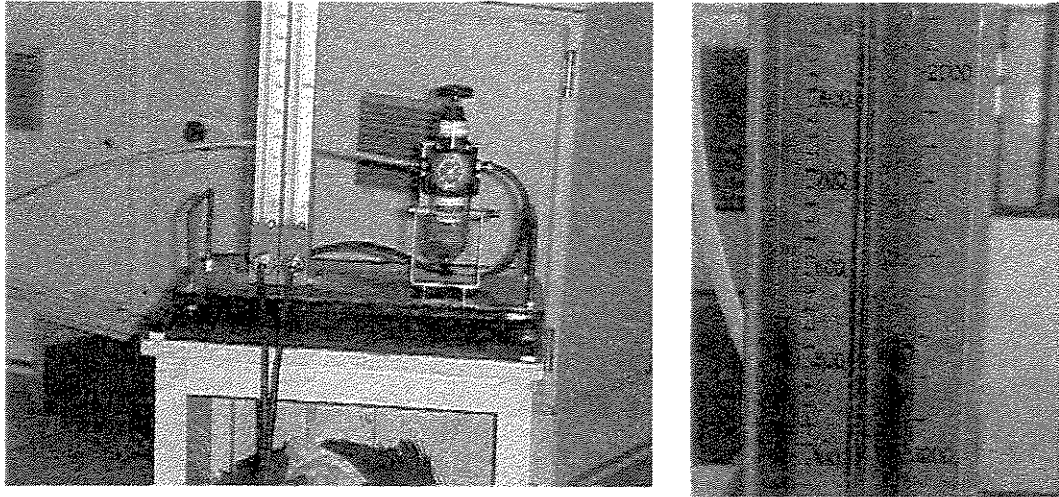


FIGURA X.2 – Coluna pneumática