

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OTIMIZADAS DE USINAGEM
COM APLICAÇÃO EM TORNEAMENTO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROBERTO SILVIO UBERTINO ROSSO JUNIOR

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1995.

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OTIMIZADAS DE USINAGEM
COM APLICAÇÃO EM TORNEAMENTO**

ROBERTO SILVIO UBERTINO ROSSO JUNIOR

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE**

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESPECIALIDADE : ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.

Orientador



Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng. Mec.

Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.

Presidente



Prof. Aureo Campos Ferreira, Ph. D.



Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.

À minha esposa Márcia pelo seu
amor e dedicação.

**À minha família pelo
apoio e incentivo.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Abelardo Alves de Queiroz, pela orientação prestada na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Arno Blass pelo apoio e confiança.

Aos Professores Vera e Hippolyto do Valle Pereira pela amizade e incentivo nas horas difíceis.

Ao Prof. Áureo pela confiança e por ter sempre uma palavra de estímulo.

Ao Prof. Lourival pelas sugestões ao texto final.

Ao Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco pela liberação concedida para realização deste trabalho.

A Escola Técnica Tupy, seus professores, funcionários e alunos pelo apoio na realização da parte experimental deste trabalho.

A WEG Motores e ao Eng. Moacir Sens, pela gentileza de abrir suas portas à esta pesquisa.

A THIJAN representante dos produtos SANDVIK-Coromant em Joinville-SC, pela doação das ferramentas para a parte experimental deste trabalho.

Ao Analista de Sistemas Jairo Gubler, pela amizade e apoio no desenvolvimento dos programas utilizados.

Ao amigo José Aldo da Silva Lima pela amizade e incentivo.

A todos os amigos que conheci durante o curso, em especial aos colegas do GRUCON.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Caracterização da operação de torneamento	4
2.2 Força de corte no processo de torneamento	5
2.2.1 Pressão específica de corte	6
2.3 Geometria da ferramenta monocortante	9
2.4 Critério de fim de vida e desgaste da ferramenta	10
2.5 Equação de vida do gume da ferramenta	12
2.6 Otimização dos parâmetros de usinagem	13
2.6.1 Histórico	13
2.6.2 Modelos de otimização dos parâmetros de usinagem	14
2.6.3 Critério de otimização para a máxima taxa de produção ou de mínimo tempo	16
2.6.4 Critério de otimização para mínimo custo de produção	21
2.6.5 O intervalo de máxima eficiência	26
CAPÍTULO 3 : METODOLOGIA DE ENSAIOS DE USINAGEM PARA OBTENÇÃO DOS DADOS TECNOLÓGICOS DO SISTEMA	28
3.1 Corpo de prova	29

3.2 Ferramenta	31
3.3 Máquina ferramenta	32
3.4 Condições de usinagem	33
3.5 Desgaste de ferramenta	35
3.6 Fluido de corte	37
3.7 Procedimento de ensaio	37
3.8 Análise e processamento dos resultados	37

CAPÍTULO 4 : CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E PROCEDIMENTO

EXPERIMENTAL	39
4.1 Caracterização do material a ser utilizado	39
4.1.1 Análise química	40
4.1.2 Análise metalográfica	40
4.1.3 Ensaio mecânicos	43
4.1.3.1 Ensaio de dureza	43
4.1.3.2 Ensaio de tração	46
4.2 Características dos equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem e nas calibrações dos acionamentos do torno	47
4.3 Calibração dos sistemas de acionamento do torno Tormax 30	49
4.3.1 Calibração do acionamento do eixo árvore	49
4.3.2 Calibração do sistema de avanços	50
4.3.3 Calibração do sistema de acionamento da profundidade do corte.....	52
4.4 Condições de usinagem	53
4.5 Procedimento de ensaio de vida do gume	55
4.6 Determinação dos parâmetros da equação de Kienzle	57
4.7 Resultados do ensaio de vida da ferramenta	57
4.7.1 Análise e tratamento inicial dos dados obtidos	57

4.7.2 Cálculo dos expoentes e da constante da equação expandida de Taylor	66
------------------------------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 5 : RESTRIÇÕES TECNOLÓGICAS DOS PARÂMETROS DE USINAGEM	68
5.1 Restrições para a velocidade de corte	68
5.1.1 Máxima velocidade de corte recomendada para o par material da peça/ferramenta	69
5.1.2 Restrição de máxima e mínima rotação disponível no torno	69
5.1.3 Restrições impostas pelo escalonamento do torno	70
5.2 Restrição de máxima profundidade de corte	71
5.3 Restrições para o avanço	71
5.3.1 Avanço máximo em função da geometria da ferramenta e do raio de quina	71
5.3.2 Avanço para a máxima força de corte admissível para a forma do inserto	73
5.3.3 Restrição do avanço pela máxima potência útil da máquina	74
5.3.4 Restrição do avanço para o acabamento superficial	76
5.4 Índice de esbeltez como restrição de usinagem	77

CAPÍTULO 6 : IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE USINAGEM PARA O PROCESSO DE TORNEAMENTO	79
6.1 Características da solução proposta	79
6.2 O gerenciador de arquivos tecnológicos – DADUSARQ	80
6.2.1 Arquivo de materiais - DADUSMAT.DAT	81
6.2.2 Arquivo de ferramentas - DADUSFER.DAT	82
6.2.3 Arquivo de fabricante de ferramentas - DADUSFAB.DAT	83
6.2.4 Arquivo de máquinas - DADUSMAT.DAT	83

6.2.5 Arquivo de dados sobre categorias salariais -DADUSCAT.DAT	85
6.2.6 Arquivo de dados gerais do sistema - DADUSGER.DAT	85
6.3 O programa gerador de condições otimizadas de usinagem –DADUS .	86
6.3.1 Visão geral do programa	86
6.3.2 Detalhamento das operações	92
6.3.2.1 Seleção de máquina ferramenta	92
6.3.2.2 Seleção de ferramenta	92
6.3.2.3 Procedimento para interpretação dos códigos do inserto e do suporte porta-ferramentas	93
6.3.2.4 Procedimento para cálculo de custos operacionais	93
6.3.2.5 Cálculo do intervalo de máxima eficiência para a vida da ferramenta	94
6.3.2.6 Leitura dos dados geométricos da operação	94
6.3.2.7 Procedimento de leitura dos tempos secundários	94
6.3.2.8 Procedimento para determinação da profundidade de corte	95
6.3.2.9 Procedimento para cálculo dos avanços e ajuste do índice de esbeltez	95
6.3.2.10 Ajuste da profundidade de corte pelo usuário	95
6.3.2.11 Acabamento superficial	96
6.3.2.12 Procedimento de cálculo da velocidade de corte otimizada	98
6.3.2.13 Procedimentos para ajuste das rotações.....	98
6.3.2.14 Procedimentos para cálculo do tempo de corte da peça	98
6.3.2.15 Procedimento para cálculo do custo e tempo total de um lote	99

6.4 Operação do programa	99
CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS.....	111
7.1 Conclusões.....	111
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
APÊNDICE I	119
APÊNDICE II	123
APÊNDICE III	128

RESUMO

Este trabalho trata do problema da otimização das condições de usinagem para o processo de torneamento. São apresentadas as formas de otimização por critérios econômicos como mínimo custo e máxima produção, bem como as restrições tecnológicas impostas ao processo de usinagem. Como forma de aplicar estes conceitos é apresentado um sistema para determinação otimizada de condições de usinagem, apoiado por banco de dados. O sistema permite a seleção de materiais, ferramentas e máquinas, a partir de informações contidas no banco de dados. Com o uso deste sistema determina-se a velocidade de corte otimizada, o avanço e a profundidade de corte, os resultados são ajustados ao torno selecionado, podendo ser tanto um torno convencional como a comando numérico.

Para validar o sistema, foram utilizados dados obtidos da literatura, e adicionalmente foram realizados ensaios de usinagem para um par material/ferramenta, obtendo-se dados para determinação da equação expandida de Taylor, cujos resultados foram utilizados num exemplo de uso do sistema.

ABSTRACT

This work deals with the problem of machining conditions optimization, for turning process. Optimization forms by economical criteria for minimum cost and maximum production rate, are presented, as well as a technological machining constraints which are enforced upon the process. As a form to apply these concepts, a system to determine optimal machining conditions based on a technological data bank is presented. The system allows the selection of part material, tools and machine-tools from the technological data bank. Using this system it determine optimized cutting speed, feed and depth of cut. The results are adjusted to the selected lathe, that can be a conventional or numerical control lathe. In order to validate the system, data from literature was used. In addition , machining test for a couple of part material / tool material was performed. The obtained data was used to determine the Taylor's extended tool life equation, which was employed as an example of the application of the system.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O atual estágio de competição pelo mercado, tem causado mudanças rápidas nas empresas em todo o mundo, aquelas que se adaptam mais rapidamente a estas mudanças levam uma vantagem competitiva sobre as demais. Cada vez mais o mercado exige melhores produtos, com mais qualidade, menor custo e prazos de entrega cada vez menores. Isto tem levado a uma substancial mudança nas formas de produção, notadamente na indústria metal mecânica, pois, a produção em massa via automação rígida com "linhas transfer" dificulta a flexibilização da produção no tocante ao tipo de peça e à quantidade de peças a serem manufaturadas. Hoje com as rápidas transformações tecnológicas impostas aos produtos, com a diminuição do seu ciclo de vida e com a necessidade de diversificação da produção, leva as empresas a produzirem cada vez mais em pequenos ou médios lotes de peças numa mesma unidade de manufatura. Alguns estudos indicam que mais de 75% das peças são produzidas em lotes de até 50 unidades ou menos [01], sendo que este percentual chegaria em alguns países a 95% das peças produzidas [02]. Como consequência desta necessidade de produzir peças em pequenos lotes para atender aos requisitos de produtos com ciclos de vida cada vez menores, cria-se uma dificuldade cada vez maior para as empresas planejarem de maneira rápida e eficiente, a sua produção.

Neste sentido as tecnologias "auxiliadas por computador" como o CAD (Projeto Auxiliado por Computador), o CAPP (Planejamento do Processo Auxiliado por Computador) e o CAM (Manufatura Auxiliada por Computador), podem contribuir para que muitas tarefas sejam automatizadas, melhorando a eficiência dos sistemas produtivos. Todavia, mesmo considerando-se a redução nos custos destas tecnologias e a abertura ocorrida no mercado nacional nos últimos anos, o uso destas tecnologias ainda não está muito difundido, principalmente nas pequenas e médias empresas. Algumas empresas tem investido apenas no uso de sistemas CAD outras, já possuindo máquinas a comando numérico, investem também em sistemas CAM, porém a grande maioria pouco evoluiu em termos de planejamento do processo, e em alguns casos extremos sequer tem algum tipo de folha de processo que possa ser empregada na análise e no estabelecimento das etapas primárias de produção.

Uma das atividades pertencentes ao planejamento de processos, é a determinação das condições de usinagem. Mesmo em empresas onde estas condições de usinagem são

determinadas por um processista, o que nem sempre ocorre, estes geralmente se utilizam de catálogos de fabricantes de ferramentas ou de manuais do tipo "Machining Data Handbook" [03]. As condições de usinagem obtidas desta maneira, na maioria das vezes, não podem ser consideradas ótimas, porque são muito genéricas e não levam em consideração dados importantes como por exemplo a potência da máquina, os custos de usinagem ou mesmo o par material/ferramenta para as condições específicas do usuário.

As universidades e os centros de pesquisa tem produzido muitas informações sobre desgaste de ferramentas, vida da ferramenta e economia da usinagem. Estas informações tem sido armazenadas em sistemas de bancos de dados. Estes sistemas foram inicialmente implementados para máquinas de médio a grande porte, o que tornava difícil o acesso às informações neles contidas, pois, as empresas avaliavam que estes sistemas possuíam uma pequena relação custo/benefício.

Posteriormente desenvolveram-se bancos de dados de usinagem bastante completos e que requerem, para a sua utilização eficaz, o uso de programas de computador para o seu gerenciamento [04, 05, 06], porém com relações custo/benefício mais interessantes. Um trabalho extenso e aprofundado a respeito de sistemas de informações de usinagem foi desenvolvido na UFSC [06], nele podem ser vistos maiores detalhes sobre vários sistemas existentes e a implantação do Centro de Informações de Usinagem – CINFUS .

A determinação de condições otimizadas para o processo de usinagem é de grande importância no estabelecimento de tempos e custos de produção, de forma a permitir tirar o máximo proveito dos recursos disponíveis para a produção. Se, há alguns anos atrás a falta e os custos elevados dos recursos computacionais inviabilizavam este tipo de solução, hoje ela é plenamente viável e desejável, pois a cada ano que passa os microprocessadores ficam mais potentes e mais baratos. O uso de computadores pessoais (PCs) está bastante disseminado em várias outras funções dentro da maioria das indústrias e existe um grande número de programas comerciais disponíveis para estas máquinas. Assim, pode ser conveniente para as empresas utilizarem suas plataformas de PCs para operar programas que determinem condições de usinagem otimizadas com o benefício adicional do usuário economizar no custo de treinamento.

Neste trabalho descreve-se uma metodologia para a otimização das condições de usinagem no processo de torneamento. Esta metodologia foi implementada num programa de computador destinado ao uso em computadores pessoais (PCs). No desenvolvimento do programa, procurou-se combinar a facilidade de uso do programa, com uma linguagem objetiva e o acesso direto aos dados tecnológicos nos arquivos armazenados no computador,

resultando num programa simples, compacto e extremamente rápido. Empregou-se uma interface constituída de menus e janelas, que acessam os dados armazenados na memória do computador e impõem as restrições tecnológicas adequadas, calculando a velocidade, avanço e profundidade de corte otimizadas para operações de torneamento. Os resultados são rapidamente mostrados na tela do computador em forma de relatórios, minimizando o trabalho do usuário. A estrutura do programa, por ser modular, permite a introdução de novas rotinas para a otimização de outros tipos de operações de usinagem, podendo ser empregado para a utilização com tornos a comando numérico ou convencionais.

Trata-se de uma proposta de programa de baixo custo para PCs, permitindo sua utilização também por empresas de pequeno e médio porte, resultando em ganhos de produtividade para as mesmas. Embora o programa possa operar de forma isolada, ele foi desenvolvido com a perspectiva de integrar futuramente um dos sistemas CAPP ora em implementação dentro do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. O programa foi validado empregando-se dados disponíveis na literatura [07,08], dados de trabalhos realizados anteriormente no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC[09] e, adicionalmente foi realizado um ensaio de usinagem para a determinação dos parâmetros necessários a metodologia de otimização empregada no programa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Caracterização da operação de torneamento.

O torneamento é um processo de usinagem onde a peça tem o movimento principal de rotação, e a ferramenta se desloca simultaneamente em avanço, numa trajetória coplanar ao eixo de rotação da peça, podendo ainda existir mais de uma ferramenta atacando a peça simultaneamente. É um processo com geometria definida, onde se utilizam ferramentas monocortantes.

A subdivisão do processo de torneamento pode ser feita sob pelo menos dois aspectos: quanto ao objetivo, se para desbaste ou acabamento[10], ou quanto ao tipo de trajetória da ferramenta, se retilíneo ou curvilíneo[11].

Assim pode-se definir como torneamento de desbaste aquele anterior ao acabamento, onde se deseja obter na peça formas e as dimensões próximas as finais. O acabamento é a operação destinada a obter na peça as dimensões finais, uma determinada rugosidade superficial ou uma combinação dos dois.[11]

O presente trabalho aborda o torneamento retilíneo externo, especificamente nos casos de torneamento cilíndrico (cilindrimento) e radial (faceamento) [12]. A figura 2.1 mostra os dois tipos de operação.

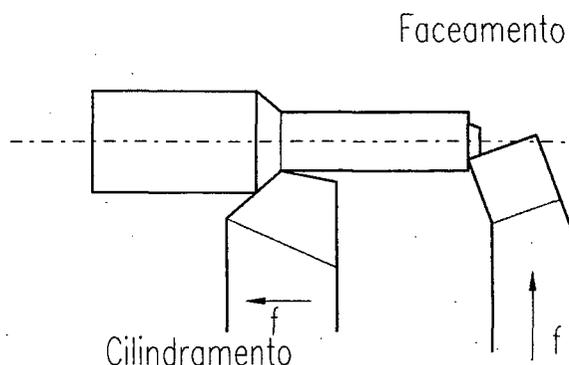


Figura 2.1 movimento do avanço no torneamento cilíndrico e faceamento.

2.2. Força de corte no processo de torneamento.

O processo de usinagem eficiente é governado basicamente por duas grandezas, a força de corte e a velocidade de corte [13] pois, o seu produto determina a potência consumida na usinagem.

Segundo a norma DIN 6584 tem-se que, a força de usinagem é a força total que atua na cunha cortante durante a usinagem [14], e as suas três componentes ortogonais são dadas como força de corte, força de avanço e força passiva, ou de recuo. A figura 2.1 mostra a força de usinagem F e as suas componentes ortogonais, segundo a DIN 6584.

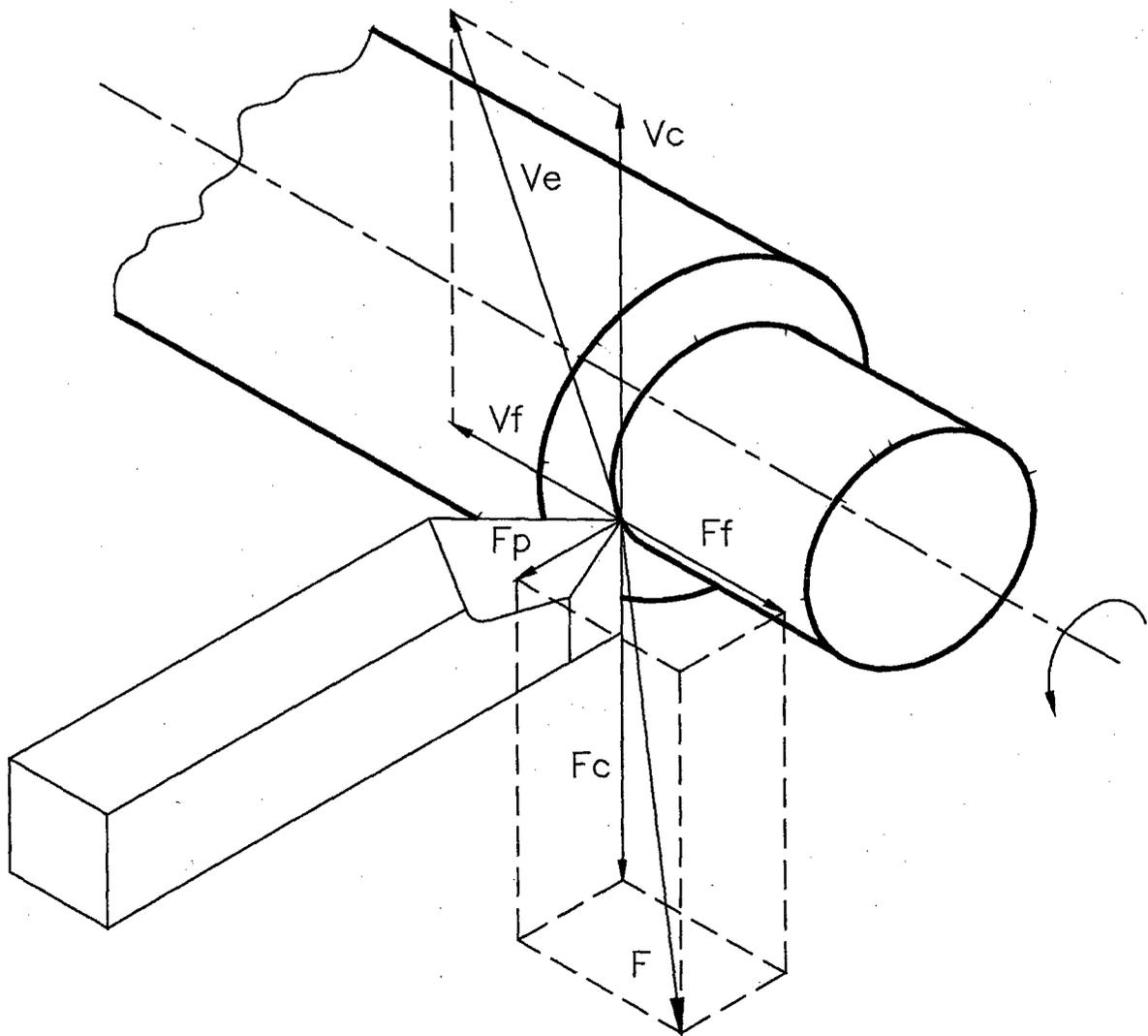


Figura 2.1 Componentes da força de usinagem no torneamento.

onde:

F_c : é a componente de F sobre a direção de corte, que é dada pela velocidade de corte, V_c .

F_f : é a componente de F sobre a direção do avanço, que é dada pela velocidade de avanço, V_f .

F_p : é a componente de F sobre a direção perpendicular ao plano de trabalho, que é o plano que contém as direções de corte e de avanço.

A velocidade de corte é a velocidade instantânea do ponto selecionado do gume de corte, segundo a direção e sentido de corte.

No torneamento define-se como avanço o movimento produzido pela máquina-ferramenta ou manualmente, para gerar um movimento relativo adicional entre ferramenta e peça, que quando somado ao movimento de corte leva a remoção repetida ou contínua de cavaco [12]. A profundidade de corte é dada pela penetração da ferramenta no material da peça na direção perpendicular ao plano de trabalho.

2.2.1 - Pressão específica de corte.

A importância da força de corte vem do fato de ser a maior das três componentes da força de usinagem, sendo também ela a responsável pela potência de usinagem. [11, 15]

A força ou pressão específica de corte é por definição, a força de corte F_c por unidade de área da seção de corte. A área da seção de corte é dada pelo produto da profundidade de corte (a_p) e pelo avanço (f) da ferramenta.

$$K_c = \frac{F_c}{S} \quad (2.1)$$

onde,

S = área da seção de corte. (mm^2)

F_c = é a força principal de corte.(N)

K_c = é pressão específica de corte.(N/mm^2)

A área da seção de corte pode também ser calculada pelo produto da largura pela espessura do corte. A área hachurada na figura 2.2 próxima ao gume da ferramenta é a área da seção de corte S , a figura também esclarece o que vem a ser a largura (b) e espessura de corte (h) para caso do torneamento.

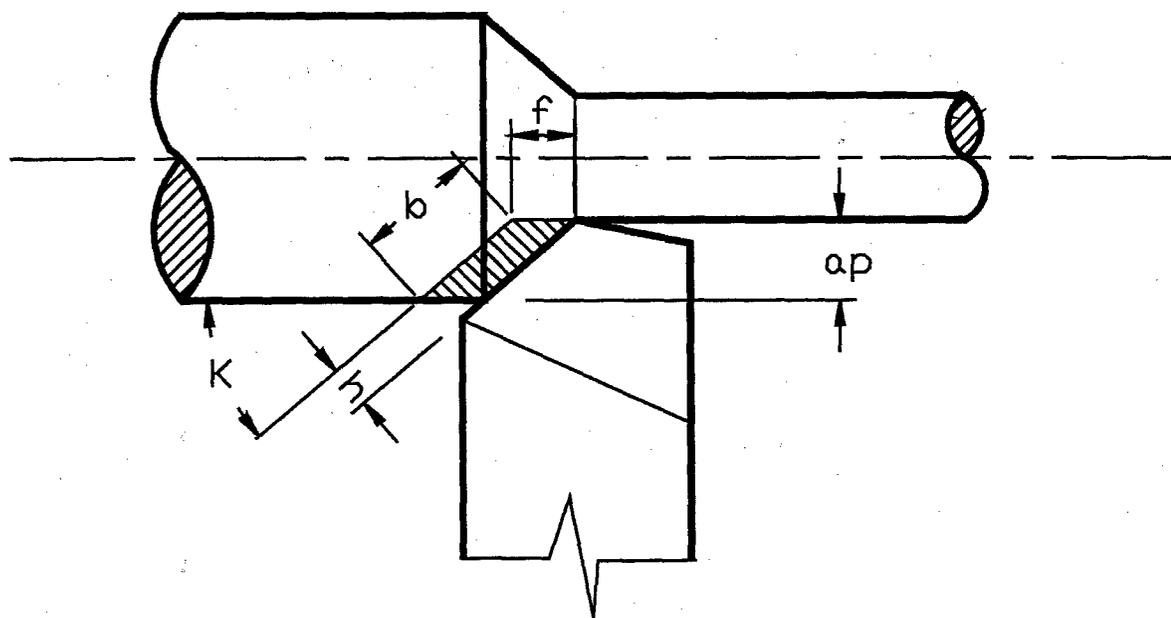


Figura 2.2 - Seção de corte no processo de torneamento.

Assim tem-se que a área de seção do corte é dada por:

$$S = h \cdot b = f \cdot a_p \quad (2.2)$$

$$h = f \cdot \text{sen}(\kappa) \quad (2.3)$$

$$b = \frac{a_p}{\text{sen}(\kappa)} \quad (2.4)$$

onde :

κ : é o ângulo de direção do gume.

Dentre os vários modelos de força encontrados na literatura [13,08,11], o de Kienzle nos fornece uma equação empírica simples e bastante precisa para a maioria das aplicações. Esta equação relaciona as características do material, a seção de corte e a força de corte. Para a força de corte F_c vale [16]:

$$\frac{F_c}{b} = k_{c1.1} \cdot h^{(1-mc)} \quad (2.5)$$

ou

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{(1-mc)} \quad (2.6)$$

onde,

F_c = força de corte (N).

b = largura do corte (mm).

h = espessura do corte (mm).

$1-mc$ = coeficiente angular da reta.

$K_{c1.1}$ = pressão específica de corte do material, para uma seção de 1 mm^2 .

Entre os fatores que influenciam a pressão específica de corte estão: o material da peça, a geometria e o material da ferramenta, o avanço, a profundidade de corte, a velocidade de corte, a lubrificação e o desgaste da ferramenta, sendo os principais o material da peça, a geometria da ferramenta e as condições de avanço e profundidade de corte.

A pressão específica de corte pode ser obtida experimentalmente, através da medição da força principal de corte F_c para várias seções de cavaco. Assim para uma dada uma largura de corte b , são realizadas as medidas de F_c em função de h . Por regressão linear ajusta-se os pontos a uma reta num gráfico dilogarítmico. Para tanto utiliza-se o seguinte modelo [09]:

$$y = p \cdot x^q \quad (2.7)$$

onde: $y = F_c/b$.

$p = K_{c1.1}$

$x = h$

$q = (1-mc)$

Aplicando-se logaritmos a ambos os lados da equação 2.7, lineariza-se a função e esta passa a ser uma reta:

$$\ln(y) = \ln(p) + q \ln(x) \quad (2.8)$$

substituindo-se em 2.5 tem-se:

$$\ln\left(\frac{F_c}{b}\right) = \ln(k_{c1.1}) + (1 - mc) \cdot \ln h \quad (2.9)$$

Assim $K_{c1.1}$ é o coeficiente linear da reta e $(1 - mc)$ o coeficiente angular, que podem ser determinados por regressão linear dos pontos $(F_c/b) \times h$, ou graficamente através da extrapolação da reta num gráfico dilogarítmico até um valor de $h=1\text{mm}$.

2.3 - Geometria da ferramenta monocortante.

Em todos os processos de usinagem, as características do mesmo, tal como formação e saída do cavaco, força de corte, desgaste e resultado do trabalho, são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta [16].

Assim a geometria da ferramenta deve ser adaptada às condições em que se realizam os trabalhos, tais como: se o material da peça é dúctil ou frágil, se o material é tenaz ou suficientemente resistente ao desgaste, se máquina ferramenta é rígida, ou se possui folgas pelo uso, entre outros. A figura 2.3 mostra as superfícies, quinas e chanfros numa ferramenta monocortante, e a figura 2.4 mostra os principais ângulos para a mesma.

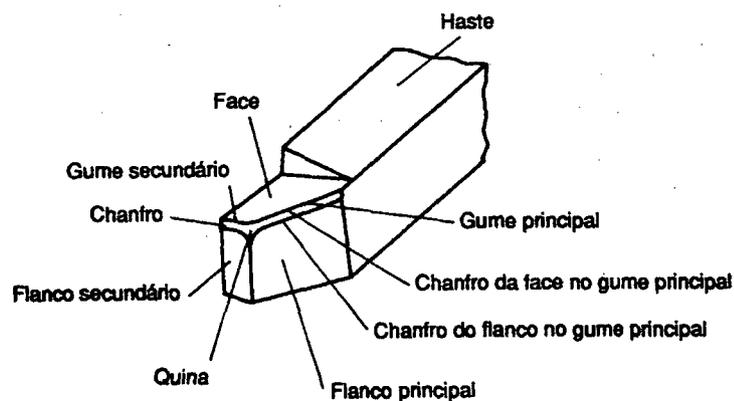


Figura 2.3 - Superfícies, gumes, quinas e chanfros de uma ferramenta[16]

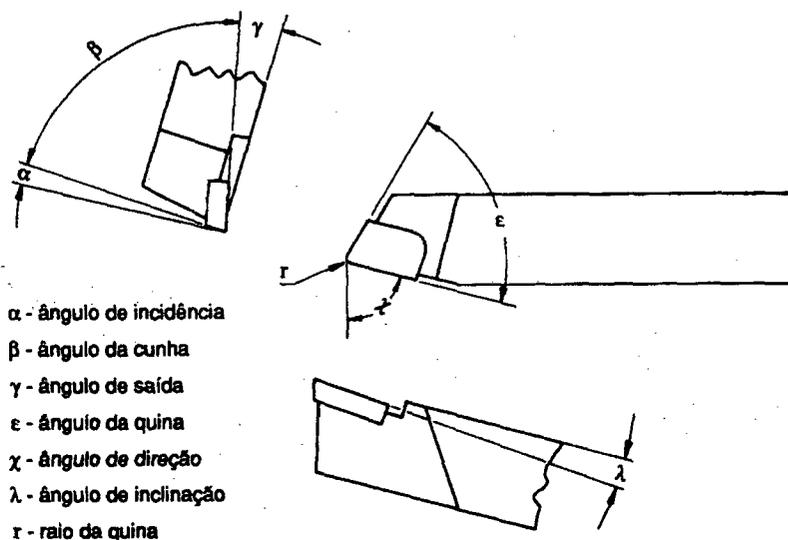


Figura 2.4 - Principais ângulos de uma ferramenta monocortante [16]

2.4 - Critério de fim de vida e desgaste da ferramenta.

A perda da capacidade de corte de uma ferramenta se dá devido a um determinado grau de danificação, ocorrida durante o processo de usinagem [15]. Esta pode ser de caráter gradual como os desgastes, ou devido a outros fenômenos, como deformação plástica ou fratura do gume [17,18].

Na maioria das vezes porém, ocorrem mecanismos de perda gradual da capacidade de satisfazer as exigências do processo, seja pelo aumento da rugosidade superficial, seja pelo aumento da força de corte, ou incapacidade de manter as tolerâncias dimensionais exigidas pela peça. Quando ocorre a falha por quebra súbita, o fim de vida é evidente, porém no caso dos mecanismos de desgaste, se faz necessário critérios mensuráveis, que indiquem o fim de vida.

O critério de fim de vida pode ser definido então como "um valor limiar da medida de desgaste de uma ferramenta, ou a ocorrência de um fenômeno"[17]. Onde entende-se por fenômeno uma das ocorrências citadas no parágrafo anterior.

Dos diversos tipos de critérios de desgaste para ferramentas, os mais representativos para o caso do torneamento são os critérios do desgaste de flanco e de cratera, por serem estes

os que mais contribuem para o fim de vida da ferramenta. Além disto, estes são critérios relativamente fáceis de medir, assim usualmente e para efeito deste trabalho, apenas serão considerados como critérios válidos: o desgaste médio de flanco (VB), o desgaste máximo de flanco ($VB_{\text{máx}}$), a profundidade da cratera (KT), e a razão entre KT e a distância do centro da cratera ao flanco, (KT/KM). O uso destes critérios será convenientemente abordado no capítulo 3. A figura 2.5 mostra as marcas de desgaste numa ferramenta para torneamento.

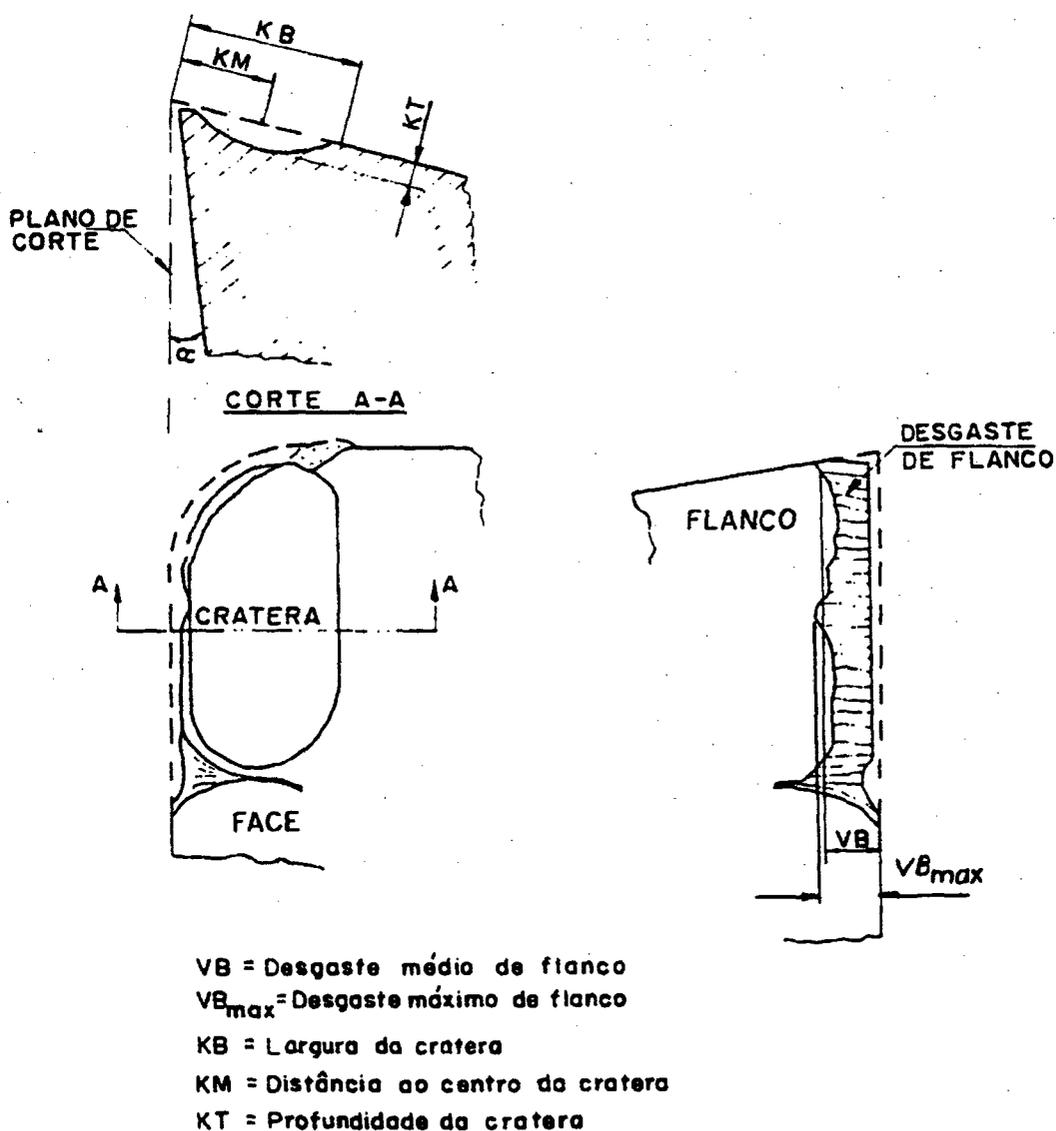


Figura 2.5 - Marcas de desgaste de flanco e cratera.

2.5 - Equação de vida do gume da ferramenta.

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido[11].

Para efeito deste trabalho os critérios são os abordados no item anterior, pelos motivos já expostos.

Em uma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta de corte é influenciado, em parte, por fatores não integralmente conhecidos. No entanto, pode ser descrito, aproximadamente, em função das condições de usinagem. Assim sendo, a interdependência entre desgaste e condições de usinagem devem ser levantadas [19,20].

A equação expandida de Taylor relaciona as condições de usinagem com a velocidade de corte ponderando a influência de cada uma delas através dos seus expoentes da seguinte forma[12]:

$$V = C \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot T^G \cdot VB^H \quad (2.10)$$

onde :

V = Velocidade de corte (m/min)

f = Avanço (mm/rot)

a_p = Profundidade de corte (mm)

T = Vida do gume (min)

VB = medida da marca de desgaste da ferramenta (mm)

C = Constante de Taylor.

E, F, G, H = Expoentes que ponderam a influência das condições de usinagem.

2.6 - Otimização dos parâmetros de usinagem.

2.6.1 - Histórico.

Os primeiros estudos econômicos sobre a usinagem dos metais foram realizados ainda no início do século por Taylor nos E.U.A. e Schlesinger na Alemanha, mais tarde aparecem os trabalhos de Leyensetter, o qual publicou no ano de 1933 na Alemanha um artigo intitulado *A velocidade econômica de corte*. Nessa publicação o autor afirma que "*a velocidade econômica de corte é aquela na qual é usinado o máximo volume de cavaco, num determinado tempo total de usinagem*" [11], que corresponde a que hoje é chamada de velocidade de máxima produção.

Em 1950 Gilbert publica o seu primeiro trabalho sobre otimização intitulado *Economic's of Machining*, onde ele introduz os conceitos de "taxa de máxima produção" e de "mínimo custo de produção", e estes podem ser descritos como [21]:

- Otimização para a máxima taxa de produção ou de mínimo tempo: consiste na seleção de condições de usinagem que maximizam a quantidade de peças produzidas em um intervalo de tempo, ou seja a minimização do tempo de produção por peça. Este critério deve ser adotado sempre que for necessário um aumento físico da produção, em detrimento dos custos.
- Otimização para o mínimo custo de produção: consiste na seleção de condições de usinagem que levam a produzir uma peça com o mínimo custo possível.

A utilização de um ou outro critério depende da necessidade momentânea da empresa, e deve ser cuidadosamente escolhido, levando-se em conta o volume de produção necessário, os custos de salários, máquinas e ferramentas [22].

A faixa compreendida entre estes dois extremos é chamada de faixa de máxima eficiência, e dentro dela deve ser tomada a vida da ferramenta para se obter condições econômicas de corte[21].

As variáveis que afetam a economia da usinagem são numerosas, e incluem o material da ferramenta, custos, a capacidade da máquina operatriz e as condições de usinagem. Como estas últimas são acessíveis na máquina ferramenta, no passado sua seleção era considerada parte das atribuições do operador. Porém a seleção de condições econômicas envolvem dados

técnicos e de custo não disponíveis para o operador, assim a seleção ótima raramente pode ser feita desta maneira.

Taylor chegou a este ponto muitos anos atrás e sugeriu que o ótimo só pode ser conseguido se a seleção for feita por um engenheiro de planejamento, com acesso a todas as informações relevantes [23].

Como a solução numérica do problema de otimização está intrinsecamente ligada a estas informações nem sempre fáceis de se obter na indústria [11], faz-se necessário um sistema de contabilidade bem estruturado, com fácil acesso para as funções de planejamento.

2.6.2 - Modelos de otimização dos parâmetros de usinagem.

Nas últimas décadas surgiram vários modelos para otimização dos parâmetros de usinagem, estes vem melhorando as suas possibilidades de uso juntamente com o avanço da área computacional.

Recentemente o interesse na área tem aumentado pela necessidade de algoritmos robustos e precisos, para definição destes parâmetros dentro de sistemas CAPP(Planejamento do Processo Auxiliado por Computador), visando uma tecnologia de CIM(Manufatura Integrada por Computador).

Uma revisão bibliográfica aponta várias tentativas de resolver o problema de otimização dos parâmetros de usinagem, com trabalhos que levam em consideração os diversos fatores como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, alguns considerando as restrições práticas dos processos, outros apenas a otimização livre. Neste item serão comentadas algumas abordagens consideradas mais importantes. Estas podem ser classificadas em dois grandes grupos a saber: as soluções de caráter determinístico e as de caráter probabilístico.

ERMER [24,25] propõe uma solução para mínimo custo usando programação geométrica e o método de Newton-Raphson, com restrições tecnológicas para um modelo de torneamento, e aponta para o seu uso em sistemas de controle adaptativo. Mais tarde desenvolveu um sistema baseado em programação geométrica combinada com programação

linear(usando o método Simplex), para otimização em múltiplos passes sujeita a restrições tecnológicas, esta abordagem propõe que nem sempre a maximização da profundidade de corte, para obter-se um único passe é a mais econômica, ou de maior produção ao se proceder uma usinagem, principalmente quando um único passe tem sérias restrições de ordem prática(tal como potência por exemplo).

IWATA et alii [26,27] , propuseram um modelo probabilístico para otimização em múltiplos passes, onde tratam o desgaste da ferramenta como um fenômeno probabilístico.

ROSSETO et alii [28, 29] sugerem o uso de métodos probabilísticos para solução do problema de otimização, baseado no fato de que o critério de fim de vida de uma ferramenta não pode ser puramente determinístico como sugere a equação de Taylor, pois existem também as falhas tais como quebra da ferramenta.

KOULAMAS [30] sugere também o uso de programação geométrica para otimização de velocidade e de corte e avanço e tempo entre as trocas de ferramentas, abordando a vida das ferramentas como de natureza probabilística.

COWTON & WIRTH [31] questionaram recentemente a importância e a alocação dada aos custos fixos nos modelos de otimização usados atualmente. O debate ainda deve se estender por algum tempo, porém, o principal argumento é o aumento dos custos de capital pela substituição da mão-de-obra por equipamentos, o que implica em deslocamentos de custos.

WALKEVAR & LAMBERT [32,33] sugerem também o uso de programação linear para otimização de velocidade e avanço para os casos e dois passes.

HITOMI [34,35] foi o primeiro a sugerir o conceito de otimização para velocidade de corte de máximo lucro, e prova que a mesma está no intervalo entre a de máxima produção e de mínimo custo. Posteriormente desenvolve um método para otimização simultânea dos tempos de usinagem e troca de ferramenta em centros de usinagem usando programação linear, as trocas de ferramentas são otimizadas de modo semelhante ao método do caixeiro viajante.

ZHOU & WYSK [36] desenvolveram um modelo probabilístico para otimizar o uso de ferramentas que são utilizadas em operações sucessivas. O método tem como base a aceitação

de que o desgaste de ferramenta é independente em cada operação sucessiva para componentes similares.

SHIN & JOO [37] propuseram uma solução para a otimização de operações de torneamento em múltiplos passes, separando as operações de desbaste e acabamento. Utilizaram programação dinâmica onde, a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte entram como variáveis de sistema. Ao mesmo tempo, utilizaram restrições tecnológicas como rugosidade da peça, potência e força de corte.

AGAPIOU[38,39,40,41] descreve um método para otimização de usinagem para múltiplos passes onde, o número de passes é otimizado por programação dinâmica e cada passe individual é otimizado usando Simplex. Também aqui são utilizadas restrições tecnológicas para construir as funções de otimização. Posteriormente as funções de otimização desenvolvidas em[38] são utilizadas para otimizar a produção em processos de múltiplos estágios, utilizando ao máximo os tempos mortos dos estágios que não constituem gargalo. Isto tem com efeito o aumento do tempo de vida das ferramentas e traz um aumento do desempenho global do sistema, entre outras coisas pela diminuição do número de trocas de ferramentas.

Nos próximos itens será exposta a abordagem para otimização pelos critérios de mínimo custo e de máxima produção onde se minimizam o tempo ou os custos por derivação das suas funções de tempo e custo, ou seja uma abordagem de caráter determinístico. Este tipo de abordagem é sugerida por vários autores [21,10,11], e é de relativa simplicidade para sua implementação computacional, sendo por este motivo adotada neste trabalho.

2.6.3 - Critério de otimização para a máxima taxa de produção ou de tempo mínimo.

Para análise do critério de máxima produção, deve se fazer inicialmente um estudo dos tempos envolvidos na fabricação de uma peça unitária dentro de um lote de Z peças, seja o tempo para produção de uma peça é dado por:

$$t = t_p + t_m + t_e \quad (2.11)$$

onde,

t (min/pç): Tempo de produção unitário, é o tempo necessário para se produzir uma peça.

t_p (min/pç): Tempo de preparação- é o tempo necessário para preparar a usinagem. Inclui carga e a descarga da máquina, tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, regulagem da máquina, ou seja são tempos improdutivos.

t_m (min/pç) :Tempo de usinagem - tempo de corte propriamente dito.

t_e (min/pç) : Tempo de reposição de ferramentas -Tempo usado nas trocas de ferramentas ou incertos intercambiáveis.

O Tempo de reposição é dado então por:

$$t_e = t_c \cdot \frac{t_m}{T} \quad (2.12)$$

onde,

t_c : tempo necessário para troca de uma ferramenta por outra nova (min/gume)

T : é a vida da ferramenta (min/gume).

Assim, substituindo-se a equação 2.12 na equação 2.11 tem-se:

$$t = t_p + t_m + t_c \cdot \frac{t_m}{T} \quad (2.13)$$

Em operações de torneamento o tempo de usinagem t_m é dado pela equação (2.14):

$$t_m = \frac{L}{N \cdot f} \quad (2.14)$$

onde,

L : comprimento de corte(mm)

f : avanço (mm/rot)

N : número de rotações(rpm)

Porém o número de rotações N , é dado pela equação (2.15), que substituída na equação (2.14) resulta na equação (2.16):

$$N = \frac{V \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (2.15)$$

$$t_m = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V \cdot f} \quad (2.16)$$

onde,

D : diâmetro da peça.

V : velocidade de corte.

Substituindo-se o valor de t_m , dado na equação (2.16), na equação (2.13) obtém-se :

$$t = t_p + \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V \cdot f} + \frac{t_c}{T} \left[\frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V \cdot f} \right] \quad (2.17)$$

Dada a equação de Taylor na sua forma mais simples, na equação (2.18) :

$$V \cdot T^n = C \quad (2.18)$$

A equação 2.18 pode ser escrita também em função da vida do gume, onde se obtém a equação 2.19:

$$T = \left[\frac{C}{V} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.19)$$

onde,

C: constante de Taylor para um determinado avanço e profundidade de corte.

T : vida da ferramenta.

V : velocidade de corte.

Substituindo o valor da vida T da equação (2.19), na equação (2.17) se obtém:

$$t = t_p + \frac{\pi.D.L}{1000.V.f} + \frac{t_c}{\left(\frac{C}{V}\right)^{1/n}} \left[\frac{\pi.D.L}{1000.V.f} \right] \quad (2.20)$$

Ou simplificando-se :

$$t = t_p + \frac{\pi.D.L}{1000.f} \cdot \frac{1}{V} + \frac{t_c}{C^{1/n}} \left[\frac{\pi.D.L}{1000.f} \right] V^{-\left(1-\frac{1}{n}\right)} \quad (2.21)$$

A primeira parcela da equação (2.21) independe da velocidade de corte pois, é o tempo de preparação, considerado como improdutivo, já a segunda parcela corresponde ao tempo de usinagem, e a terceira ao tempo gasto em trocas de ferramenta. A figura 2.6 mostra a relação da velocidade de corte com as três parcelas de tempo.

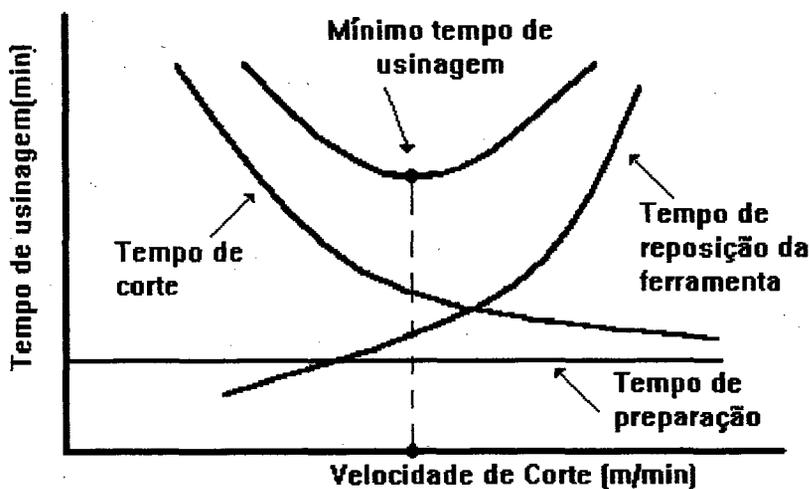


Figura 2.6 - Gráfico das parcelas de tempo em função da velocidade de corte

A velocidade de corte para máxima produção (ou tempo mínimo) é obtida ao se igualar a zero a derivada do tempo total em relação a velocidade de corte, como mostra a equação (2.22):

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\pi.D.L}{1000.f} \cdot \frac{1}{V^2} - \frac{t_c}{C^{1/n}} \left[\frac{\pi.D.L}{1000.f} \right] V^{-\left(2-\frac{1}{n}\right)} \left[1 - \frac{1}{n} \right] = 0 \quad (2.22)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{1}{V^2} + \frac{t_c}{C^{1/n}} V^{-\left(2-\frac{1}{n}\right)} \left[1 - \frac{1}{n}\right] = 0 \quad (2.23)$$

A velocidade de máxima taxa de produção pode ser então deduzida da equação (2.23), como sendo:

$$V_{cmp} = \frac{C}{\left[t_c \cdot \left(\frac{1}{n} - 1\right)\right]^n} \quad (2.24)$$

Modificando-se a equação (2.18) escrita em função da velocidade de corte se obtém a equação (2.25) :

$$V = \frac{C}{T^n} = C \cdot T^{-n} \quad (2.25)$$

Daí ser o termo entre colchetes da equação (2.24) o tempo para vida de máxima produção ou seja o tempo mínimo para uma produção econômica:

$$T_{tmp} = t_c \cdot \left(\frac{1}{n} - 1\right) \quad (2.26)$$

Para a_p , f e V_b fixos a equação expandida de Taylor (2.10) pode ser escrita da seguinte forma:

$$V = C^* \cdot T^G \quad (2.27)$$

onde ,

$$C^* = C \cdot a_p^F \cdot f^E \cdot V_b^H \quad (2.28)$$

Sendo as equações (2.18) e (2.25) válidas para qualquer velocidade e tempo, pode-se supor que:

$$G = -n \quad (2.29)$$

Assim substituindo-se a equação (2.29) na equação (2.26), e fazendo-se a vida T da equação (2.27) igual a vida de máxima produção (T_{tmp}) tem-se:

$$V_{cmp} = C^* \left[-t_c \left(1 + \frac{1}{G} \right) \right]^G \quad (2.30)$$

A equação (2.30), para a_p , f e V_b fixos pode ser escrita em termos da expandida de Taylor como:

$$V_{cmp} = C \cdot a_p^F \cdot f^E \cdot V_b^H \cdot \left[-t_c \left(1 + \frac{1}{G} \right) \right]^G \quad (2.31)$$

2.6.4 - Critério de otimização para mínimo custo de produção.

O custo unitário por peça, em uma operação de usinagem é dado pela soma de seis tipos básicos de custos, como mostra a equação (2.32):

$$u = m_c + u_p + u_m + u_e + u_t + u_i \quad (2.32)$$

onde,

m_c :Custo de material, por peça (\$/pç) - custo de matéria prima por peça produzida.

u_p :Custo de preparação por peça (\$/pç) - custo do tempo necessário com preparação(set-up) da máquina, colocação e retirada da peça, posicionamento da ferramenta.

u_m : Custo de usinagem, por peça (\$ /pç) - custo do tempo necessário à usinagem da peça.

u_e : Custo do tempo de reposição de ferramentas, por peça ($\$/pç$) - custo para o tempo gasto em reposição de ferramentas.

u_t : Custo de ferramentas, por peça ($\$/pç$) - custo dos gumes de corte necessários para produzir uma peça, inclui-se aqui: compra, depreciação do suporte, reafiação, etc.

u_i : Custos indiretos ($\$/pç$) - inclui todos os custos indiretos para produzir uma peça, tais como; depreciação da máquina-ferramenta, despesas administrativas, etc.

Cada uma destas parcelas pode ser estudada em sua dependência ou não do tempo de usinagem, assim, nota-se que o custo de preparação (u_p) bem como o custo do material da peça independem do tempo de usinagem e o custo de preparação é dado pela equação (2.33).

$$u_p = k_d \cdot t_p \quad (2.33)$$

onde,

k_d : é o custo do trabalho direto utilizado . ($\$/min$)

Já as outras parcelas são de alguma forma dependentes do tempo de usinagem, e serão analisadas a seguir:

a) Custo de usinagem, por peça:

É dado pela soma dos custos do trabalho direto e custo direto da usinagem multiplicados pelo tempo de usinagem.

$$u_m = (k_d + k_m) \cdot t_m \quad (\$/peça) \quad (2.34)$$

onde:

k_m : é o custo de usinagem com fluido de corte, eletricidade e outros, durante o tempo de usinagem. ($\$/min$)

b) Custo do tempo de troca de ferramenta, por peça:

$$u_e = k_d \cdot t_e = k_d \cdot t_c \cdot \frac{t_m}{T} \quad (\$/pe\c{c}a) \quad (2.35)$$

c) Custo de ferramenta por peça:

$$u_t = \frac{k_t}{Z_t} \quad (\$/pe\c{c}a), \text{ onde :} \quad (2.36)$$

k_t : custo de um gume da ferramenta. (\$/gume)

Z_t : número de peças usinadas por vida da ferramenta (pç/gume).

Mas, Z_t é dado por:

$$Z_t = \frac{T}{t_m} \quad (2.37)$$

Substituindo a equação (2.37) na equação (2.36) tem-se que o custo de ferramentas por peça é dado por:

$$u_t = k_t \cdot \frac{t_m}{T} \quad (\$/pe\c{c}a) \quad (2.38)$$

O custo de ferramenta por gume deve ser calculado para o inserto e o suporte porta-ferramenta, de maneira a ratear o custo de aquisição deste, pelos gumes utilizados na sua vida útil, assim pode-se calcular k_t como :

$$k_t = \frac{K_{at}}{n_{at}} + \frac{K_{as}}{n_{as}} \quad (2.39)$$

onde,

K_{at} : é o custo de aquisição de um inserto.

K_{as} : é o custo de aquisição de um suporte.

n_{at} : é o número de gumes do inserto.

n_{as} : é a vida média utilizável do suporte expressa em numero de gumes (no caso 450)

d) Custos indiretos de fabricação por peça:

$$u_i = k_i \cdot t = k_i \cdot (t_p + t_m + t_c \cdot t_m / T) \quad (2.40)$$

onde,

k_i : é a soma de todos custos indiretos de fabricação por unidade de tempo. (\$/min)

t : tempo total de fabricação (min/pcç)

Substituindo-se as equações (2.33), (2.34), (2.35), (2.38) e (2.40) na equação (2.32)

tem-se que o custo por peça será:

$$u = m_c + k_d \cdot t_p + (k_d + k_m) \cdot t_m + k_d \cdot t_c \frac{t_m}{T} + \dots \quad (\$/peça) \quad (2.41)$$

$$\dots + k_t \cdot \frac{t_m}{T} + k_i \cdot \left[t_p + t_m + t_c \frac{t_m}{T} \right]$$

Pode-se agora multiplicar t_m pela parcela entre parênteses, e k_i pela parcela entre colchetes, tem-se:

$$u = m_c + k_d \cdot t_p + k_i \cdot t_p + k_d \cdot t_m + k_i \cdot t_m + \dots \quad (2.42)$$

$$\dots + k_m \cdot t_m + k_t \cdot \frac{t_m}{T} + k_d \cdot t_c \frac{t_m}{T} + k_i \cdot t_c \cdot \frac{t_m}{T}$$

Reagrupando-se os custos diretos e indiretos, se obtém:

$$k_l = k_d + k_i \quad (\$/min) \quad (2.43)$$

Substituindo a equação (2.43) na (2.42), se obtém:

$$u = m_c + k_l \cdot t_p + (k_l + k_m) \cdot t_m + (k_l \cdot t_c + k_t) \cdot \frac{t_m}{T} \quad (2.44)$$

Substituindo-se as equações (2.16) e (2.19) na equação (2.44), encontra-se o custo em função da velocidade de corte:

$$\begin{aligned}
 u = m_c + k_1 t_p + (k_l + k_m) \cdot \frac{\pi D L}{1000 \cdot f V} + \dots \\
 \dots + (k_t t_c + k_t) \cdot \frac{\pi D L}{1000 \cdot f \cdot C^{1/n}} V^{\left(\frac{1}{n}-1\right)}
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

Na equação (2.45) a primeira e segunda parcelas são independentes da velocidade de corte, a terceira parcela corresponde aos custos com o uso da máquina e a quarta parcela corresponde aos custos com ferramenta e troca de ferramenta. A figura 2.7 mostra a evolução dos custos em função da velocidade de corte.

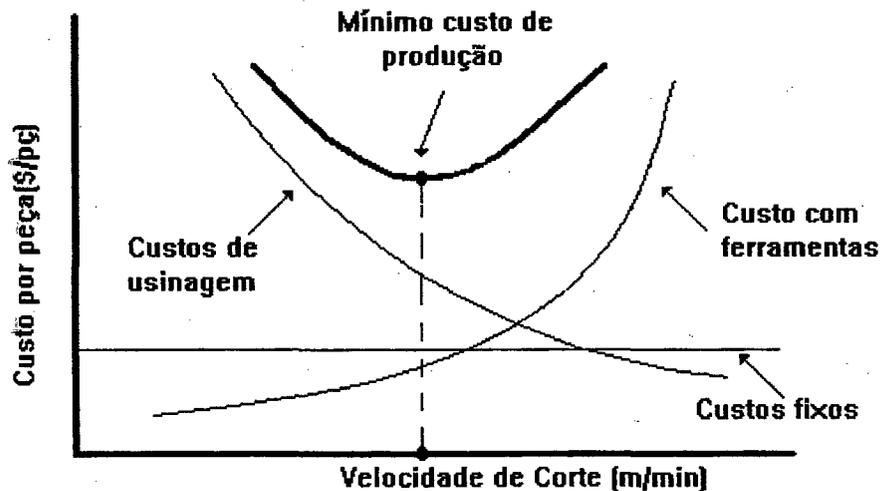


Figura 2.7 - Evolução das parcelas de custos em função da velocidade de corte.

A velocidade de corte de mínimo custo será obtida igualando-se a zero a derivada do custo em relação a velocidade de corte, então derivando-se a equação (2.45), e igualando-a a zero, se obtém:

$$\begin{aligned}
 \frac{du}{dV} = -(k_l + k_m) \cdot \frac{\pi D L}{1000 \cdot f} \cdot \frac{1}{V^2} + \dots \\
 \dots + \left(\frac{1}{n}-1\right) (k_t t_c + k_t) \cdot \frac{\pi D L}{1000 \cdot f \cdot C^{1/n}} V^{\left(\frac{1}{n}-2\right)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

A equação anterior(2.46) pode então ser escrita como a seguinte igualdade:

$$(k_l + k_m) \cdot \frac{1}{V^2} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) (k_l t_c + k_t) \cdot \frac{1}{C^{1/n}} V^{\left(\frac{1}{n} - 2 \right)} \quad (2.47)$$

Logo, a velocidade de corte para o mínimo custo de produção será dada pela equação (2.48):

$$V_{mc} = C \cdot \left[\frac{k_l + k_m}{\left(\frac{1}{n} - 1 \right) (k_l t_c + k_t)} \right]^n \quad (2.48)$$

Aplicando-se o resultado da equação (2.48) na equação (2.18), deduz-se que o termo entre colchetes é o inverso da vida de mínimo custo ($1/T_{mc}$), donde se obtém que:

$$T_{mc} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot \frac{(k_l t_c + k_t)}{k_l + k_m} \quad (2.49)$$

De maneira análoga ao que foi feito nas equações de (2.27) a (2.31), para um conjunto de avanço, profundidade de corte e VB fixos a equação expandida de Taylor (2.10) pode ser escrita da seguinte forma, para a velocidade de mínimo custo:

$$V_{cmc} = C \cdot a_p^F \cdot f^E \cdot VB^H \cdot \left[- \left(1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{(k_l t_c + k_t)}{k_l + k_m} \right]^G \quad (2.50)$$

2.6.5 - O intervalo de máxima eficiência.

Ao se estabelecer as velocidades de máxima produção e de mínimo custo, determina-se uma região que é chamada de região de máxima eficiência, ou não inferior [21] como citado no item 2.61 . Prova-se matematicamente que dentro desta região, encontra-se a velocidade de máximo lucro [21,22,35,42]. Assim as velocidades de corte devem ser escolhidas sempre

dentro deste intervalo de modo a se obter condições econômicas de usinagem. A figura 2.8 mostra o intervalo de máxima eficiência em função da velocidade de corte.

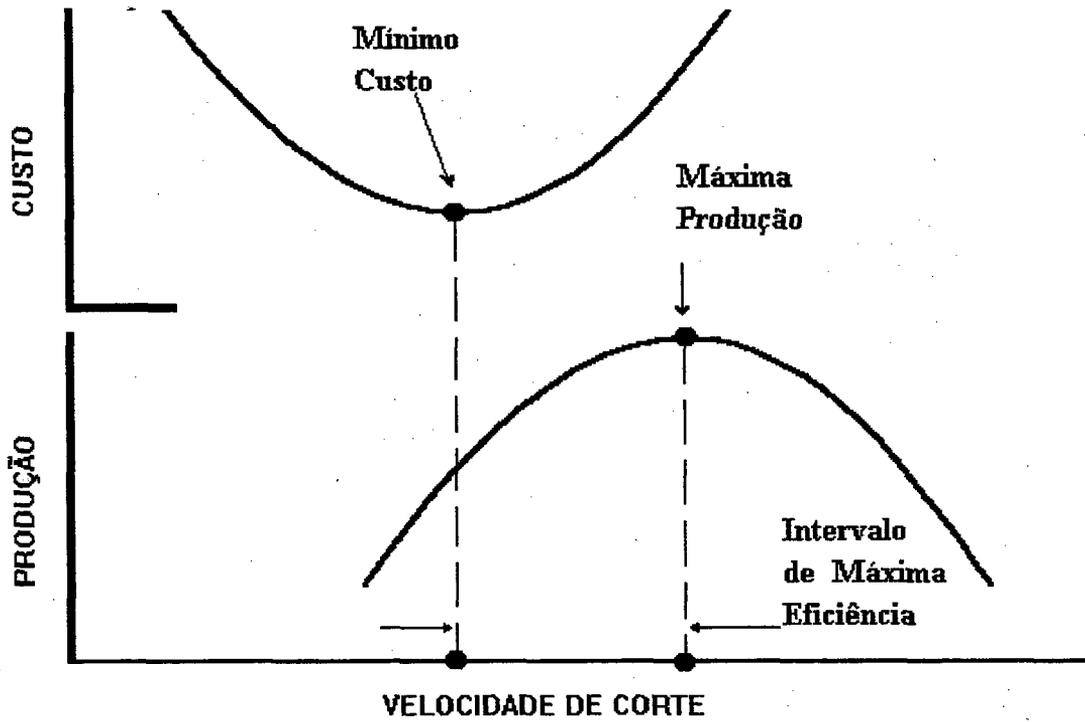


Figura 2.8 - Variação do custo de usinagem e tempo de produção em função da velocidade de corte, faixa de máxima eficiência

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE ENSAIOS DE USINAGEM PARA OBTENÇÃO DOS DADOS TECNOLÓGICOS DO SISTEMA.

Os ensaios de usinabilidade tem sido utilizados na indústria e na pesquisa, desde os trabalhos de Taylor no início do século, porém muitos destes resultados eram confusos e até mesmo contraditórios. No sentido de estabelecerem padrões para os mesmos, surgiu a norma ISO-3685 em 1977, tendo sido recentemente atualizada em 1993 [17]. A partir desta norma de 1977, surgiram ainda novas propostas de metodologias de ensaios em laboratório que oferecem maior precisão e confiabilidade [09,19].

Um dos aspectos mais positivos destas metodologias propostas é o uso de ensaios de longa duração no lugar dos ensaios de curta duração. Os ensaios de longa duração, são mais representativos das condições reais, porque não empregam condições forçadas de usinagem como as utilizadas nos ensaios de curta duração [19,20]. Além disto a padronização permite estabelecer comparações precisas entre resultados de diferentes fontes.

No entanto, tem se questionado quanto às discrepâncias verificadas entre os dados de vida da ferramenta, obtidos em condições de laboratório e os dados encontrados em operações de usinagem nas indústrias [15]. Isto leva a se considerar os dados de vida da ferramenta provenientes de diferentes fontes de informação "apenas como índices recomendados, porém sujeitos a grandes alterações" [15], quando transpostos para as condições efetivas de uso.

A presente proposta de metodologia de aquisição de informações tecnológicas para o Sistema DADUS, pretende adaptar os ensaios de usinagem a uma situação mais próxima das condições efetivas de uso, de forma a tornar estes ensaios mais significativos. Para isto, levam-se em conta fatores como o uso da própria máquina onde será empregada a ferramenta e o uso da geometria de corte mais indicada para a operação, ao invés de uma operação padronizada comum aos métodos correntes.

Nos próximos itens serão apresentadas informações sobre o material a ser usinado o corpo de prova, a ferramenta a ser testada, a máquina-ferramenta, as condições de usinagem, o procedimento de ensaio e o tratamento dos resultados obtidos.

3.1. Corpo de Prova.

Todo material a ser empregado na usinagem dos corpos de prova deverá ser proveniente de uma única corrida [43], de forma a se ter a maior homogeneidade possível entre os corpos de prova. O material deverá ainda ser caracterizado quanto à sua classe, composição química, propriedades mecânicas, microestrutura, tratamento térmico e processo de obtenção (laminado, forjado, fundido, etc) [17] de forma a se obter dados suficientes para avaliar e comparar com os resultados obtidos em outras fontes de informação.

Nos procedimentos de classificação do material para o corpo de prova deve-se utilizar de preferência as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), tanto para a identificação da composição química do material quanto para o emprego dos métodos e procedimentos de ensaios de tração, de dureza e metalográfico. Caso não seja possível o uso de normas nacionais, deve-se dar preferência ao uso da norma internacional ISO (International Organization for Standardization) evitando-se, na medida do possível, o emprego de normas de países específicos.

Para a determinação da dureza do material a ser empregado nos ensaios de usinagem, deve-se retirar corpos de prova da extremidade de cada barra ou tubo [17]. Quando se tratar de ensaio de usinabilidade em peças num processo de produção ou em pequenas quantidades de material, os ensaios de dureza podem ser feitos por amostragem. Em casos extremos, os ensaios de dureza podem ser efetuados em apenas um corpo-de-prova retirado da extremidade de uma das barras, tubo ou peça. Recomenda-se que o material não tenha variação de dureza superior a $\pm 5\%$ do valor médio encontrado.

O material para ensaio de tração deve ser retirado do próprio corpo-de-prova de usinagem ou ainda obtido a parte, desde que pertença a uma mesma corrida. Os corpos de prova para o ensaio de tração devem ser confeccionados de forma diferente para cada tipo de material de acordo com a NBR-6152.

A microestrutura do material deve ser estudada por metalografia quantitativa, com ampliações de 100x a 500x, de forma a se obter o tamanho de grão, número de inclusões, o

tipo de matriz, a forma do grão e o grau de encruamento. Quando não for possível ensaios metalográficos quantitativos, deve-se obter micrografias do material em análise.

O ensaio de usinagem deve ocorrer apenas na região do corpo-de-prova, onde a dureza e a microestrutura estejam dentro dos limites estabelecidos em norma, para tanto devem ser realizados cortes de limpeza do material, para remoção de superfícies com deformações plástica, oxidadas, brutas de fusão e encruadas irregularmente. Isto não se aplica à superfície endurecida pela pré-usinagem.[17].

A relação comprimento/diâmetro do corpo de prova, deve ser tal que não facilite vibrações regenerativas. Para tanto, esta relação deve ser menor ou igual a 10 ($L/D \leq 10$), com diâmetro inicial mínimo de 90mm [17]. No sentido de evitar interrupções excessivas durante o ensaio, é recomendado um comprimento mínimo de 300 mm. No caso de ensaios com máquinas possuindo variação escalonada de rotações, deve-se aumentar este comprimento para 500mm, de forma a facilitar o procedimento de ensaio e obter maiores tempos de usinagem por passe. Neste caso, também se recomenda um diâmetro inicial mínimo de 150mm.

A forma do corpo-de-prova pode ser escolhida entre maciça ou vazada, sendo a última mais apropriada principalmente para ferro fundido, pois proporciona normalmente, maior homogeneidade da microestrutura ao longo da secção transversal, além de facilitar o cumprimento das especificações dimensionais com maior aproveitamento do material. Considerando a complexidade do processo de fabricação do aço e a homogeneidade da sua microestrutura ao longo da secção transversal do corpo-de-prova é mais recomendada a utilização da forma obtida a partir da barra maciça.[19,43].

A fixação do corpo-de-prova no torno deve ser por placa e ponta rotativa, de tal maneira que garanta a estabilidade e a rigidez durante o processo de usinagem. Quando se tratar de ensaio de usinagem em peças de produção industrial, as fixações devem ser as mesmas empregadas normalmente pelo processo.[17]

3.2. Ferramenta.

A metodologia proposta se aplica a ferramentas de insertos intercambiáveis em metal duro ou em material cerâmico. Estes materiais foram escolhidos devido a sua utilização cada vez maior em processos de usinagem. Além disso, as ferramentas de insertos intercambiáveis apresentam maior facilidade para medições de desgaste do gume, devido à facilidade com que o inserto pode ser removido do porta ferramentas.

Esta metodologia mantém livre a seleção de insertos e porta ferramentas para o ensaio [17], desta forma a classe e a geometria da ferramenta devem ser selecionados de acordo com as condições de usinagem possíveis de serem adotadas pelo processo, no entanto, recomenda-se adotar uma classe que represente o campo de aplicação o mais abrangente possível.

Na seleção de insertos sugere-se o uso de materiais classe ISO, de P10 a P30 para a usinagem de aços e os de classe K10 a K20 para a usinagem de ferro fundido [43]. Quando o inserto for do tipo revestido, o revestimento deve ser especificado, bem como a classe básica do substrato. Em caso de material cerâmico deve ser informado o componente básico da cerâmica [17].

Para a aplicação do Sistema Dadus em operações de torneamento externo devem ser utilizados insertos com formas normalizadas pela ISO-1832 e porta ferramentas de acordo com a ISO-5608. No caso de ensaios de insertos com quebra-cavacos sinterizados, bem como com quebra-cavacos postiço, o ângulo do quebra-cavaco deve ser informado no relatório de ensaio.

Os ângulos de trabalho da ferramenta utilizados no ensaio devem ser os especificados para o par inserto/porta ferramentas, não devendo a geometria do corte ser alterada por giro do carro porta ferramentas, sendo a tolerância para todos os ângulos de $\pm 0,5^\circ$ [17].

A correta localização da altura da ferramenta ocorre, posicionando-se a quina na altura do eixo de rotação da peça, com o mínimo comprimento em balanço possível para o porta ferramentas em teste. A face e os flancos do inserto devem estar adequadamente assentados na sede do porta ferramenta, para tanto, deve-se garantir que o mesmo esteja livre de qualquer corpo estranho, fazendo-se uma limpeza da sede com ar comprimido cada vez que o inserto for fixado.

Cada gume de ferramenta a ser utilizado, deve sofrer uma inspeção prévia para verificação de possíveis falhas, empregando-se um microscópio com ampliação mínima de 10x. Quando disponível um projetor de perfis, deve-se também inspecionar a quina da ferramenta utilizando-se gabaritos para verificação de raios.

3.3. Máquina Ferramenta.

O torno a ser utilizado no ensaio de vida do gume, deve ser estável, estar em boas condições de uso e não deve apresentar tendência a vibrações ou deformações anormais nas condições impostas pelo ensaio, de forma a não influir no desgaste da ferramenta.[17]

Caso o ensaio se realize em condições efetivas de uso, toda atenção deve ser dada na verificação destas condições, pois normalmente máquinas em uso contínuo sofrem desgaste mais intenso, levando a maiores folgas. Uma máquina em más condições de conservação ou sem rigidez suficiente para o processo de usinagem, invalida todo o ensaio. Deve-se dar preferência ao uso de máquinas com variação contínua de rotações, pois estas possibilitam um menor tempo de ensaio e menor consumo de material.

Caso seja necessário o uso de máquina com variação escalonada de rotações, deve-se proceder um planejamento antecipado dos locais de corte, de acordo com as velocidades desejadas e as rotações disponíveis na máquina ferramenta. Para um uso racional do material, deve-se planejar o ensaio de modo a intercalar passes com diferentes velocidades de corte, de maneira que a perda de material entre dois passes seja a mínima possível.

Para se proceder o cálculo dos diâmetros, onde devem ser realizados os cortes para uma determinada velocidade, usa-se a seguinte equação,

$$D_i = \frac{V_c \cdot 1000}{N_i \cdot \pi} \quad \text{para } i = 1, 2 \dots n \quad (3.1)$$

onde,

V_c : velocidade de corte do ensaio,

N_i : é a i -ésima rotação disponível no torno,

D_i : é o i -ésimo diâmetro no qual deve se proceder o ensaio para uma dada V_c .

A máquina deve passar por um procedimento de calibração antes dos ensaios; as seguintes tolerâncias devem ser verificadas nos seus sistemas de acionamentos para que se garantam as condições de usinagem [09, 36]:

Acionamento de avanço: -2% a +3%;

Acionamento da profundidade de corte: $\pm 5\%$,

Acionamento do eixo árvore : $\pm 2\%$.

3.4 - Condições de Usinagem.

A equação expandida de Taylor, equação (2.10), é um modelo matemático, onde sua constante e seus expoentes, ponderam a influência das condições de usinagem, da vida da ferramenta, e do tamanho da marca de desgaste sobre a velocidade de corte para um determinado par ferramenta/material.

Para realizar testes que levem a determinação dos seus parâmetros (constante C, e expoentes E, F, G, H) faz-se necessário o uso de diferentes condições de usinagem. Para tanto recomenda-se usar [43,19] nos ensaios:

de 3 a 6 velocidades de corte;

de 3 a 5 avanços;

de 2 a 3 profundidades de corte.

As velocidades de corte devem ser escolhidas de modo a que sigam uma série geométrica. Como orientação deve-se escolher, para cada tipo de material, os seguintes números normalizados como razão da série de velocidades [17]:

Metal duro : $r=1,12$ (R20)

Material cerâmico : $r=1,25$ (R40)

Os avanços e profundidade de corte devem ser escolhidos em função do material a ser usinado, do inserto, e da capacidade da máquina a ser utilizada no ensaio. Estes devem ainda

ser selecionados de forma abrangente, dentro de um campo de operações que vai desde o desbaste até o acabamento [19].

As condições de avanço e profundidade de corte devem no entanto ser mantidas dentro de certos limites estabelecidos dentro das áreas triangulares mostradas na figura 3.1, que são definidas pelas seguintes equações [17],

$$f_{\text{máx}} = 0,8 \cdot r_{\epsilon} \quad (3.2)$$

$$a_{\text{pmin}} = 2 \cdot r_{\epsilon} \quad (3.3)$$

$$a_{\text{pmáx}} = 10 \cdot f \quad (3.4)$$

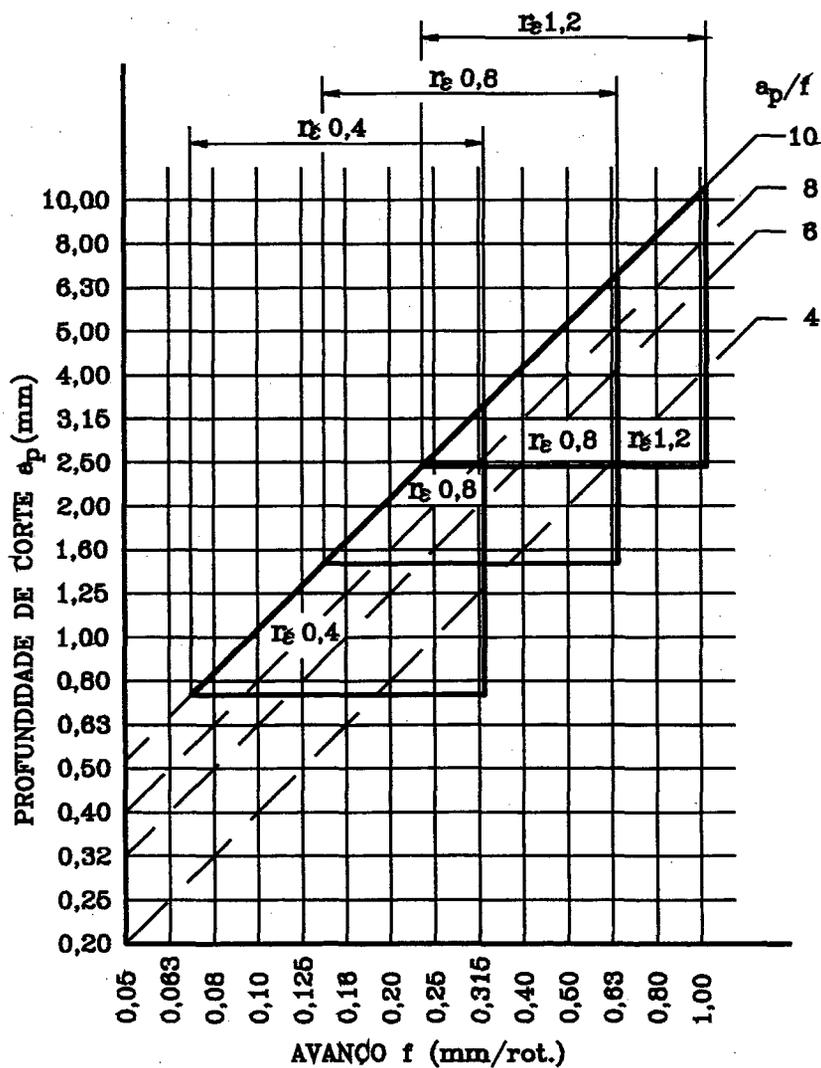


Figura 3.1 limites das condições de usinagem segundo ISO-3685[17]

A utilização de profundidades de corte menores que a indicada pela equação (3.3) podem tornar difícil e pouco preciso o procedimento de medição do desgaste da ferramenta.

As combinações das condições de usinagem utilizadas são de suma importância pois podem levar a conclusões incorretas, neste sentido deve-se evitar ensaios diagonalizados, pois estes podem permitir que se estabeleçam relações incoerentes entre a velocidade de corte e os expoentes da profundidade de corte e avanço [44].

A tabela 3.1 mostra um plano de ensaios onde as combinações em itálico indicam o conjunto mínimo de condições a utilizar em um ensaio de vida do gume da ferramenta [43]:

<i>$V_{c1} f_1 a_{p1}$</i>	$V_{c1} f_2 a_{p1}$	$V_{c1} f_3 a_{p1}$	
<i>$V_{c2} f_1 a_{p1}$</i>	<i>$V_{c2} f_2 a_{p1}$</i>	<i>$V_{c2} f_3 a_{p1}$</i>	<i>$V_{c2} f_1 a_{p2}$</i>
<i>$V_{c3} f_1 a_{p1}$</i>	$V_{c3} f_2 a_{p1}$	$V_{c3} f_3 a_{p1}$	

Tabela 3.1 - Plano de ensaio com o número mínimo de combinações.

3.5 -Desgaste de ferramenta.

Como foi discutido no capítulo 2, os desgastes mais frequentes em operações de torneamento são o desgaste de flanco ou superfície de incidência e o desgaste de cratera.

O tipo de desgaste usado como critério de fim de vida, deve ser aquele que mais contribui para o fim da vida útil da ferramenta. O tipo e o valor do desgaste admissível devem constar no relatório de ensaio. Caso não seja claro qual o mecanismo de desgaste dominante pode-se usar duas curvas $V_c \times T$ ou um critério misto, o que resulta numa reta $V_c \times T$ "quebrada", como mostra a figura 3.2.

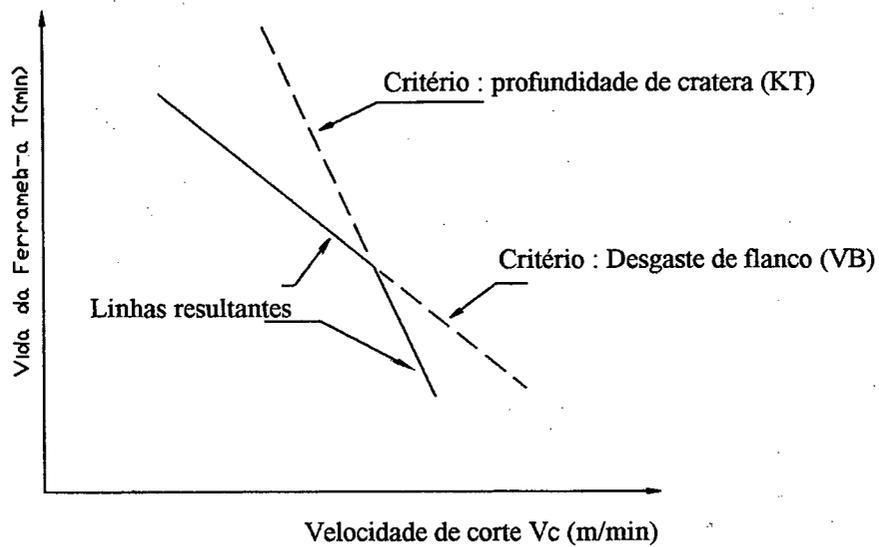


Figura 3.2 - Curva Vc x T em escala Log-Log [17].

A tabela 3.2 traz valores indicativos para VB , VB_{máx}, KT e KM/KT para metal duro e cerâmicas, podendo estes sofrerem variações de $\pm 50\%$, a depender das necessidades do ensaio. Valores muito pequenos levam a uma grande dispersão no resultados, o que é indesejável, já valores elevados aumentam consideravelmente os custos.

Critério	Valores iniciais
VB(mm)	0,3
VB _{máx} (mm)	0,6
KT(mm)	$K_t=0,06+0,3.f$
KM/KT	0,1

Tabela 3.2 -Valores sugeridos para os critérios de fim de vida.

3.6 - Fluido de corte

Quando da usinagem de aços com metal duro ou cerâmicas, normalmente não se utilizará fluido de corte. Já no caso de ferro fundido, o fluido de corte não deve ser utilizado.

Quando da utilização de fluido de corte o fluxo deve estar sobre a parte ativa da ferramenta. O fluxo do fluido não deve ser inferior a 3 l/min ou 0,1 l/min por cm^3 de metal removido. O diâmetro do orifício de saída, o fluxo e a temperatura do reservatório de fluido de corte devem estar presentes no relatório de ensaios.[17]

3.7 - Procedimento de Ensaio.

Ao inicializar os testes, a máquina deve ter os seus sistemas de acionamento calibrados a fim de serem verificadas as tolerâncias indicadas no item 3.3.

Uma vez definidas as condições de ensaio (V_c , a_p e f), devem ser preparados os planos de corte e as planilhas de resultados para cada condição de usinagem. Também devem ser montados os conjuntos operacionais de usinagem e de medições, de forma a facilitar o trabalho da aquisição de dados.

As medidas devem ser realizadas a intervalos de tempo convenientes, estes intervalos devem ser definidos de forma a se obter um mínimo de 4 medições para a vida da ferramenta. [17] Os intervalos de tempo devem ser ainda, sempre que possível, de mesma amplitude para uma dada condição de corte; em máquinas de variação escalonada, há dificuldade operacional na obtenção de intervalos de tempo constantes, pois os passes de cada condição se alternam. Neste caso sugere-se adotar relações menores que 2:1. entre os intervalos de tempo.

3.8 - Análise e processamento dos resultados

Os resultados obtidos devem ser tratados de forma a se obter a equação da curva ajustada de cada condição de ensaio, este tratamento pode ser realizado através de regressão linear simples, utilizando-se pacotes estatísticos disponíveis em programas de planilhas

eletrônicas [45]. Estas equações tem dois objetivos, a saber: o primeiro é permitir uma análise da qualidade das leituras efetuadas, o outro objetivo é normalizar os dados, de forma a que se possam utilizar intervalos de tempo iguais para uma dada condição de ensaio.. Os resultados assim tratados são então processados em programa de regressão linear múltipla também disponível em planilhas eletrônicas[45]. Uma vez processados, o programa fornecerá a constante C e os expoentes F, E, G e H da equação expandida de Taylor.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Neste capítulo será descrito um ensaio realizado para a determinação dos parâmetros da equação expandida de Taylor, para um par material/ferramenta utilizando a metodologia descrita no capítulo anterior.

Durante todo o desenvolvimento do Sistema DADUS os parâmetros do par material/ferramenta empregados foram retirados de dados da literatura disponível [07, 09]. Se por um lado, para efeito de desenvolvimento estes eram satisfatórios, por outro lado impossibilitavam um estudo de caso, principalmente por serem em sua maioria relativos a materiais estrangeiros, ou a ferramentas antigas de pouca utilização na atual conjuntura. Os ensaios foram realizados no setor de Serviços para Terceiros do Departamento de Mecatrônica pertencente a Escola Técnica Tupy em Joinville.

O par em questão era de interesse tanto da Escola Técnica Tupy como do representante de um fabricante das ferramentas, que forneceu os insertos para este ensaio.

4.1. Caracterização do material a ser utilizado.

As propriedades químicas e mecânicas de um material influenciam sobremaneira a sua usinabilidade, sendo portanto necessário estudá-las pois, materiais de mesma nomenclatura podem ter variações razoáveis destas propriedades dentro de faixas determinadas em norma, como a norma brasileira para classificação de aços por composição química a NBR-6006.

O material para este ensaio foi fornecido como aço de construção mecânica ABNT-1020, sob a forma de uma barra laminada com diâmetro de 152,4 mm(6") e comprimento de 2500 mm. A mesma foi dividida em 5 corpos de prova com 500 mm cada.

A escolha do material foi feita levando-se em conta ser este um aço de grande utilização em várias peças usinadas nas oficinas da Escola Técnica Tupy.

4.1.1. Análise química.

A análise química do material foi realizada pelo laboratório de química quantitativa do Departamento de Materiais da Escola Técnica Tupy. Para esta análise foram retiradas amostras de um disco de 20 mm de espessura, retirado de um dos corpos de prova para ensaio de dureza. As amostras foram retiradas em três pontos distintos a saber: próximo a periferia, a metade do raio e próximo ao centro do disco. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 4.1.

Ident.	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	P (%)
Centro	0,200	0,093	0,470	0,025	0,031
Meio-Raio	0,210	0,093	0,470	0,025	0,030
Periferia	0,200	0,093	0,460	0,023	0,030
Média	0,203	0,093	0,467	0,024	0,030
D.P.	0,006	0,000	0,006	0,001	0,001

Tabela 4.1- Composição química percentual em peso da amostra.

Com base nestes dados pode-se classificar este material de acordo com a norma NBR-6006 [46], como um aço de construção mecânica ABNT-1020. Nota-se pelos resultados a homogeneidade da composição química do material no que tange aos componentes analisados nas suas três diferentes camadas.

4.1.2. Análise metalográfica.

A verificação da micro estrutura do material foi feita a partir de duas amostras retiradas do disco usado para os ensaios de dureza, sendo uma retirada das proximidades do núcleo e a outra próxima da periferia, conforme indicado na figura 4.5 que mostra as posições em que foram realizados os ensaios de dureza.

O material é constituído por uma matriz ferrítica em grãos equiaxiais, tendo uma pequena variação entre periferia e núcleo. Pela análise da micrografia encontra-se na periferia 82% de ferrita e 18% de perlita, já próximo ao centro encontra-se 74% de ferrita e 26% de

perlita, conforme pode-se observar nas figuras 4.1 e 4.2 respectivamente, com tamanho de grão N°4,5 no núcleo e N°6 na periferia segundo NBR-6000 [47].

Analisou-se também o grau de encruamento de acordo com o método comparativo, e o valor encontrado foi menor que 10% [48]

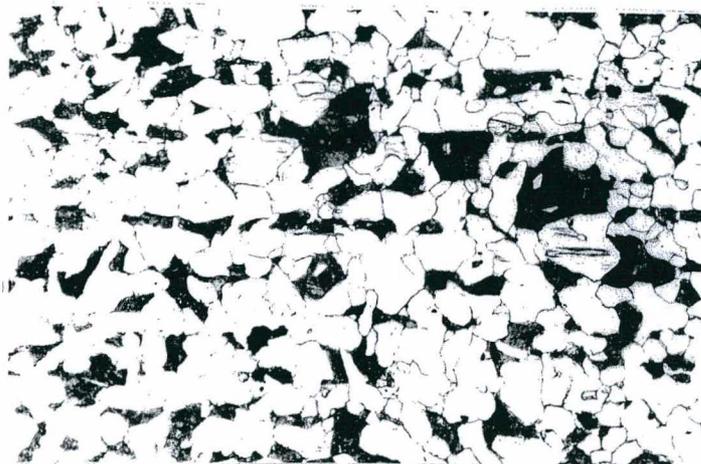


Figura 4.1 - Micrografia do aço ABNT 1020, região próxima ao núcleo do corpo de prova. Ampliação 100X, ataque nital 4%.

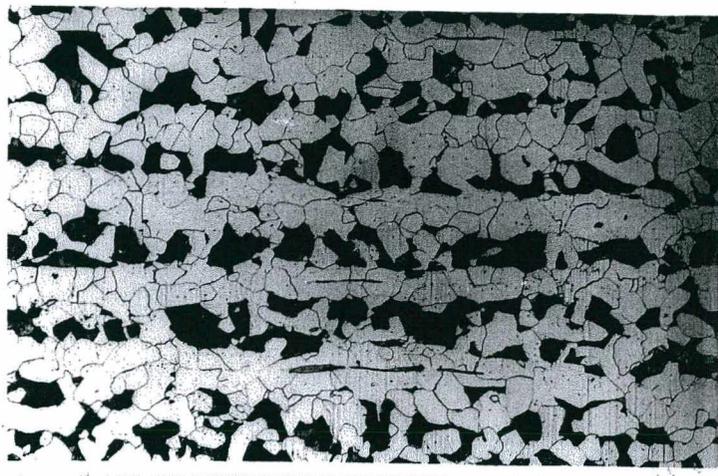


Figura 4.2 - Micrografia do aço ABNT 1020, região próxima a periferia do corpo de prova. Ampliação 100X, ataque nital 4%.

As figuras 4.3. e 4.4 mostram inclusões de sulfetos encontradas no material, sendo estas, de mesmas características no núcleo e na periferia. As inclusões foram classificadas segundo a ASTM* - E45 - método D como sendo do tipo A (sulfetos) de série fina, nível 1.

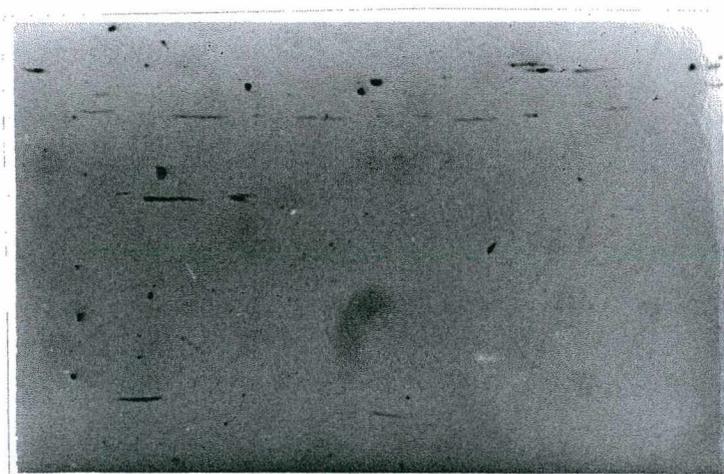


Figura 4.3 - Micrografia do aço ABNT 1020, aspecto das inclusões de sulfeto de manganês. Ampliação 50X, sem ataque

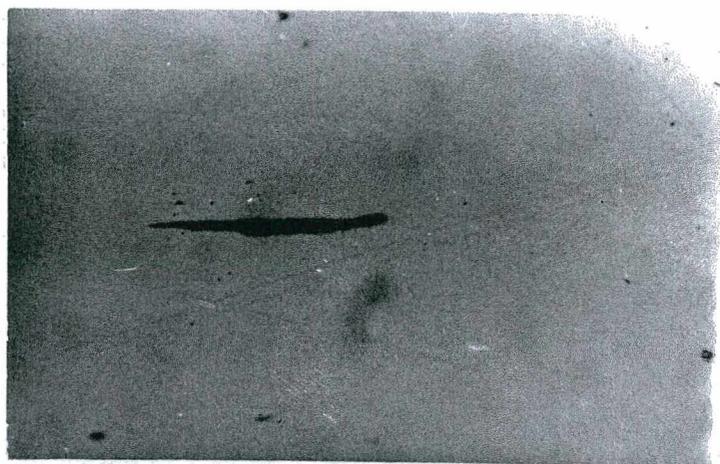


Figura 4.4 - Micrografia do aço ABNT 1020, aspecto das inclusões de sulfeto de manganês. Ampliação 200X, sem ataque

A matriz ferrítica implica na tendência a formação de gume postiço, principalmente em velocidades de corte inferiores a 100m/min, já a presença do sulfeto de manganês facilita a quebra do cavaco e melhora a qualidade superficial da peça.[10]

Todas as micrografias deste ensaio foram feitas com um microscópio Enest Leitz Wetzlar, adaptado com câmara fotográfica, com ampliações de 50x, 100x, 200x, 400x e 1000x

4.1.3. Ensaios mecânicos.

4.1.3.1. Ensaio de dureza

O corpo de prova para o ensaio de dureza era constituído de um disco com espessura de 20 mm, extraído de uma das barras. Após ser separado da mesma, lhe foi dado acabamento onde ambos os lados foram faceados, garantindo uma superfície de boa qualidade para realizar as impressões.

O ensaio constou de 9 impressões, sendo estas distribuídas em três circunferências concêntricas com diâmetros de 45 mm, 85 mm e 125 mm respectivamente, de forma a garantir um máximo espaçamento entre as mesmas, pois, segundo a NBR-6394 a distância mínima entre as impressões deve ser de 4 vezes o diâmetro da esfera, quando se tratar de materiais ferrosos [49]. A figura 4.5 mostra como foram realizadas as impressões, e as regiões hachuradas A e B mostram de onde foram retirados os corpos de prova para ensaio metalográfico. A espessura mínima do corpo de prova para que este não sofra deformações no lado oposto também especificada na mesma norma, é dada pela equação 4.1.

$$e_{\min} = 17 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot HB} \quad (4.1)$$

onde,

e_{\min} : Espessura mínima do corpo de provas (mm)

F : força de ensaio (N).

D : Diâmetro da esfera (mm).

HB :Dureza HB.

Utilizando-se a equação anterior, encontra-se como espessura mínima para o corpo de prova 11,85mm, ou seja, um valor bem inferior ao utilizado.

As Impressões foram obtidas usando-se esfera com diâmetro de 10 mm, uma carga de 29420 N (3000 Kgf), aplicada por 30 segundos. Usou-se como diâmetro das impressões a média de duas leituras perpendiculares. Os resultados das leituras já em dureza HB encontram-se na tabela 4.3.

Dureza Brinell - Esf. 10mm - F=29.420N - T=30s					
Diâm.(mm)	1	2	3	Média	D.P.
30	140	143	137	140	2,4
80	134	140	137	137	2,4
130	134	134	131	133	1,4

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de dureza no aço ABNT 1020.

Com estes resultados pode-se dizer que a amostra tem uma dureza média de 137 HB com desvio padrão de 3,6. Assim pode-se determinar o intervalo de confiança dos resultados com base na fórmula 4.2.

$$\overline{HB} \pm t_c \frac{DP}{\sqrt{N-1}} \quad (4.2)$$

Onde :

HB: Dureza Média.

N : Tamanho da amostra(Nº de impressões)

t_c : Valor percentil para distribuição de Student com 95% de confiança, com N=9, $t_c=2,26$ [50].

Assim pode-se afirmar que a dureza do corpo de prova é de $134 \leq HB \leq 140$ com confiança de 95%.

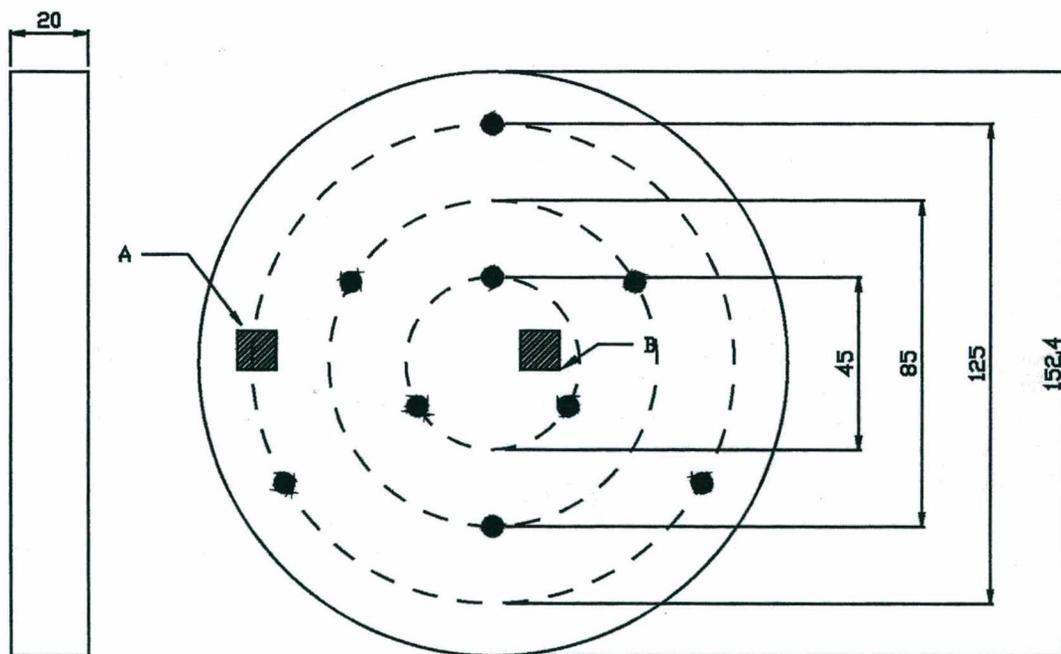


Figura 4.5 Corpos de prova para ensaios metalográfico e de dureza.

4.1.3.2. Ensaio de tração.

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram retirados do núcleo de uma das barras após a usinagem, pois as outras propriedades examinadas não tinham grandes variações entre periferia e centro, bem como, permitiu economizar material para o ensaio de desgaste da ferramenta. Os corpos de provas foram confeccionados segundo norma NBR-6152 [51] e a figura 4.6 mostra a forma dos mesmos.

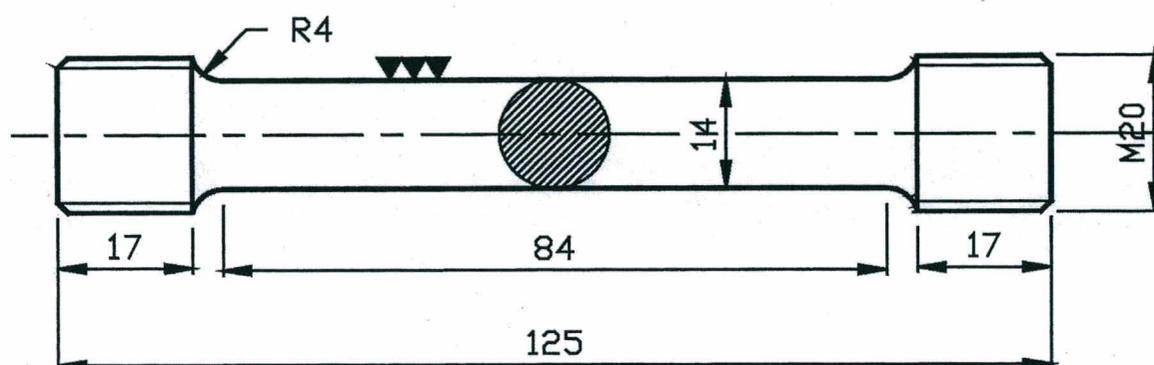


Figura 4.6 Corpo de prova para ensaio de tração conforme NBR-6152.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais da Escola Técnica Tupy, e foi utilizada uma máquina Universal para ensaios marca Wolpert, Tipo-U20, fabricada pela Otto Wolpert Werke- Alemanha. Os resultados encontram-se na tabela 4.4.

CP	Limite de Escoamento (N/mm ²)	Limite de Tração (N/mm ²)	Alongamento (%)	Redução de Área (%)
1	312,86	477,12	21,97	25,58
2	314,66	475,27	25,40	36,59
3	316,66	471,76	21,14	25,73
Média	314,73	474,72	22,84	29,30
D.P.	1,90	2,72	2,26	6,31

Tabela 4.4- Resultados dos ensaios de tração do aço ABNT 1020.

4.2. Características dos equipamentos utilizados nos ensaios de usinagem e nas calibrações dos acionamentos do torno.

- a- Torno ROMI Tormax 30.
Fabricante - Indústrias Romi S.A. - Brasil.
Distância entre pontas - 1500mm.
Diâmetro máximo torneável- 420 mm
Potência Nominal - 7,5 CV (5,5KW)

- b- Microscópio para medições de ferramentas.
Fabricante - Leitz Wetzlar - Alemanha.
Ampliação - 20x e 30x
Resolução dos tambores micrométricos - 0,01mm
Resolução do movimento de giro da placa - 1' (1 minuto)

- c- Microscópio para metalografia.
Fabricante - OLIMPUS - Japão.
Ampliações - 60x, 100x, 400x, 1000x.
Resolução da escala para 100x - 0,01mm

- d - Prensa manual para fixação de corpos de prova de metalografia.
Fabricante : Leitz Wetzlar - Alemanha.

- e- Tacômetro digital portátil
Fabricante - MITUTOYO - Brasil.
Faixa de indicação - 0 à 9999 rpm.
Resolução - 1 rpm.

f- Ferramenta e porta-ferramenta.

f.1 - Ferramenta - Inserto intercambiável de metal duro.

Fabricante - SANDVIK-Coromant / Brasil.

Código da geometria - TNMM 160408 - QR.

Formato - Triangular com comprimento de gume= 16,5 mm

Ângulo de quina (ϵ) = 60°

Raio de quina (r_{ϵ}) = 0,8mm

Quebra-cavaco sinterizado com ângulo de saída $\gamma_c = 20^\circ$. [53]

Número de Gumes = 3.

Classe ISO - P35 (Centro do campo de abrangência).

Classe do Fabricante - GC 435.

Cobertura - tripla cobertura de TiN , Al₂O₃ e TiC.

f.2 - Porta-ferramenta .

Fabricante : SECO TOOLS - Brasil.

Código - PTJNR 2525 -16A

Comprimento da haste - 150mm

Ângulo de saída: $\gamma = -6^\circ$

Ângulo de inclinação : $\lambda = -6^\circ$

Ângulo de posição : $\kappa = 93^\circ$

g - Paquímetro.

Fabricante - Mitutoyo - Japão.

Faixa de indicação - 0 à 300mm.

Resolução - 0,05mm.

h- Relógio comparador e base magnética.

Fabricante - Mitutoyo - Brasil.

Faixa de indicação - 0 à 10mm.

Resolução - 0,01mm.

i - Projetor de perfis.

Fabricante - Mitutoyo - Japão.

Ampliações - 10x, 20x e 50x

Resolução dos tambores micrométricos - 0,005mm

4.3. Calibração dos sistemas de acionamentos do torno Tormax 30.

Para proceder a calibração, a máquina foi inicialmente posta a funcionar por uma hora em baixa rotação, e os carros transversal e longitudinal foram movimentado várias vezes, para que a mesma estivesse em condições próximas as de regime em processo, quando do momento das aferições.[52]

O erro percentual entre o valor médio e o valor teórico foi calculado pela equação 4.3, e comparado com os limites de tolerância especificados no item 3.3 do capítulo anterior.

$$E\% = \frac{(V_m - V_t)}{V_t} \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde,

V_m : valor medido;

V_t : valor teórico;

E%: erro percentual.

4.3.1. Calibração do acionamento do eixo árvore.

As rotações foram medidas uma a uma, utilizando-se o tacômetro digital mencionado no item 4.2-e. As medidas foram realizadas acoplado a ponteira de borracha do tacômetro diretamente contra a placa com as castanhas fechadas, e isentas de sujeira e óleo. Na tabela 4.6 encontram-se os valores teóricos e os valores medidos para as rotações. Como o erro encontrada foi em geral maior que 2% (em média 5,5%), os valores medidos foram usados em

lugar dos valores teóricos, tanto nos ensaios como para alimentar o arquivo tecnológico do Sistema Dadas.

V. Teórico (rpm)	Leitura 1 (rpm)	Leitura 2 (rpm)	Leitura 3 (rpm)	Média (rpm)	D.P.	Erro %
45	47	47	47	47	0,0	4,4
71	75	75	76	75	0,6	5,6
90	95	95	95	95	0,0	4,4
112	119	120	119	119	0,6	6,3
140	151	149	149	150	1,2	7,1
180	190	191	190	190	0,6	5,6
224	236	236	236	236	0,0	5,4
265	286	287	287	287	0,6	8,3
280	298	302	299	300	2,1	7,1
355	374	375	375	375	0,6	5,6
355	378	381	381	380	1,7	7,0
450	458	458	457	458	0,6	1,8
560	600	599	600	600	0,6	7,1
560	600	600	600	600	0,0	7,1
710	725	725	724	725	0,6	2,1
900	950	950	950	950	0,0	5,6
1120	1157	1156	1156	1156	0,6	3,2
1400	1511	1511	1512	1511	0,6	7,9
1800	1822	1824	1825	1824	1,5	1,3
2240	2381	2383	2381	2382	1,2	6,3
Média do Erro % =						5,5

Tabela 4.6 - Resultados da calibração da sistema de acionamento do torno ROMI Tormax 30.

4.3.2. Calibração do sistema de avanços.

O sistema de acionamento dos avanços foi calibrado em três pontos ao longo das guias, sendo estes, o início, o meio e o fim do percurso que o carro longitudinal teria durante os ensaios, e, tendo em vista a boa repetibilidade dos primeiros resultados, em cada ponto foram realizadas duas leituras. Foi calibrada uma ampla faixa de avanços de forma a se ter maior flexibilidade na escolha para os ensaios, visto que tendo uma máquina com uma pequena

potência, nem sempre poderia ser utilizada a melhor condição para o ensaio, além disto os resultados serviriam para o Sistema Dadus.

Para obtenção dos resultados foi utilizado um método simples, onde fixava-se um relógio comparador nas guias do torno por meio de uma base magnética, com a ponta de contato do relógio apoiando-se contra o carro porta-ferramenta, ao serem dadas dez voltas na placa era feita a leitura do deslocamento. Este resultado dividido por 10 corresponde ao avanço em mm/rotação. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.7.

V.Teórico (mm/rot)	Início (mm/rot)		Meio (mm/rot)		Fim (mm/rot)		Média (mm/rot)	ERRO (%)
0,062	0,063	0,062	0,062	0,061	0,061	0,061	0,062	0,54
0,077	0,077	0,076	0,075	0,077	0,077	0,075	0,076	1,08
0,085	0,085	0,085	0,084	0,085	0,085	0,085	0,085	0,20
0,100	0,100	0,100	0,099	0,100	0,105	0,100	0,101	-0,67
0,114	0,113	0,114	0,114	0,114	0,112	0,113	0,113	0,58
0,131	0,130	0,130	0,129	0,130	0,131	0,133	0,131	0,38
0,151	0,149	0,150	0,150	0,151	0,152	0,151	0,151	0,33
0,177	0,177	0,177	0,178	0,177	0,179	0,176	0,177	-0,19
0,201	0,201	0,201	0,201	0,200	0,199	0,201	0,201	0,25
0,238	0,236	0,236	0,236	0,235	0,235	0,238	0,236	0,84
0,278	0,277	0,278	0,277	0,279	0,276	0,275	0,277	0,36
0,327	0,325	0,325	0,325	0,325	0,325	0,323	0,325	0,71
0,372	0,372	0,372	0,377	0,369	0,370	0,370	0,372	0,09
0,433	0,432	0,432	0,432	0,430	0,432	0,432	0,432	0,31
0,523	0,524	0,522	0,525	0,522	0,520	0,521	0,522	0,13
0,580	0,581	0,580	0,580	0,576	0,580	0,582	0,580	0,03
0,682	0,680	0,680	0,679	0,682	0,682	0,683	0,681	0,15
Erro % Máx =								1,08

Tabela 4.7 - Resultados da calibração do sistema de avanço do Torno.

Os resultados foram satisfatórios pois nenhum dos avanços medidos teve erro maior que $\pm 3\%$, sendo que o maior erro foi de +1,08%. Por estes resultados podemos assumir os valores teóricos como verdadeiros para efeito dos ensaios.

4.3.3. Calibração do sistema de acionamento da profundidade de corte.

O acionamento da profundidade de corte é baseado num sistema parafuso/porca com anel graduado. No caso do torno utilizado nos ensaios o anel não mede a profundidade de corte, mas o quanto do diâmetro será retirado em um passe ou seja: 1,00mm na escala = 0,50 mm em profundidade de corte.

A calibração deste sistema foi realizada fixando-se a base magnética do relógio comparador numa superfície plana do carro longitudinal (inferior), e a ponta de contato do relógio contra o carro porta-ferramentas. As leituras foram realizadas em dois pontos, sendo o primeiro próximo ao local de diâmetro máximo do corpo de provas (150mm) e o segundo com aproximadamente a metade do diâmetro (75mm), em cada ponto foram feitas três leituras, cujos resultados são apresentados na tabela 4.8.

Leitura Anel (mm)	Equival. Prof.Corte (mm)*	Diâmetro=75mm					Diâmetro=150mm					Geral	
		L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Média (mm)	Erro (%)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Média (mm)	Erro (%)	Média (mm)	Erro (%)
1,00	0,50	0,50	0,50	0,49	0,497	-0,60	0,49	0,49	0,50	0,493	-1,40	0,495	-1,00
2,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,993	-0,70	1,00	1,00	1,00	1,000	0,00	0,997	-0,30
3,00	1,50	1,48	1,48	1,49	1,483	-1,13	1,50	1,50	1,51	1,503	0,20	1,493	-0,47
4,00	2,00	1,99	2,00	1,98	1,990	-0,50	2,00	2,00	2,00	2,000	0,00	1,995	-0,25
5,00	2,50	2,49	2,50	2,49	2,493	-0,28	2,49	2,49	2,51	2,497	-0,12	2,495	-0,20
6,00	3,00	2,99	3,00	2,99	2,993	-0,23	3,00	2,99	3,01	3,000	0,00	2,997	-0,10

Tabela 4.8 - Resultados da calibração do acionamento da profundidade de corte. As leituras no anel graduado equivalem ao dobro da profundidade de corte.

O maior erro percentual local foi encontrado na medida 0,50mm da região mais externa, ficando em -1,40%, já o maior erro em relação a média geral foi de -1,00% também na medida de 0,50mm, assim pode-se afirmar ser apropriado utilizar os valores do anel graduado divididos por dois como valor da profundidade de corte no ensaio, pois em nenhum caso superou-se o valor de $\pm 5\%$ estabelecido na metodologia.

4.4 - Condições de usinagem.

As condições de usinagem foram escolhidas de maneira a cobrir uma ampla faixa de velocidades de corte, avanço e profundidade de corte, dentro da faixa indicada pelo fabricante da ferramenta [53], levando-se em conta as limitações da máquina operatriz.

Além da limitação de ser uma máquina com variação escalonada de rotações, possui também uma potência útil limitada, o que obrigou a um estudo prévio das condições admissíveis, em função da potência útil, para isto foram feitas simulações de consumo de potência para várias condições de ensaio dentro da faixa desejada, até que se chegou a um conjunto racional de condições de corte.

Para determinar cada plano de trabalho, usou-se a equação 3.1, fazendo-se as rotações N_i iguais as rotações disponíveis no torno. Isto foi feito para cada condição proposta, e em seguida os resultados foram organizados em ordem decrescente dos diâmetros de usinagem. Todo o planejamento bem como as simulações foram realizados utilizando-se uma planilha eletrônica em microcomputador.[45]

A tabela 4.9 mostra as condições utilizadas no ensaios de vida de gume, e a tabela 4.10 mostra um dos planos de corte previamente montados para possibilitar o uso dos escalonamentos de forma a usinar alternadamente com as diferentes velocidades de corte, possibilitando o ensaio e um uso mais econômico do material a ser usinado.

Condição	1	2	3	4	5	6	7	8
Vc(m/min)	172	190	210	210	210	210	240	260
ap(mm)	1,6	2,5	1,6	1,6	1,6	2,5	1,6	1,6
f(mm/rot)	0,201	0,278	0,201	0,278	0,433	0,201	0,201	0,201

Tabela 4.9- Condições de usinagem utilizadas no ensaio.

A condição 3 foi tomada como condição inicial, e sobre ela foram feitas modificações para análise da influência dos parâmetros de corte, assim as condições 3, 4 e 5 apresentam variações de avanço, com velocidade e profundidade de corte constantes, na condição 6 a profundidade de corte é modificada e os demais parâmetros são os mesmos da condição 3, nota-se neste ponto que, na condição 6 há um relaxamento num dos limites estabelecidos pela metodologia ($a_{pm\acute{a}x} = 10.f$), isto deveu-se a necessidade de se utilizar a maior profundidade possível, e dentro da condição de potência máxima da máquina, tornaria inviável o seu uso com o avanço necessário em outras condições de comparação, como por exemplo a 8, isto porém não a invalida pois, segundo alguns autores é comum o uso do índice de esbeltez (ap/f) variando entre 4 e 20 [12]. As condições 1, 3, 7 e 8 apresentam entre si, apenas variação da velocidade de corte. A condição 2 apresenta variação dos três parâmetros, e foi utilizada para diminuir as repetições excessivas dos parâmetros, pois a muitas vezes isto leva a um resultado insatisfatório quando do processamento dos dados.[09]

V (m/min)	Rotação (RPM)	Di (mm)	Df (mm)	T (min)	ap (mm)	f (mm/rot)	
210	N12	458	145,95	142,75	5,26	1,6	0,201
260	N13	600	137,93	134,73	4,01	1,6	0,201
190	N12	458	132,05	127,05	3,80	2,5	0,278
260	N14	725	114,15	110,95	3,32	1,6	0,201
210	N13	600	111,41	108,21	4,01	1,6	0,201
190	N13	600	100,80	95,80	2,90	2,5	0,278
210	N14	725	92,20	89,00	3,32	1,6	0,201
260	N15	950	87,12	83,92	2,53	1,6	0,201
190	N14	725	83,42	78,42	2,40	2,5	0,278
172	N14	725	75,52	72,32	3,32	1,6	0,201
210	N15	950	69,80	66,60	2,53	1,6	0,201
190	N15	950	63,66	58,66	1,83	2,5	0,278
210	N16	1156	58,00	54,80	0,97	1,6	0,433
260	N17	1511	54,77	51,57	1,59	1,6	0,201

Tabela 4.10 - Exemplo do plano de ensaio para um corpo de prova, com distribuição dos cortes segundo os diâmetros e rotações.

4.5 - Procedimento de ensaio de vida do gume.

Cada corpo de prova era previamente usinado, para retirada da camada oxidada e superfície endurecida pela laminação. Este procedimento também facilitou a centragem da peça. Ambos os lados do corpo receberam furos de centro, e os corpos eram fixados entre placa de três castanhas e ponta rotativa. A figura 4.6 mostra o corpo de prova fixado no torno para o ensaio.

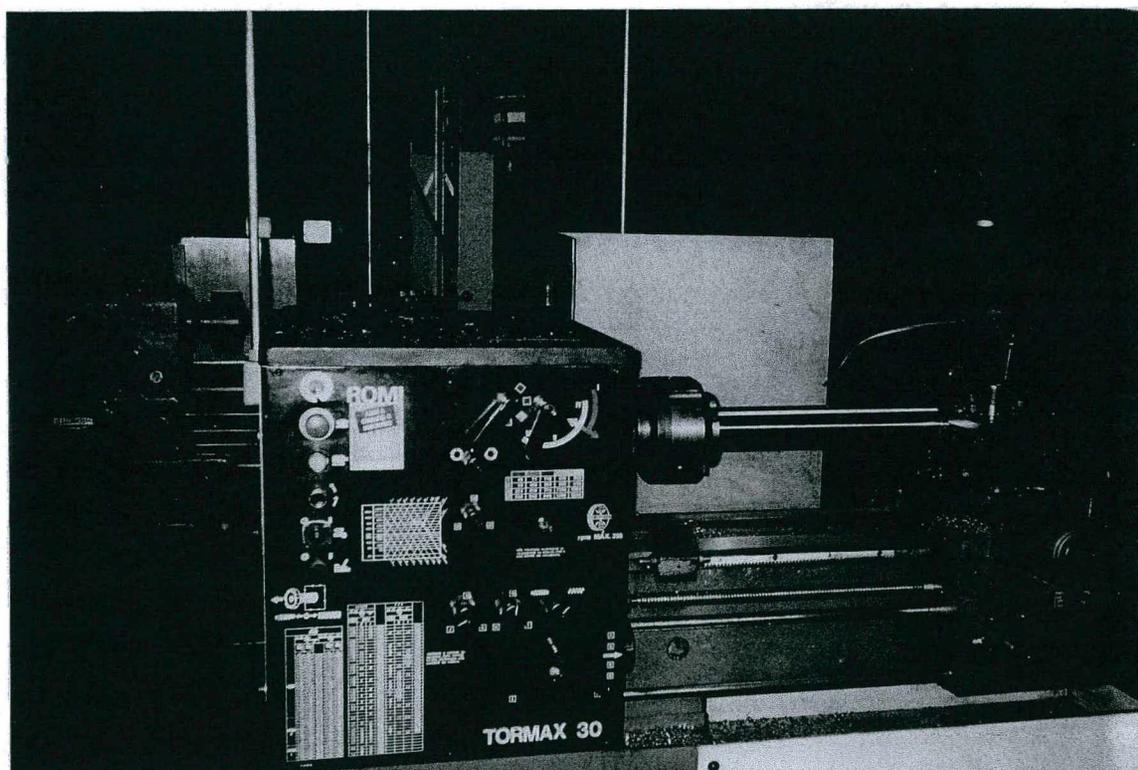


Figura 4.6 - Detalhe da fixação do corpo de prova no torno.

Dadas as dificuldades de ensaio com uma máquina de variação escalonada de rotações e a quantidade de material disponível para o ensaio, optou-se pela não realização de pré-ensaio. A determinação do número mínimo de observações, e a estimativa de vida para as condições dadas foram realizadas utilizando-se os dados de Mesquita[09] para um ensaio de aço ABNT-1038 com inserto P20. Isto implicou na necessidade de uma posterior análise pelo

teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov [54] nos dados obtidos para o aço ABNT-1020 com o inserto P35, afim de certificar-se da distribuição normal da amostra e se o número de observações utilizadas era suficiente. Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para o par ensaiado, bem como a determinação do tamanho mínimo da amostra encontram-se no apêndice II.

O ensaio foi realizado sem o uso de fluido de corte. Antes de iniciar o ensaio cada inserto tinha seu gume inspecionado em microscópio com ampliação de 30x, e o raio de quina em projetor de perfis com ampliação de 10x.

Para obtenção dos resultados, a usinagem dos corpos-de-prova era realizada da seguinte maneira: dividiam-se os passes previamente definidos em tabelas do tipo 4.10, em períodos de tempo regulares, aproximadamente iguais, de modo a obter-se um mínimo de 10 pontos para cada condição de usinagem, até se atingir o critério de fim de vida estabelecido inicialmente em 0,40 mm. Com a dificuldade de algumas combinações atingirem este objetivo, o mesmo foi reduzido para 0,35 mm.

A cada período de usinagem o inserto era removido, e levado ao microscópio de ferramentaria. Para se fazer a medição foi utilizado procedimento semelhante ao de fixação de corpos de prova em ensaios metalográficos: o inserto era fixado pela quina oposta a superfície a medir, em lâminas de aço por meio de massa de modelar, e prensado de modo a estabelecer o paralelismo entre a superfície de incidência e a lâmina. A figura 4.7 mostra um típico de desgaste de flanco ocorrido durante os ensaios.

Antes do inserto ser novamente fixado para continuar o ensaio, o porta ferramentas era limpo com um jato de ar-comprimido, para retirada de qualquer resíduo ali acumulado.

O ensaio para cada combinação era dado como encerrado ao se atingir o critério de fim de vida, caso este ocorresse com menos de dez observações, o ensaio era prolongado até este número.

4.6 - Determinação dos parâmetros da equação de Kienzle.

Por não se dispor de uma plataforma dinamométrica para medição de forças em operações de torneamento, os valores de $K_{c1.1}$ e de $(1-m_c)$ foram retirados da literatura especializada nacional [08]. Desta forma usou-se para os arquivos do DADUS os seguintes valores:

$$K_{c1.1} = 1279,7 \text{ N/mm}^2.$$

$$(1-m_c) = 0,810$$



Figura 4.7 - Desgaste de flanco. Condições de corte: $V_c=260\text{m/min}$, $a_p=1,6\text{mm}$, $f=0,201\text{mm/rot}$. Na foto vê-se $VB=0,36\text{mm}$ aos 17,11min de usinagem. Ampliação: 100x

4.7 - Resultados do ensaio de vida da ferramenta.

4.7.1 - Análise e tratamento inicial dos dados obtidos.

A constante e os expoentes da equação expandida de Taylor, serão calculados através de regressão linear múltipla. Para tanto é necessário que o número de pontos utilizado em cada condição de ensaio sejam iguais, de forma que nenhuma condição exerça maior influência que as outras nos resultados finais.

É considerado um ponto da regressão múltipla, um conjunto de valores V_i , ap_i , f_i , VB_i , T_i observados no ensaio, onde $i=1,2,3,\dots,n$ e "n" é o número de observações, de uma condição de ensaio "j".

As quantidades de pontos obtidos através dos ensaios, foram diferentes para cada condição dada, além disto os intervalos de tempo entre duas observações ($T_i - T_{i+1}$) também eram diferentes.

Assim os valores obtidos no ensaio não podem ser utilizados diretamente no cálculo da equação expandida de Taylor, antes devem sofrer um tratamento matemático apropriado. A solução passa pelo ajuste da curva $VB \times T$ de cada condição de "j", pois as outras variáveis são mantidas fixas para cada condição de ensaio.

O modelo que melhor representa o desgaste de ferramenta em função do tempo de usinagem é dado pela equação 4.4. [09]

$$VB = a \cdot T^b \quad (4.4)$$

Os coeficientes a e os expoentes b de cada condição de ensaio, foram calculados por regressão linear simples num pacote estatístico disponível em planilha eletrônica para micro-computador[45], isto foi implementado após linearizar os dados de $VB \times T$ com a aplicação de logaritmos [54].

As equações resultantes encontram-se na tabela 4.11, e a representação gráfica das curvas ajustadas podem ser vistas sob a forma de retas em gráficos dilogarítmicos nas figuras 4.8 à 4.15, nas páginas seguintes, onde se comparam as retas ajustadas com os pontos obtidos nos ensaios.

Na tabela 4.11 encontram-se também os coeficientes de correlação de cada equação, todos acima de 0,90. Segundo alguns autores [54, 55] valores desta ordem indicam uma correlação altamente significativa.

CONDIÇÃO DE ENSAIO	V (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	EQUAÇÃO	R
1	172	0,201	1,6	$VB=0,0503 \cdot T^{0,5362}$	0,99
2	190	0,278	2,5	$VB=0,0355 \cdot T^{0,8507}$	0,96
3	210	0,201	1,6	$VB=0,0809 \cdot T^{0,4513}$	0,97
4	210	0,278	1,6	$VB=0,0619 \cdot T^{0,6715}$	0,99
5	210	0,433	1,6	$VB=0,1321 \cdot T^{0,4709}$	0,97
6	210	0,201	2,5	$VB=0,0293 \cdot T^{0,8668}$	0,99
7	240	0,201	1,6	$VB=0,0571 \cdot T^{0,5947}$	0,96
8	260	0,201	1,6	$VB=0,0845 \cdot T^{0,5022}$	0,98

Tabela 4.11 - Equações para cálculo do desgaste de flanco em função do tempo.

De acordo com a metodologia estabelecida deve-se tomar um mínimo de 10 observações para cada condição de ensaio, com 8 condições diferentes isto implica em 80 pontos para a análise de regressão linear múltipla. O número mínimo de pontos de amostragem foi calculado em 13 (apêndice II), como este valor é menor que os 80 pontos propostos, a regressão pode ser realizada.

Os pontos para cálculo da equação expandida de Taylor, foram então calculados para intervalos de tempo iguais, até atingirem o valor VB de desgaste obtido no ensaio. No apêndice I encontra-se uma tabela com o conjunto dos pontos das curvas ajustadas pelo modelo da equação 4.4.

Também foram analisadas separadamente as influências da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte. Isto foi feito calculando-se os desgaste de flanco de cada condição de ensaio, numa mesma base de tempo, até atingir o valor de $VB = 0,35$ mm.

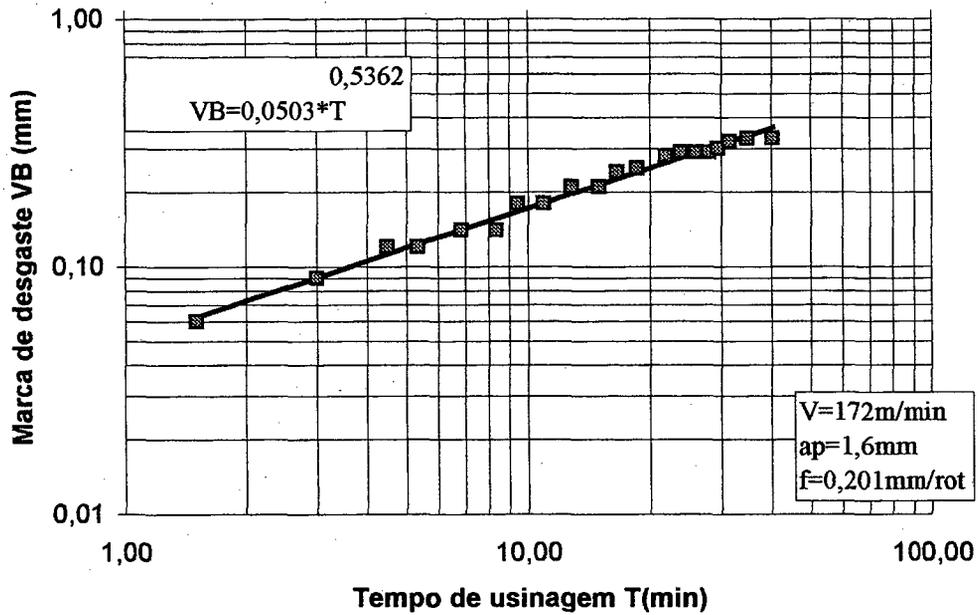


Figura 4.8 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 1.

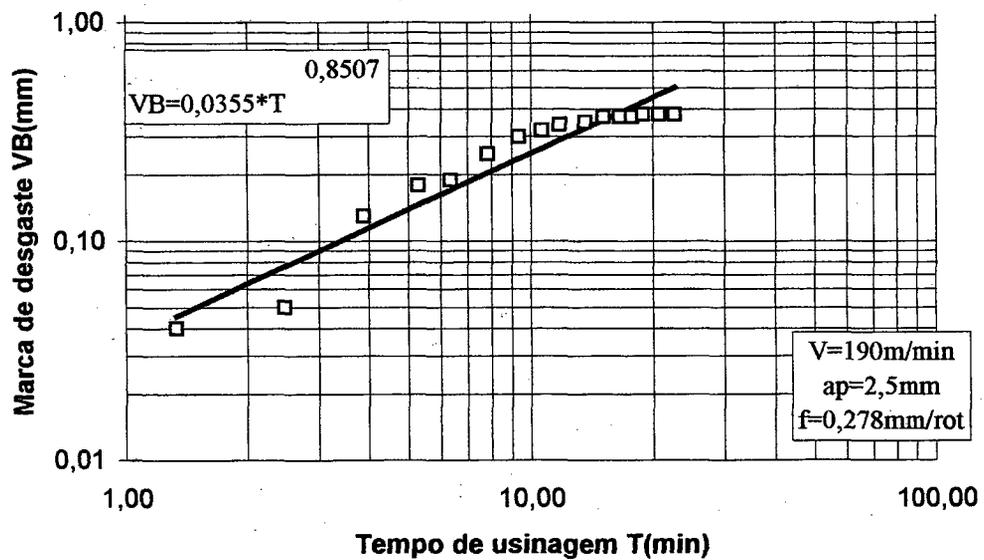


Figura 4.9 -Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 2.

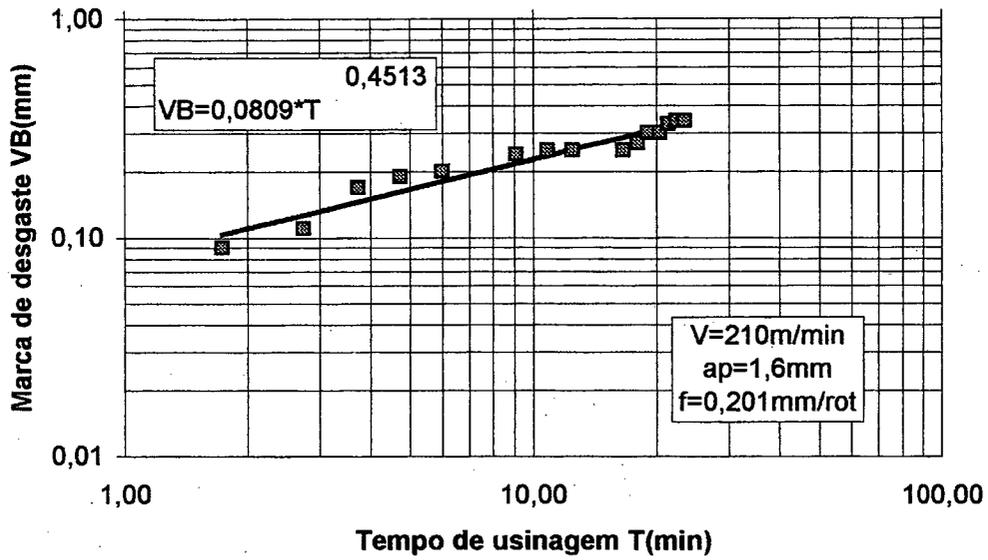


Figura 4.10 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 3.

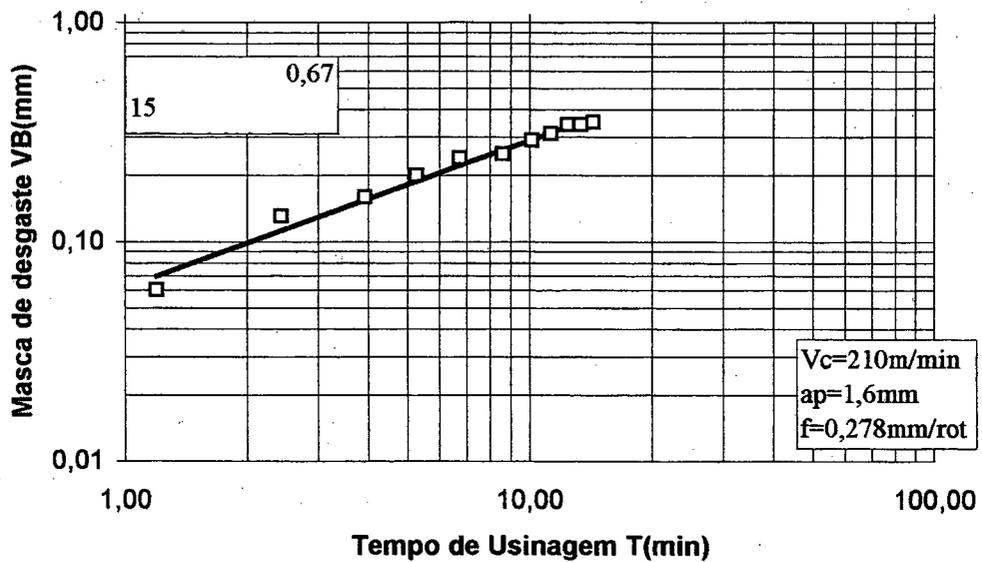


Figura 4.11 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 4.

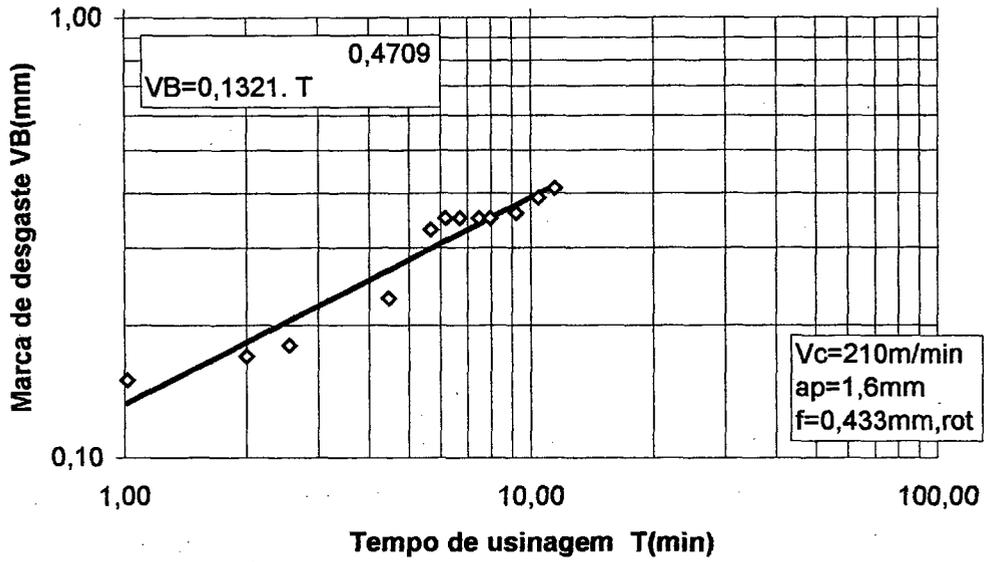


Figura 4.12 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 5

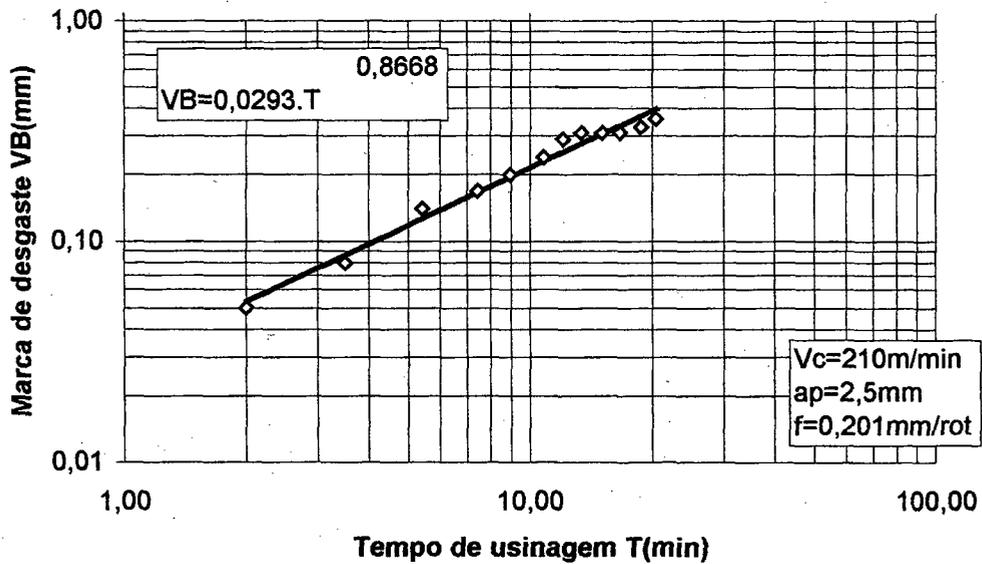


Figura 4.13 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 6

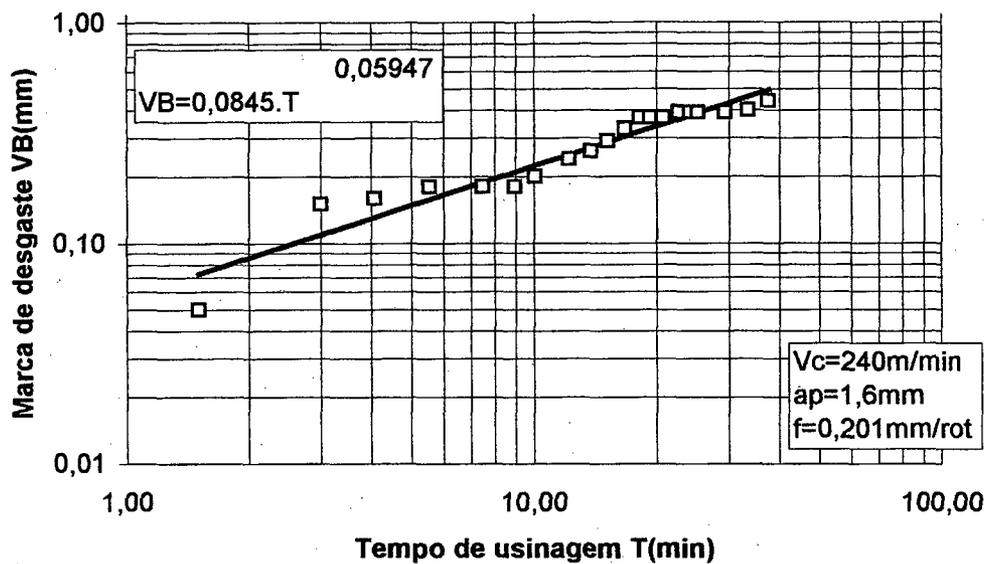


Figura 4.14 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 7.

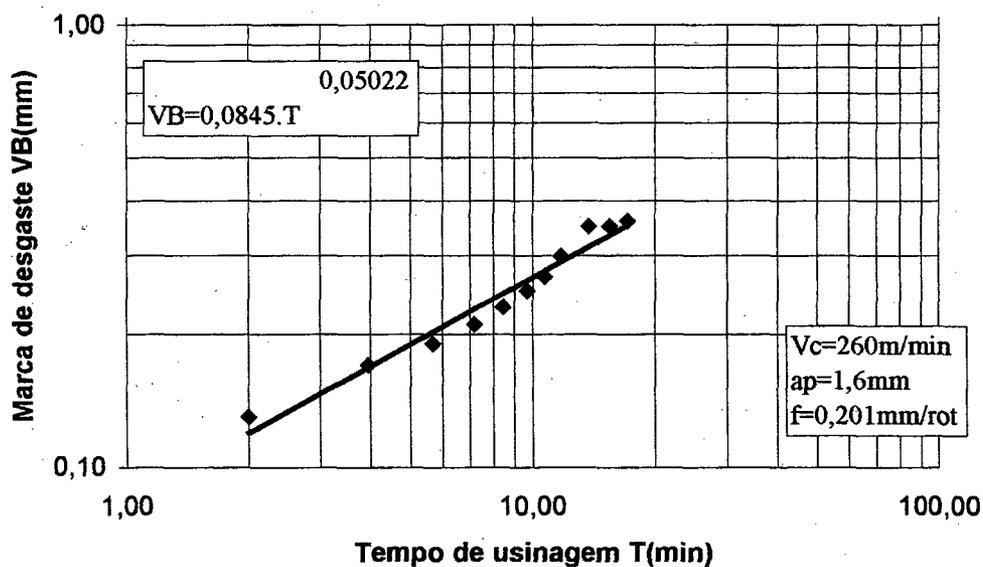


Figura 4.15 - Desgaste de flanco em função do tempo para a condição de ensaio 8.

A figura 4.16 mostra a influência da velocidade de corte no desgaste de flanco para todas as condições onde $f=0,201$ mm e $a_p=1,6$ mm (condições 1, 3, 7 e 8). Conforme o esperado quanto maior a velocidade de corte, mais rapidamente a ferramenta atinge o critério de fim de vida. A condição de ensaio 3 ($V=210$ m/min), mostrou um desgaste maior que a condição 7 ($V=240$ m/min) nos primeiros 11 minutos de ensaio, a partir deste ponto como era de se esperar o desgaste da condição 7 superou o da 3. A condição 1 ($v=172$ m/min) não atingiu o critério de fim de vida.

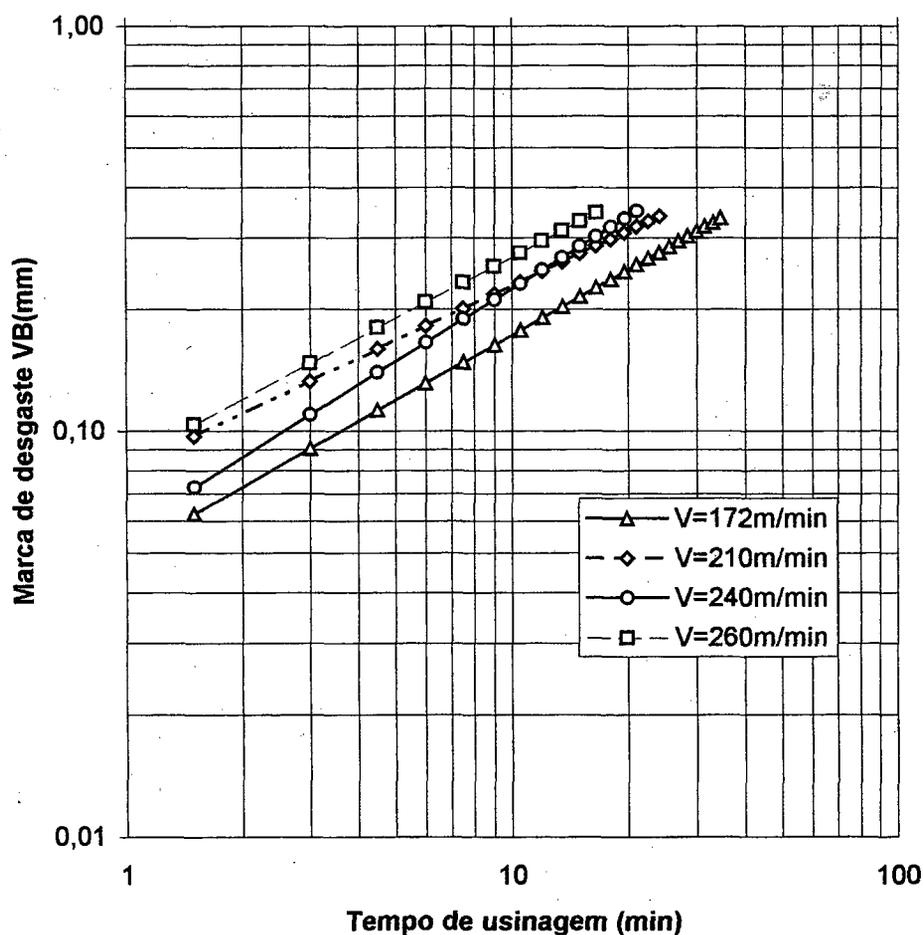


Figura 4.16 - Influência da velocidade de corte no desgaste de flanco, condições de ensaio com $a_p=1,6$ mm e $f=0,201$ mm/rot.

A influência do avanço no mecanismo de desgaste de flanco é demonstrada na figura 4.17, onde são comparadas todas as condições onde $V=210\text{m/min}$ e $a_p=1,6\text{mm}$ (condições 3, 4 e 5). A condição de ensaio 3 ($f=0,201\text{mm/rot}$) desenvolveu um desgaste maior que a condição 4 ($f=0,278\text{mm/rot}$), nos primeiros 3,4 minutos de usinagem, sendo que a partir daí encontra-se o mecanismo normal de desgaste, pois quanto maior o avanço mais rápido a ferramenta atingiu o fim de vida.

A evolução do desgaste de flanco foi estudada em função do aumento da profundidade de corte, comparando-se as condições 3 e 6, respectivamente com $a_p=1,6\text{mm}$ e $a_p=2,5\text{mm}$, ambas com $V=210\text{m/min}$ e $f=0,201\text{mm/rot}$, e os resultados podem ser vistos na figura 4.18. Nos primeiros 11,6 minutos do ensaio a condição 3 apresentou desgaste superior ao da condição 6, daí em diante o comportamento foi o esperado e para uma maior profundidade de corte a ferramenta atingiu mais rapidamente o critério de fim de vida.

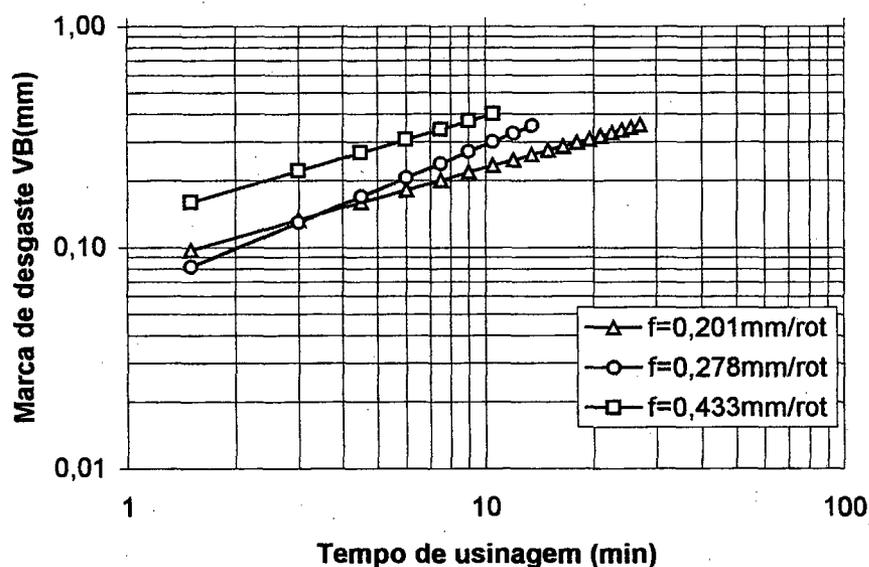


Figura 4.17 - Influência do avanço no desgaste de flanco, condições de ensaio com $V=210\text{m/min}$ e $a_p=1,6\text{mm}$

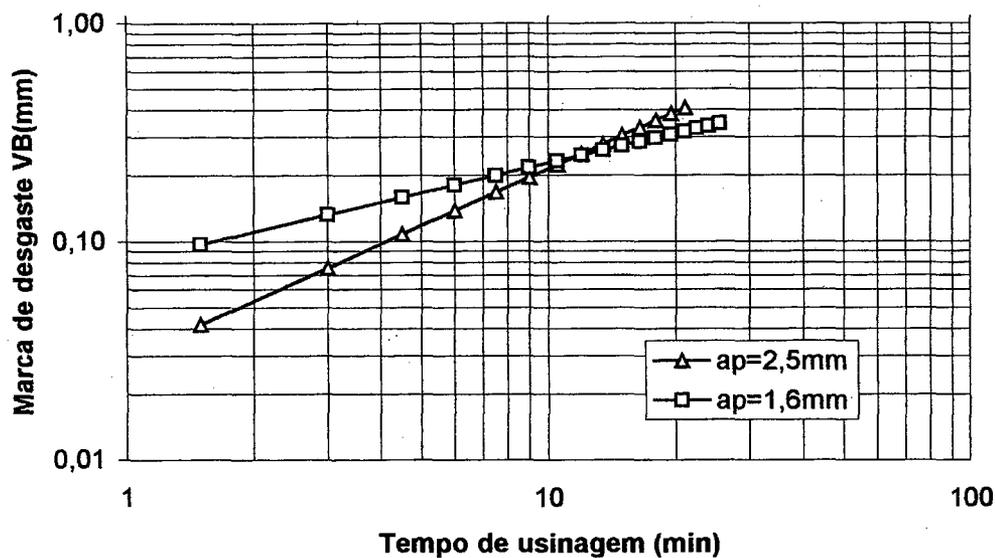


Figura 4.18 - Influência da profundidade de corte no desgaste de flanco, condições de ensaio com $V=210\text{m/min}$ e $f=0,201\text{mm/rot}$.

4.7.2 - Cálculo dos expoentes e da constante da equação expandida de Taylor.

Os parâmetros da equação expandida de Taylor foram obtidos por regressão linear múltipla. Para isto utilizou-se o pacote estatístico disponível em um programa de planilha eletrônica bastante difundido, e de fácil acesso a comunidade técnica e acadêmica. [45].

Foram testadas várias combinações de condições de ensaio afim de investigar a influência da repetição dos valores de avanço, profundidade e velocidade de corte, nos resultados obtidos.

Um resultado inicial foi obtido a partir de uma combinação com todos pontos, ou seja, todas as condições de ensaio, e comparado as demais. Os outros conjuntos foram montados eliminando-se sucessivamente as condições que apresentaram comportamento atípico no experimento, como a condição 3, e aquelas que possuíam avanço igual a $0,201\text{mm/rot}$, profundidade de corte igual a $1,6\text{mm}$ e velocidade de corte igual a 210m/min .

Alguns resultados apresentaram expoentes positivos para a profundidade de corte, o que é uma incoerência, outros forneceram um valor pouco significativo para este expoente quando comparado ao do avanço (da ordem de 25x menor), o que também não encontra suporte na literatura pesquisada.

Aquele que forneceu o melhor resultado, por comparação dos parâmetros com resultados da literatura disponível [09,07], foi o conjunto onde apenas se eliminou a condição 3, e tem como resultado a equação abaixo.

$$V = 444,52 \cdot f^{-0,5504} \cdot a_p^{-0,0419} \cdot V_B^{0,5152} \cdot T^{-0,3378}$$

Assim para este trabalho e dentro dos limites das condições de ensaio, esta é a equação que melhor descreve o comportamento do par material / ferramenta de corte.

CAPÍTULO 5

RESTRIÇÕES TECNOLÓGICAS DOS PARÂMETROS DE USINAGEM.

Na otimização dos parâmetros de usinagem a velocidade de corte é um fator preponderante, já que dela depende não só a produção e acabamento superficial, mas, também é ela quem provoca acelerado desgaste nas ferramentas. Outros parâmetros de usinagem como avanço e profundidade de corte tem menor influência no desgaste, porém, aumentam a força e a potência de corte, exigindo maior rigidez da máquina e da ferramenta para evitar o aparecimento de vibrações. Ao contrário da velocidade de corte, a otimização destes fatores não se faz por critérios de máximo e mínimo, a partir de diferenciação, mas são otimizações de extremo, já que [22] :

- a) O ótimo avanço para a máxima produção ou para o mínimo custo, é o máximo avanço.
- b) A profundidade de corte ótima, também é a máxima possível.
- c) O ótimo avanço para a mínima rugosidade superficial, no entanto, é o valor do avanço mínimo necessário para satisfazer esta condição.

Neste capítulo serão tratadas as restrições de ordem tecnológicas impostas por máquinas, peças e ferramentas à otimização das condições de usinagem. Estas restrições modificam o avanço, a profundidade de corte e a velocidade de corte [02,11,21, 22].

5.1 - Restrições para a velocidade de corte.

A velocidade de corte é limitada por fatores inerentes ao próprio par ferramenta / peça a ser usinada, como pelas características da máquina ferramenta, tais como máxima e mínima rotação disponível e, em máquinas que não possuem variador contínuo de rotação, também o escalonamento passa a ser uma restrição tecnológica a ser considerada. Assim, uma vez determinada a velocidade de corte ótima para a vida desejada, esta deve ser adaptada à máquina selecionada.

5.1.1 Máxima velocidade de corte recomendada para o par material da peça/ferramenta.

A velocidade de corte máxima para um par material da peça/ferramenta, deve ter como limite a máxima velocidade utilizada nos ensaios propostos no capítulo 3. Deste modo o sistema deve testar os resultados das otimizações e, caso a velocidade de corte seja maior que a máxima indicada para o par, deverá ser reduzida para o valor máximo permitido.

5.1.2 - Restrição de máxima e mínima rotação disponível no torno.

Uma das restrições impostas pela máquina operatriz, para obtenção da velocidade de corte desejada são os limites de máxima e mínima rotação disponível na mesma. Assim, para um determinado diâmetro a ser usinado, as velocidades de corte máxima e mínima oferecidas por uma máquina operatriz são limitadas pelo intervalo de máxima e mínima rotação, como segue:

$$V_{c_{\min}} = \frac{\pi \cdot D \cdot N_{\min}}{1000} \quad e, \quad (5.1)$$

$$V_{c_{\max}} = \frac{\pi \cdot D \cdot N_{\max}}{1000} \quad (5.2)$$

onde:

D : diâmetro no local do corte (mm)

$V_{c_{\min}}$: velocidade de corte mínima (m/min)

N_{\min} : mínima rotação oferecida pela máquina (rpm)

$V_{c_{\max}}$: velocidade de corte máxima (m/min)

N_{\max} : máxima rotação oferecida pela máquina (rpm)

5.1.3 - Restrições impostas pelo escalonamento do torno.

Quando tratar-se de torno com variação contínua de rotação, esta é calculada em cada diâmetro pela equação (5.3), porém, grande parte dos tornos usados ainda hoje não possuem variação contínua de rotações no seu acionamento do eixo árvore, o que nos obriga a ajustar as velocidades ótimas de corte às rotações disponíveis em cada máquina, assim, para o sistema proposto foi desenvolvida uma rotina de ajuste da velocidade para as mesmas.

$$N = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (5.3)$$

onde,

N : número de rotações (rpm).

V_c : é a velocidade de corte otimizada (m/min).

D : Diâmetro no local do corte (mm).

No caso de tornos com variadores escalonados de rotação, além deste procedimento, é necessário o ajuste da rotação calculada à uma das disponíveis no seu escalonamento. Para tanto o sistema busca as rotações existentes e, caso a rotação desejada esteja entre duas existentes, faz-se o seguinte ajuste: caso a rotação necessária esteja num intervalo menor que 85% da diferença entre as duas rotações disponíveis, a rotação usada será a menor das duas, do contrário o sistema usará a maior delas.

As rotações para as velocidades de máxima produção e de mínimo custo tem um tratamento diferenciado, ou seja: a rotação na qual se obtém a velocidade de mínimo custo é ajustada a primeira disponível logo acima da calculada. Já a rotação para a velocidade de máxima produção é escolhida como a última que antecede a rotação calculada. Isto garante a manutenção das velocidades dentro da faixa de máxima eficiência.

5.2. Restrição de máxima profundidade de corte.

A profundidade de corte ótima é considerada como a máxima possível, pois, desta maneira diminui-se o número de passes, o que deve diminuir o tempo de usinagem, bem como os tempos improdutivos como o tempo de retorno e posicionamento da ferramenta.

A máxima profundidade, depende fundamentalmente do comprimento do gume da ferramenta que pode estar em contato com a superfície da peça durante a operação de corte. O percentual máximo do comprimento útil de um gume é limitado por dois fatores:

- a) Forma do inserto;
- b) Tipo de geometria, se positiva ou negativa;

O comprimento útil do gume da ferramenta a ser usado, aumenta com o ângulo de quina (ϵ), e diminui com o aumento do ângulo de incidência. A tabela 5.1 mostra os valores de limitantes (GF_b) para algumas formas e geometrias de insertos, que devem ser utilizados na fórmula (5.4). Esta fórmula determina a máxima profundidade de corte admissível para uma determinada forma e geometria de ferramenta[56]:

$$a_{pm\acute{a}x} = GF_b \cdot l_g \cdot \text{sen}(\kappa) \quad (5.4)$$

onde,

GF_b : Fator limitante da largura de corte, pela forma do inserto.

l_g : Comprimento do gume.

κ : ângulo de direção.

5.3. Restrições para o avanço.

5.3.1. Avanço máximo em função da geometria da ferramenta e do raio de quina.

Como já se afirmou no item 5.2. a estabilidade da quina da ferramenta aumenta com o aumento do ângulo(ϵ) e do raio de quina (r_ϵ) e diminuem com o aumento do ângulo de

incidência(α). Além destes dois fatores, quanto maior o raio de quina maior poderá ser o avanço, pois, além da maior rigidez consegue-se um melhor acabamento. Para ponderar estes fatores e mais o ângulo de direção do gume, utilizam-se os fatores limitantes da espessura de corte dados pela tabela 5.1, na equação 5.5, onde essa tem o máximo valor de avanço como:

$$f_{\text{máx}} = GF_h \cdot \frac{r_\varepsilon}{\text{sen}(\kappa)} \quad (5.5)$$

onde,

GF_h : Fator limitante da espessura do cavaco.

r_ε : raio de quina.

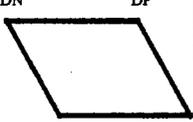
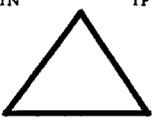
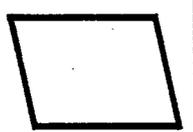
FORMA DO INSERTO	Fatores limitantes pela forma do inserto			
	$GF_b = \frac{b_{\text{máx}}}{l}$		$GF_h = \frac{h_{\text{máx}}}{r}$	
	Negativa	Positiva	Negativa	Positiva
DN DP 	0,55	0,45	0,70	0,60
TN TP 	0,60	0,45	0,70	0,60
CN CP 	0,80	0,70	0,75	0,65
SN SP 	0,80	0,74	0,80	0,70

Tabela 5.1 - Fatores limitantes da largura e espessura do cavaco.[56]

5.3.2. Avanço para a máxima força de corte admissível para a forma do inserto.

A máxima força de corte exercida sobre uma ferramenta deve ser mantida dentro de certos limites, de forma a não causar a falha por quebra do inserto. Ao determinar os dados de corte é necessário cuidar para que a força de corte não supere a carga máxima admitida pelo inserto que estiver em uso, para isto usa-se a equação de Kienzle (2.6), que fornece a força de corte em função do avanço, profundidade de corte, ângulo de direção da ferramenta e força específica de corte do par ferramenta material. Assim para uma dada profundidade de corte possível para o comprimento do gume da ferramenta e um dado ângulo de direção, temos que a máxima força de corte será dada por :

$$F_{c_{máx}} = K_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc} \quad (5.6)$$

Utilizando-se $F_{c_{máx}}$ retirada da tabela 5.2 o avanço máximo é calculado da seguinte forma:

$$f_{máx} = \frac{\left[\frac{F_{c_{máx}} \cdot \text{sen}(\kappa)}{k_{c1.1} \cdot a_p} \right]^{\frac{1}{1-mc}}}{\text{sen}(\kappa)} \quad (5.7)$$

onde,

$F_{c_{máx}}$: máxima força de corte suportada pelo inserto de acordo com a tabela 5.2.

$b = a_p / \text{sen}(\kappa)$; (largura do corte).

$h = f \cdot \text{sen}(\kappa)$; (espessura do cavaco).

$K_{c1.1}$: Pressão específica de Corte;

$1 - mc$: expoente da equação de Kienzle

κ : ângulo de direção da ferramenta.

A carga máxima admissível para o inserto ($F_{c_{máx}}$) é dada pela tabela 5.2, onde se relacionam a forma, a geometria e o comprimento do gume do inserto.

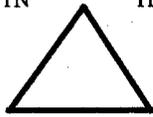
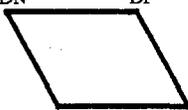
FORMA DO INSERTO	Comp. do Gume (mm)	Carga Máxima Admissível (N)	
		Negativa	Positiva
TN TP 	11	4500	4000
	16	10000	9000
	22	19000	17000
	27	27000	24000
DN DP 	11	4000	3500
	16	8500	7500
	22	16000	14000
	27	23000	20000
CN CP 	9	5000	4500
	12	9000	8000
	15	17500	14500
	19	23000	20000
	25	43000	37000
SN SP 	9	6500	6000
	12	12000	10000
	15	22000	19000
	19	28000	25000
	25	55000	48000

Tabela 5.2- Solicitação mecânica admissível para insertos de metal duro [56].

5.3.3. Restrição do avanço pela máxima potência útil da máquina.

A resistência a usinagem é dada em função da velocidade de corte e força de corte, e não pode exceder a potência do efetiva da máquina ferramenta, esta relação é expressa da seguinte maneira:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60000} \leq P_{ef} \quad (5.8)$$

onde,

v_c : Velocidade de Corte(m/min).

F_c : força de corte (N)

P_{ef} : é a potência efetiva do motor em KW.

P_c : é a potência necessária ao corte em KW.

Substituindo-se o valor de F_c da equação de Kienzle (2.6), na equação (5.8), e igualando-se a potência efetiva da máquina obtém-se:

$$P_{ef} = \frac{V_c \cdot K_{cl.1} \cdot b \cdot h^{1-mc}}{60000} \quad (5.9)$$

Substituindo-se os valores de h e b dados na equação (5.7) nesta expressão, pode-se calcular o avanço máximo para a potência efetiva da máquina, sem que esta extrapole seu limite:

$$f_{máx} = \frac{1}{\text{sen}(\kappa)} \times \left[\frac{60000 \cdot P_{ef} \cdot \text{sen}(\kappa)}{V_c \cdot K_{cl.1} \cdot a_p} \right]^{\frac{1}{1-mc}} \quad (5.10)$$

Como a velocidade de corte (V_c) otimizada é calculada pela equação de Taylor (equação 2.10), e esta depende do valor do avanço, substituindo-se (2.10) na equação (5.9) esta pode também ser escrita como segue:

$$f_{máx} = \left[\frac{60000 \cdot P_{ef} \cdot (\text{sen}(\kappa))^{mc}}{C \cdot a_p^{F+1} \cdot V B^H \cdot T^G \cdot K_{cl.1}} \right]^{\frac{1}{1-mc+E}} \quad (5.11)$$

onde,

C : constante da equação expandida de Taylor

E, F, G, H : expoentes da equação de Taylor

A figura 5.1 mostra um exemplo da curva da variação do avanço máximo permitido em função da variação da velocidade de corte, para uma profundidade de corte e potência constantes.

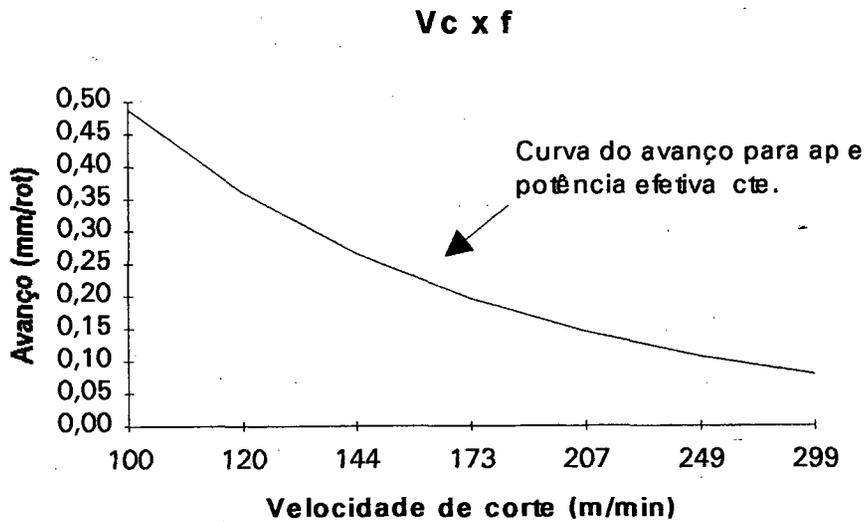


Figura 5.1 - Relação entre o avanço máximo e a velocidade de corte para uma determinada potência e profundidade de corte

5.3.4 Restrição do avanço para acabamento superficial.

A qualidade superficial de uma peça é fator importante no seu desempenho e é uma das importantes restrições impostas ao avanço da ferramenta. A rugosidade cinemática teórica é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta. No torneamento, ela é influenciada principalmente pela dimensão do raio de quina da ferramenta e pelo avanço[16], conforme mostra a figura 5.2.

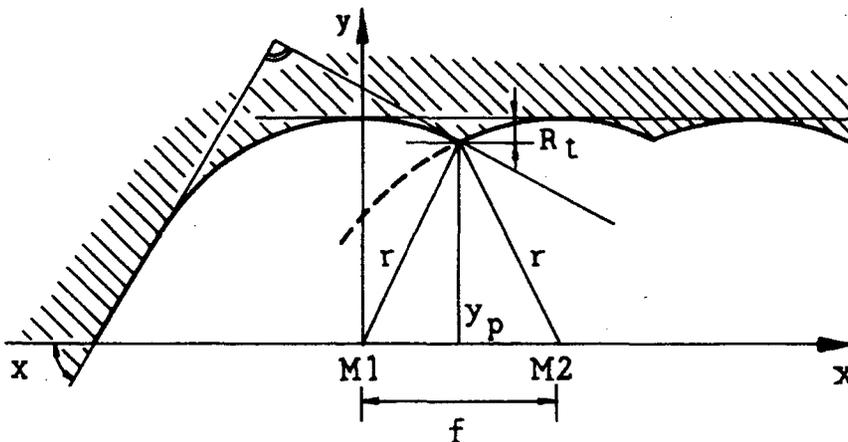


Figura 5.2 -Influência do raio de quina e do avanço na rugosidade superficial.[16]

A relação entre o avanço máximo para se obter uma determinada rugosidade superficial e o raio de quina da ferramenta é dada pela seguinte equação:

$$f = \sqrt{\frac{R_t}{1000} \cdot 8 \cdot r_\epsilon} \quad (5.12)$$

onde:

R_t : é a rugosidade máxima em μm .

5.4 - Índice de esbeltez como restrição de usinagem

O índice de esbeltez é a razão entre a profundidade de corte e o avanço de uma determinada seção de cavaco, ele cresce com a raiz quadrada da área de seção de corte [13, 12,11]. As equações (5.13), (5.14) e (5.15) mostram as relações entre o índice de esbeltez, avanço, profundidade de corte e área de seção do corte.

$$G = a_p / f \quad (5.13)$$

onde,

G : índice de esbeltez.

a_p : profundidade de corte.

f : avanço.

Assim a profundidade de corte bem como o avanço podem ser expressos em função da área de seção de corte e do índice de esbeltez do cavaco:

$$a_p = (S \cdot G)^{1/2} \quad (5.14)$$

$$f = (S / G)^{1/2} \quad (5.15)$$

onde,

S : área de seção do cavaco.

Alguns autores recomendam que este índice, para o desbaste, fique compreendido dentro das seguintes faixas: entre 4 e 20 [12], 4 a 10 [11] e 5 a 10 [13]. No presente trabalho ajusta-se o índice de esbeltez através da profundidade de corte, equação (5.14), e usa-se como limite $G \leq 10$.

CAPÍTULO 6

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES DE USINAGEM PARA O PROCESSO DE TORNEAMENTO.

Neste capítulo será descrita a implementação de um sistema para determinação de condições de usinagem em operação de torneamento, para máquinas dotadas de comando numérico e máquinas convencionais. Trata-se de um sistema baseado em bancos de dados tecnológicos, composto por dois programas: um gerenciador dos arquivos de dados que faz os serviços de manutenção e gerenciamento dos arquivos, e o outro responsável pela determinação das condições de usinagem.

Inicialmente serão mostradas as características principais do modelo utilizado, em seguida apresenta-se o gerenciador de arquivos (DADUSARQ) e a estrutura dos arquivos do sistema. O gerador de condições de usinagem (DADUS) é descrito com fluxogramas, um detalhamento de procedimentos utilizados pelo mesmo, e um exemplo de utilização.

O sistema foi desenvolvido em linguagem Turbo Pascal, explorando as características de modularização de modo a permitir não só o reaproveitamento de rotinas mas também para facilitar o seu posterior crescimento, e uma possível utilização em sistemas CAPP desenvolvidos na UFSC.

6.1 - Características da solução proposta.

Uma análise prévia do problema mostrou que o sistema deveria possuir algumas características básicas tais como simplicidade no uso, baixo custo, portabilidade, rapidez nos resultados, entre outras. As principais características do sistema proposto são:

- a) Ser uma solução de baixo custo, e usar como plataforma microcomputadores pessoais, sendo assim acessível a pequenas e médias empresas [57].

- b) Foi desenvolvido como um sistema modular que permite futuras expansões, podendo ser acrescentadas novas operações, e permitir o seu aproveitamento num futuro sistema CAPP no Departamento de Eng. Mecânica da UFSC.
- c) Os dados económicos e tecnológicos de máquinas, ferramentas, mão-de-obra e materiais estão armazenados em um banco de dados de fácil acesso por menus e janelas de seleção direta na tela, o que facilita o trabalho do processista.
- d) Utiliza o modelo de otimização por derivação das funções de custo e de tempo, vistas no capítulo 2, definindo uma faixa de máxima eficiência para as operações [21, 22].
- e) A otimização é sujeita a restrições tecnológicas de usinagem, apresentadas no capítulo 5.
- f) O modelo permite tratar a tecnologia da usinagem de modo dinâmico, pois seu banco de dados pode ser atualizado a qualquer momento, com novas ferramentas, máquinas e materiais.
- e) O processo de determinação de condições de usinagem permite a intervenção do usuário como será visto adiante em 6.4, garantindo ao mesmo tempo interatividade e segurança.

6.2 - O gerenciador de arquivos tecnológicos - DADUSARQ.

Este programa é responsável pela criação e manutenção dos arquivos de dados sobre os quais funciona todo o sistema, sendo estes em número de seis a saber: arquivo de materiais (DADUSMAT.DAT), arquivo de ferramentas (DADUSFER.DAT), arquivo de fabricantes de ferramentas (DADUSFAB.DAT), arquivo de máquinas (DADUSMAQ.DAT), arquivo de categorias salariais dos operadores de máquinas ferramentas (DADUSCAT.DAT) e arquivo de dados gerais sobre a empresa e moedas em uso (DADUSGER.DAT). O tratamento dado aos arquivos faz com que do ponto de vista do usuário apareçam apenas como quatro arquivos a saber: materiais, ferramentas, máquinas e dados gerais.

O DADUSARQ é um programa independente do DADUS, sendo no entanto possível ser chamado de dentro do ambiente DADUS quando se desejar atualizar algum dos arquivos.

6.2.1 - Arquivo de materiais - DADUSMAT.DAT

O arquivo DADUSMAT.DAT foi definido de modo a conter os dados tecnológicos de usinagem relativos aos pares material da peça / ferramenta. Desta forma ele contém o necessário para identificar o material, e também a ferramenta com a qual os dados foram obtidos. Muitas outras informações poderiam ser adicionadas, sendo estas porém, suficientes para o propósito deste trabalho. Assim cada registro contém as seguintes informações:

- a) Código do material.
- b) Descrição do material.
- c) Grupo ao qual pertence o material.
- d) Constante C da fórmula expandida de Taylor,
- e) Expoentes da fórmula expandida de Taylor para avanço, profundidade de corte, marca de desgaste máximo, vida da ferramenta.
- f) Constante $K_{c1.1}$, e expoente m_c para a equação de Kienzle.
- g) Velocidade de corte máxima para o par material ferramenta.
- h) Código ISO do inserto intercambiável, classe do inserto e seu fabricante.

Os dados da ferramenta (item h) só existem neste arquivo do ponto de vista lógico, estando fisicamente no arquivo de ferramentas, assim evitam-se informações redundantes e o crescimento desnecessário do tamanho do arquivo. A figura 6.1 mostra uma janela de consulta ao arquivo de materiais.

Consulta ao arquivo de materiais	
Material:	
Código:	ABNT-1020
Nome:	ACO ABNT 1020 ENSAIO ETT
Grupo:	4
Dados Tecnológicos: (Par material/ferramenta)	
Kcl.1:	1279.70 [N/mm ²]
Mc:	0.19
Velocidade de corte máxima admissível:	260.00 [M/Min]
Coeficientes da equação expandida de Taylor na forma	
$UC = C \times F^e \times Ap^f \times T^g \times UB^h$	
C:	444.52
e:	-0.5504
f:	-0.0419
g:	-0.3378
h:	0.5152
Ferramenta:	
Código (ISO):	TNMM160408-QR
Classe:	P35R
Fabricante:	SANDVIK
<A>Iterar <E>xcluir <I>mprimir	

Figura 6.1 - Janela para consulta do arquivo tecnológico de pares material/ferramenta.

6.2.2 - Arquivo de ferramentas - DADUSFER.DAT

Contém informações da ferramenta que servem para sua caracterização, sendo algumas de natureza tecnológica e outras sobre custos e tempos, a saber:

- a) Código ISO do inserto.
- b) Fabricante do inserto (importado de DADUSFAB.DAT).
- c) Classe do material do inserto.
- d) Custo unitário do inserto.
- e) Tempo para a troca do inserto.
- f) Critério de máximo desgaste(VB).
- g) Número de gumes do inserto.
- h) Código ISO do suporte porta inserto.
- i) Descrição do suporte.
- j) Custo unitário do suporte.

```

— Consulta ao arquivo de ferramentas —
Pastilha:
Código (ISO): [NMML60408-QR]
Fabricante: SANDVIK
Classe: P35R
Custo: 6.47 [US$]
Tempo de troca: 1.30 [Min.Seg]
Critério de desgaste Ub: 0.350 [mm]
Numero de gumes: 3

Suporte:
Código (ISO): [PTJNR2525-A16]
Descrição: PORTA FERRAMENTAS SECO
Custo: 67.20 [US$]
<A>Iterar <E>xcluir <I>mprimir

```

Figura 6.2 - Janela de atualização dos arquivos de ferramentas e fabricantes

6.2.3 - Arquivo de fabricantes de ferramentas - DADUSFAB.DAT

Neste arquivo estão cadastrados os nomes de fabricantes das ferramentas presentes no arquivo DADUSFER.DAT. Esta informação é usada pelo DADUSARQ no arquivo de ferramentas para distinguir duas ferramentas de iguais características e diferentes fabricantes, e torna desnecessária a digitação do nome do fabricante a cada novo registro de ferramenta, uma vez que este fabricante já esteja cadastrado.

6.2.4 - Arquivo de máquinas - DADUSMAQ.DAT

Contém os dados necessários a descrição dos tornos, bem como algumas das suas limitações e custos. É com estas informações que o DADUS define parte dos custos de usinagem, e restrições tecnológicas do processo de usinagem referentes a máquina ferramenta. Assim cada registro contém:

- a) Código da máquina: distingue duas máquinas com as mesmas características.
- b) Descrição da máquina operatriz.
- c) Potência efetiva de corte, já descontadas às perdas elétricas e mecânicas.
- d) Custos de usinagem, tais como, energia elétrica, fluido de corte, manutenção, etc.

- e) Diâmetro máximo da peça sobre o barramento.
- f) Distância entre pontas.
- g) Tipo de variador de rotações, podendo ser contínuo ou escalonado.
- h) As rotações disponíveis na máquina, estes campos dependem do tipo de variador, sendo contínuo, cadastram-se apenas a mínima e a máxima rotação, se escalonado, todos os escalões, sendo suportado um máximo de 40.
- i) Os avanços transversais e longitudinais disponíveis na máquina. Assim como nas rotações, estes podem ser de variação contínua ou escalonada, e seguem o mesmo padrão de organização, só que com um máximo de 72 escalões por eixo (X e Z).
- j) Índice físico da categoria salarial a que pertence o operador.

O último campo serve de ligação entre este arquivo e o DADUSCAT. Este dado é transparente ao usuário, pois, para este o que é visualizado são os Dados do Operador. A figura 6.3 mostra a janela "Consulta ao arquivo de máquinas".

Consulta ao arquivo de máquinas										
Código:	TORMAX-30			Descrição:	TORNO ROMI ETI					
Potência de corte:	4.40 [Kw]			Tempo de Preparação:	[min]					
Custos de usinagem (energia, fluido, máquina):	0.25 [US\$/Min]									
Diâmetro máximo sobre o barramento:	420.0 [mm]									
Distância entre pontas:	1000.0 [mm]									
Rotações:	[RPM] Variação escalonada									
	47.0	75.0	95.0	119.0	150.0	190.0	236.0	287.0	300.0	375.0
	380.0	458.0	600.0	725.0	950.0	1156.0	1511.0	1824.0	2382.0	
Avanços Longitudinais:	[mm/Rot]				Avanços Transversais:	[mm/Rot]				
	Variação escalonada					Variação escalonada				
	0.062	0.077	0.085	0.100	0.028	0.035	0.038	0.045		
	0.114	0.131	0.151	0.177	0.051	0.059	0.068	0.080		
	0.201	0.238	0.278	0.327	0.095	0.107	0.125	0.147		
	0.372	0.433	0.523	0.580	0.168	0.169	0.235	0.262		
	0.682	0.784	0.929	1.082	0.308	0.354	0.420	0.486		
	1.236	1.425	1.699	1.963	0.557	0.643	0.766	0.881		
Dados sobre o operador:										
Categoria:	8	Salário:	560.00 [US\$]	Nº Horas Contrato:	176					
	<A>Iterar		<E>xcluir		<I>mprimir					
ESC Retorna										

Figura 6.3- Consulta a um registro do arquivo de máquinas.

6.2.5. Arquivo de dados sobre as categorias salariais -DADUSCAT.DAT

Neste arquivo estão cadastrados os dados do operador que aparecem na janela do arquivo de máquinas, evitando-se deste modo manter os arquivos com informações redundantes. Estes dados são separados por categorias ou níveis salariais existentes na empresa, ligando uma categoria a uma ou mais máquinas. O arquivo contém as seguintes informações:

- a) Categoria salarial a que pertence o operador.
- b) O salário mensal de cada categoria de operador.
- c) O número de horas contratadas desta categoria.

6.2.6 - Arquivo de dados gerais do sistema - DADUSGER.DAT.

De forma a dar maior flexibilidade ao sistema, alguns dados de uso geral para os custos estão agrupados neste arquivo, são eles:

- a) Unidade monetária utilizada nos dados de custos (dólar, URV, UFIR, etc).
- b) Unidade monetária oficial do país.
- c) Fator de conversão entre moedas.
- d) Fator de encargos sociais que incidem sobre os salários(%).
- e) Custos administrativos da empresa.

Arquivo de Dados e Custos Gerais	
Unidade monetária (em uso nos dados):	US\$
Unidade monetária padrão:	R\$
Relação entre as unidades (valor):	1.00
Fator de encargos sociais:	100.0 [%]
Custos administrativos:	2.00 [US\$/Hora]

Figura 6.4 - Tela de consulta ao arquivo de dados gerais.

6.3 O programa gerador de condições otimizadas de usinagem - DADUS.

O DADUS é o programa responsável pela determinação de condições otimizadas de usinagem, utilizando os arquivos do banco de dados já descritos neste capítulo. A sua filosofia geral é aliviar o trabalho do processista, especialmente evitando os cálculos repetitivos e as consultas a manuais e tabelas.

A interface com o usuário, desenvolvida para este programa, é constituída por menus e janelas específicas para cada função, com seleção de escolhas via teclas (\downarrow , \uparrow , PgUp, PgDw), tornando o seu uso fácil, e guiando o usuário de forma amigável até o seu objetivo.

O programa fornece resultados parciais, de forma a possibilitar a sua avaliação pelo usuário, antes de encerrar a determinação de uma operação. Por fim o DADUS fornece um relatório com as condições de usinagem, tempos e custos.

A forma como o sistema será exposto será através de fluxogramas de procedimentos, bem como sua demonstração através de um exemplo.

6.3.1 - Visão geral do programa.

A metodologia utilizada para otimizar as condições de usinagem é basicamente a determinação das vidas de mínimo custo e de máxima produção, determinando assim um intervalo de máxima eficiência, a partir da vida da ferramenta (equações 2.26 e 2.49). A velocidade de corte será determinada posteriormente utilizando-se a equação expandida de Taylor. Para determinar a velocidade com o uso desta equação, faz-se necessária a determinação das outras duas condições de usinagem, o avanço e a profundidade de corte. Estas são otimizadas por extremos [22] e estão sujeitas as restrições tecnológicas já abordadas no capítulo 5 deste trabalho, sendo estas as condições de contorno do problema de otimização. Para estes procedimentos são utilizadas as informações tecnológicas e de custos presentes nos arquivos do sistema e tabelas internas do DADUS.

As figuras 6.5, 6.6 e 6.7 mostram o fluxograma do sistema que foi dividido por módulos. A figura 6.5 mostra as opções do programa principal, ele dá acesso a cinco módulos básicos do sistema que são: o módulo de entrada de dados da peça, o módulo onde são realizadas as operações de torneamento, o módulo de acesso as listagem dos relatórios individuais de cada operação já concluída, o módulo onde se totalizam os tempos e os custos de todas as operações realizadas sobre a peça, e por fim uma rotina de chamada ao programa gerenciador dos arquivos tecnológicos o DADUSARQ, de modo que este apesar de ser independente, fica integrado ao ambiente DADUS. As opções de totalização e listagem de operações ficam disponíveis apenas após encerrada a primeira operação bem sucedida. A figura 6.13 mostra a tela principal do sistema onde se encontram estas opções

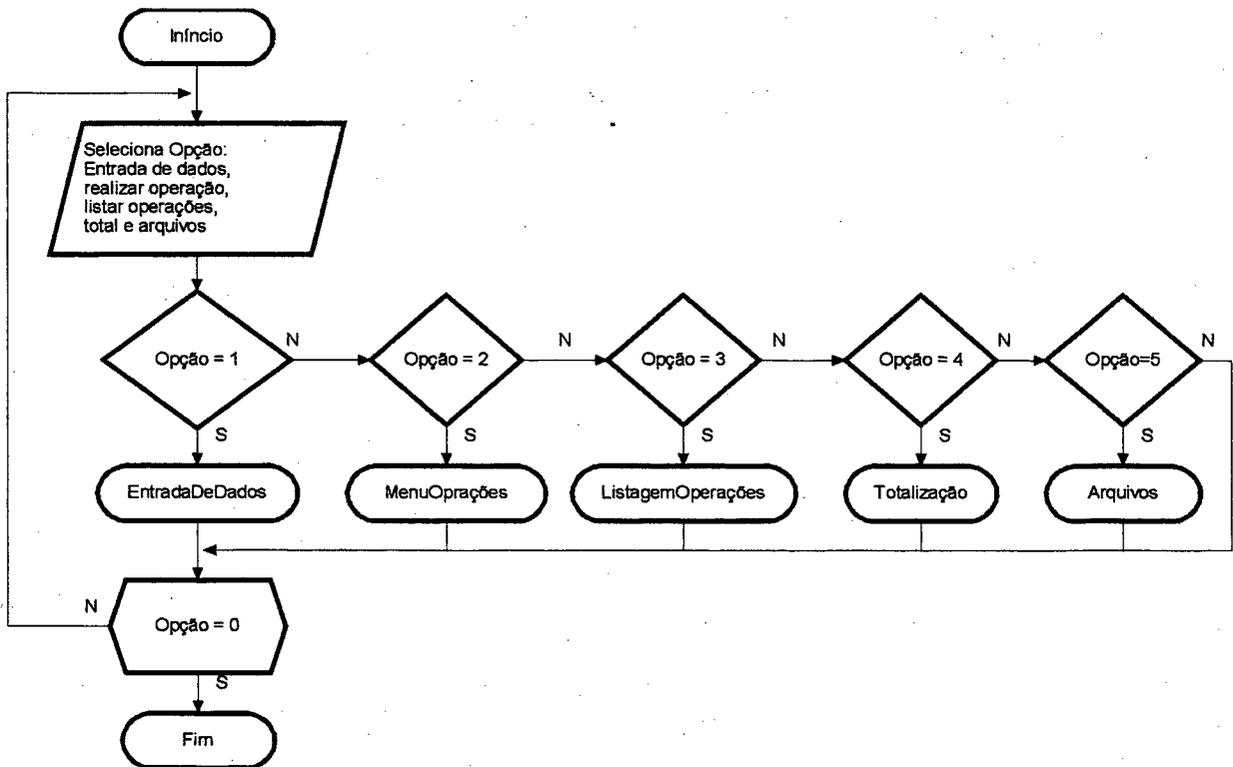


Figura 6.5 - Fluxograma do programa DADUS (Principal)

O procedimento de leitura de dados da peça deve ser utilizado antes dos demais, com exceção da chamada ao DADUSARQ que é livre. Nele são solicitadas informações gerais tais como código de identificação, descrição sucinta da peça, tamanho do lote que será produzido e

o processo metalúrgico de obtenção da peça bruta. Esta última também sob a forma de menu. Nesta fase o sistema dá acesso ao arquivo de materiais, mostrando uma janela de seleção, para que o usuário selecione com o cursor o material desejado. O custo do material bem como as dimensões da peça bruta são introduzidos manualmente. Todas estas informações ficam disponíveis a partir deste instante, e só então o usuário poderá ter acesso ao módulo de operações. A figura 6.5 mostra o módulo de leitura de dados da peça.

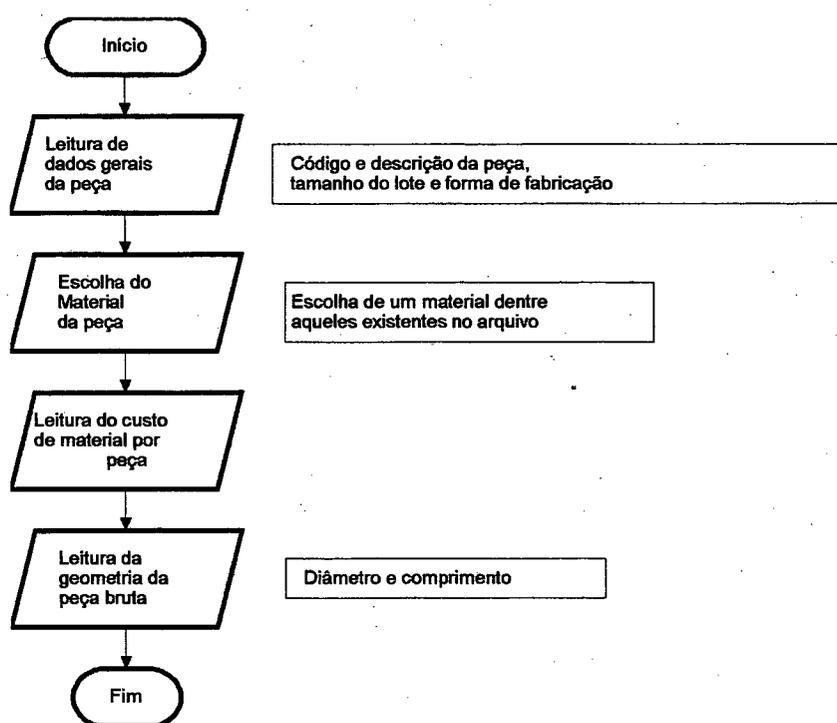


Figura 6.6 -Fluxograma do módulo de leitura de dados da peça.

O módulo de operações é responsável pela chamada dos procedimentos de cilindramento e faceamento, após determinadas as condições de usinagem pela operação selecionada, o controle volta a este módulo que, atualiza os dados geométricos da peça para a nova situação, ou seja, a peça após a usinagem. O relatório completo da operação, caso seja aceito pelo usuário, é então armazenado em memória, ficando daí em diante disponível através do módulo de listagem de operações. A figura 6.7 mostra o fluxograma deste procedimento. A tela com o relatório, bem como a de totalização de tempos e custos serão mostradas num

exemplo no final deste capítulo. As figuras 6.8 e 6.9 são os fluxogramas dos procedimentos de cilindramento e faceamento, que são serão detalhados nos próximos itens.

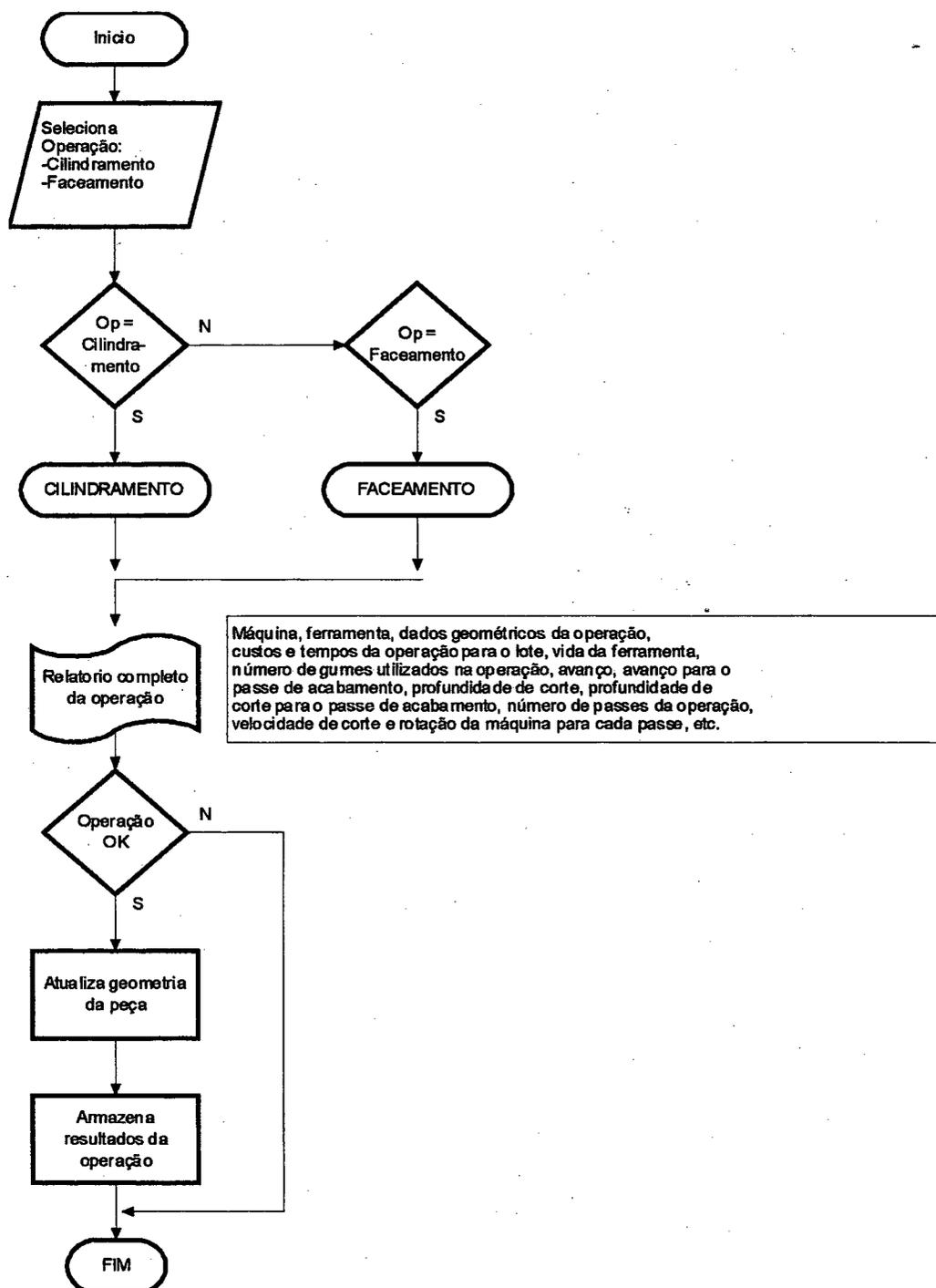


Figura 6.7 - Fluxograma do procedimento de operações.

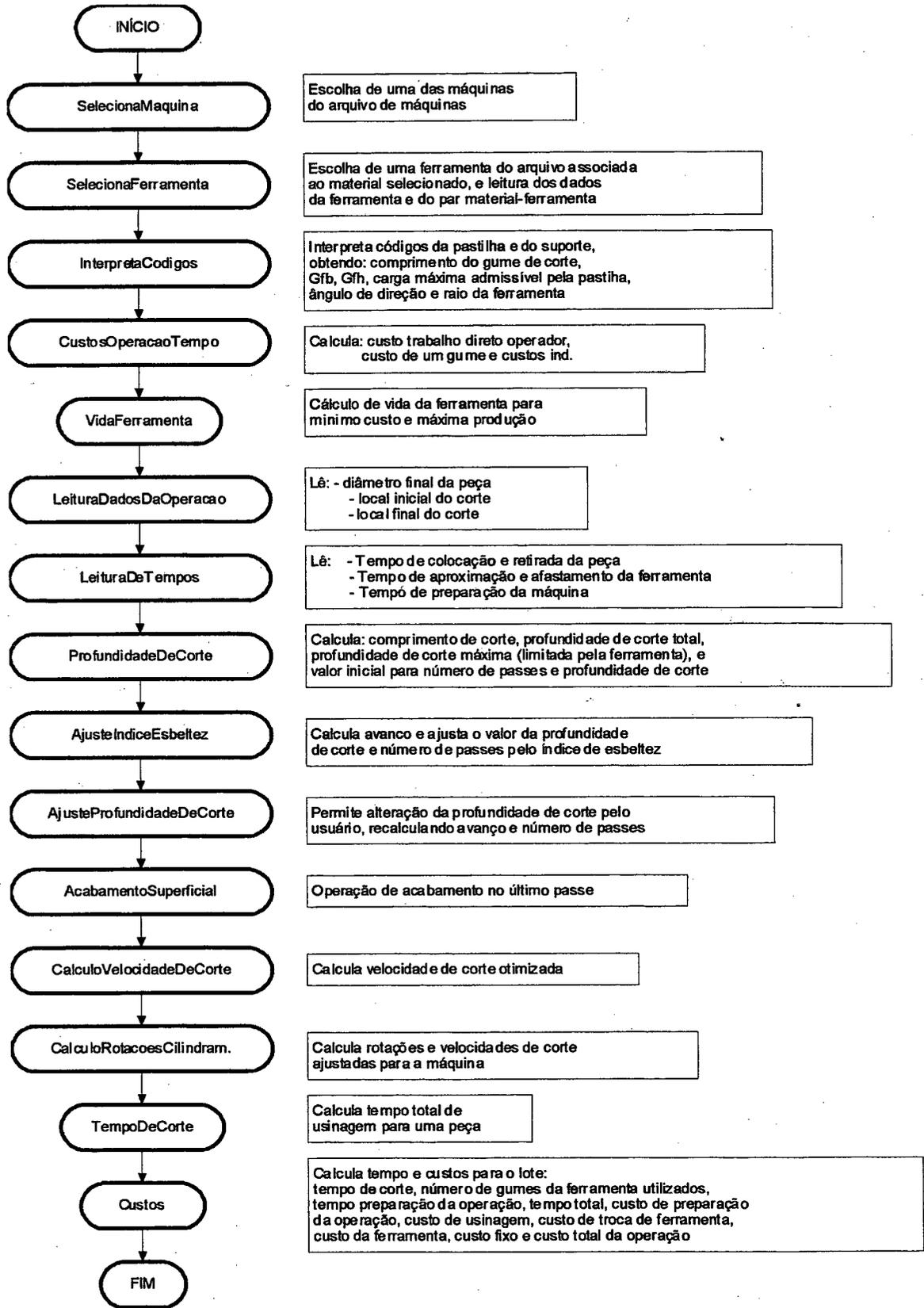


Figura 6.8 - Fluxograma do procedimento de torneamento cilíndrico.

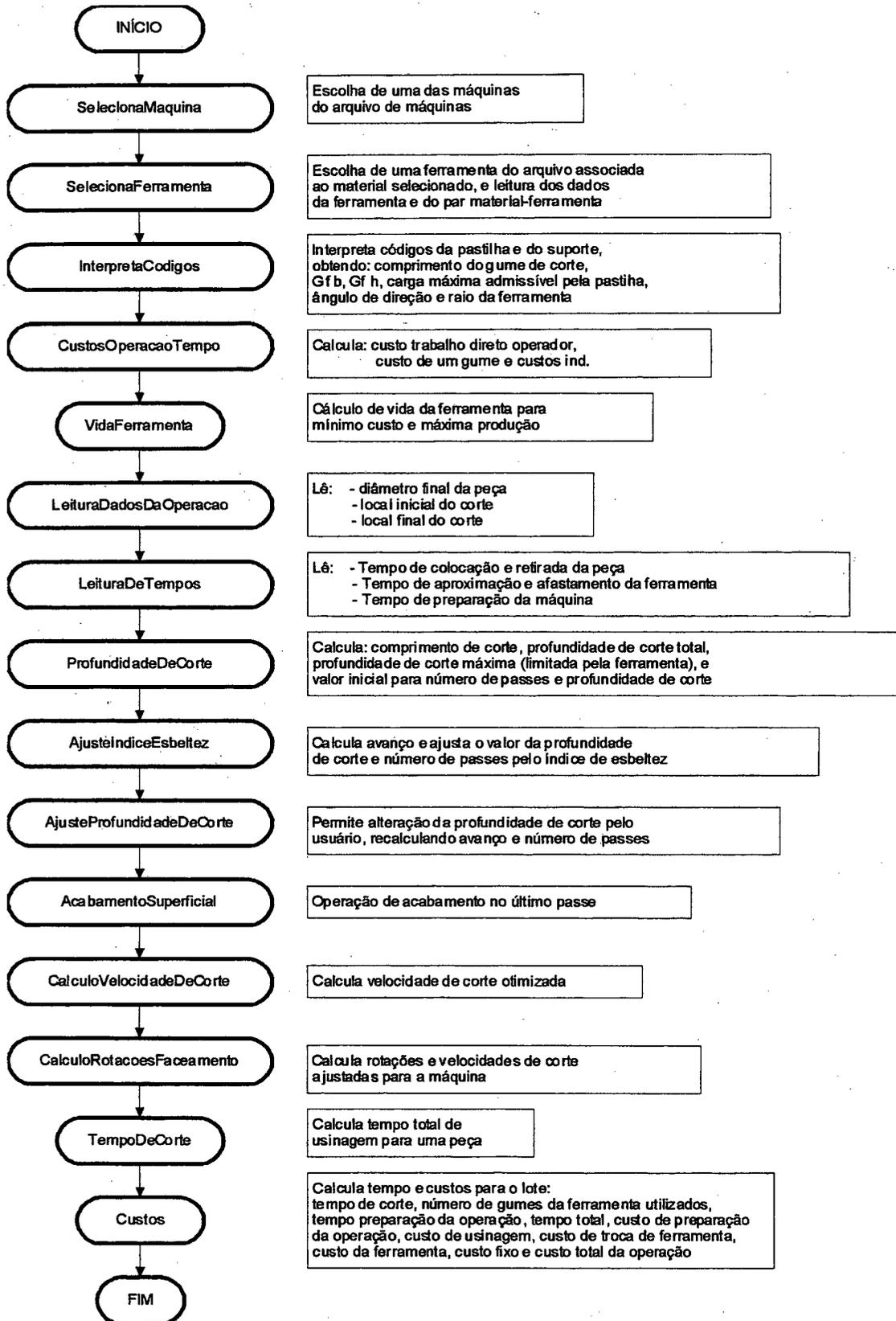


Figura 6.9 -Fluxograma do procedimento para o faceamento.

6.3.2 - Detalhamento das operações.

A otimização das condições de usinagem se dá efetivamente nos módulos de cilindramento e de faceamento. Como trata-se de um programa construído em módulos, muitos destes são utilizados em diferentes momentos tanto na operação de torneamento cilíndrico como na operação de faceamento. Desta maneira serão mostrados inicialmente os procedimentos utilizados para otimização em ambas as operações, em seguida cada operação será demonstrada num exemplo de utilização do programa.

6.3.2.1 - Seleção de máquina ferramenta.

Este é o primeiro procedimento chamado quando do início de um módulo de operação. Ele lê o arquivo de máquinas e lista todas elas em uma janela para seleção, a qual é feita posicionando-se o cursor diretamente sobre a informação na tela. As máquinas são listadas por seu código, descrição e a potência útil de corte, de maneira a facilitar a escolha do processista. O procedimento possui uma rotina de crítica, para testar se as dimensões da peça são compatíveis com a máquina, para tanto usa as informações de diâmetro e comprimento máximo admissíveis, constantes no registro da máquina. A partir deste momento todas as informações sobre esta máquina estarão a disposição do programa para a otimização.

6.3.2.2 - Seleção da ferramenta.

A seleção da ferramenta se faz de modo semelhante ao da máquina, ou seja, seleção direta do arquivo via janela de seleção. Somente as ferramentas que tiverem um par com o material da peça estarão disponíveis para seleção, neste procedimento é feita também a leitura dos registros da ferramenta e do material da peça selecionado anteriormente, dos respectivos arquivos de ferramenta e par material ferramenta.

6.3.2.3 - Procedimento para interpretação dos códigos do inserto e do suporte porta-ferramentas.

Este procedimento retira do código ISO do inserto (ISO-1832) e do porta-ferramentas (ISO-5608) as informações necessárias ao reconhecimento da forma e geometria da ferramenta, estas informações são necessárias à determinação de algumas das restrições tecnológicas e são vistas a seguir.

Sobre o porta-ferramentas :

Interpreta qual o ângulo de direção da ferramenta a partir da leitura da terceira posição do código ISO, usando uma tabela interna do programa.

Sobre o inserto:

- Formato do inserto : posição 1 (campo 1).
- Comprimento do gume de corte interpretando as posições 5 e 6 (campo 5).
- Se o inserto é negativo ou positivo : posição 2 (campo 2).
- Raio de quina : valor das posições 9 e 10 (campo 7) dividido por 10.

A interpretação automática destes códigos, possibilita ao programa também selecionar qual a carga máxima admissível para o inserto a partir de valores da tabela 5.2 inserida no corpo do programa como uma matriz, bem como quais os fatores limitantes da largura e espessura do cavaco (GFh e GFb), para cálculo do avanço e profundidade de corte em função do tipo de inserto, ambos a partir de valores da tabela 5.1, que também está contida no DADUS.

6.3.2.4 - Procedimento para cálculo de custos operacionais.

Este procedimento é preparatório para o cálculo da vida de mínimo custo da ferramenta, pois, calcula as parcelas de custo necessárias à equação (2.49) que determina a vida de mínimo custo do gume.

Assim o custo por minuto do trabalho direto do operador é calculado a partir de dados do arquivo de categorias salariais e do arquivo de dados gerais da empresa. O custo de um

gume, é calculado a partir das informações do arquivo de ferramentas usando a equação (2.39) e os custos indiretos, a partir do arquivo de dados gerais.

6.3.2.5 - Cálculo do intervalo de máxima eficiência para a vida da ferramenta.

Este procedimento faz os cálculos da vida de mínimo custo e da vida de máxima produção, usando respectivamente as equações (2.49) e (2.26). Assim se estabelece o intervalo de máxima eficiência para a vida da ferramenta. Dentro deste intervalo o operador poderá escolher qualquer valor ou ainda usar um índice de zero a dez, chamado de critério de otimização existente no programa, o qual divide o intervalo de máxima eficiência em partes iguais facilitando a escolha da região desejada para a vida da ferramenta, se próxima ao mínimo custo ou à máxima produção.

6.3.2.6 - Leitura dos dados geométricos da operação.

A geometria da operação é fornecida pelo usuário, e utilizada para os cálculos da profundidade e comprimento do corte. Os dados pedidos por esta rotina são o diâmetro final da operação e os locais de início e fim do corte. Este procedimento tem uma crítica para verificar a possibilidade de realizar a operação, caso as dimensões sejam incompatíveis com a peça, é dado um sinal de alerta sonoro e mensagem na tela informando a incorreção dos dados digitados.

6.3.2.7 - Procedimento de leitura dos tempos secundários.

Os tempos improdutivos como tempo de preparação da máquina, tempo de carga e descarga da peça e o tempo de posicionamento da ferramenta, são fornecidos pelo usuário, e serão computados no tempo total de operação.

6.3.2.8 - Procedimento para determinação da profundidade de corte.

Utiliza os dados geométricos da operação para cálculo da profundidade de corte total e do comprimento do corte, e os dados sobre a ferramenta, fornecidos pelo procedimento de interpretação dos códigos (item 6.3.2.3) para determinar a profundidade de corte máxima permitida para a ferramenta, utilizando para isto o valor de G_{fb} na equação (5.4), com esta profundidade será determinado o número inicial de passes necessários a operação, sendo este sujeito a modificações no decorrer da otimização.

6.3.2.9 - Procedimento para cálculo dos avanços e ajuste do índice de esbeltez.

Os avanços otimizados são calculados de acordo com as restrições detalhadas no capítulo 5. O sistema seleciona automaticamente do menor entre eles e com este calcula o índice de esbeltez. Caso este esteja num valor superior a 10, o índice de esbeltez será ajustado diminuindo-se a profundidade de corte. A figura 6.10 mostra o processo de ajuste do índice de esbeltez.

6.3.2.10 - Ajuste da profundidade de corte pelo usuário.

O programa permite ao usuário, se desejar, modificar o valor sugerido da profundidade de corte, dando a ele maior flexibilidade na escolha, mesmo que supere o índice de esbeltez estipulado. Neste procedimento são recalculados os avanços, o número de passes e o índice de esbeltez. Caso desista, o usuário poderá retroceder pedindo o ajuste do índice de esbeltez.

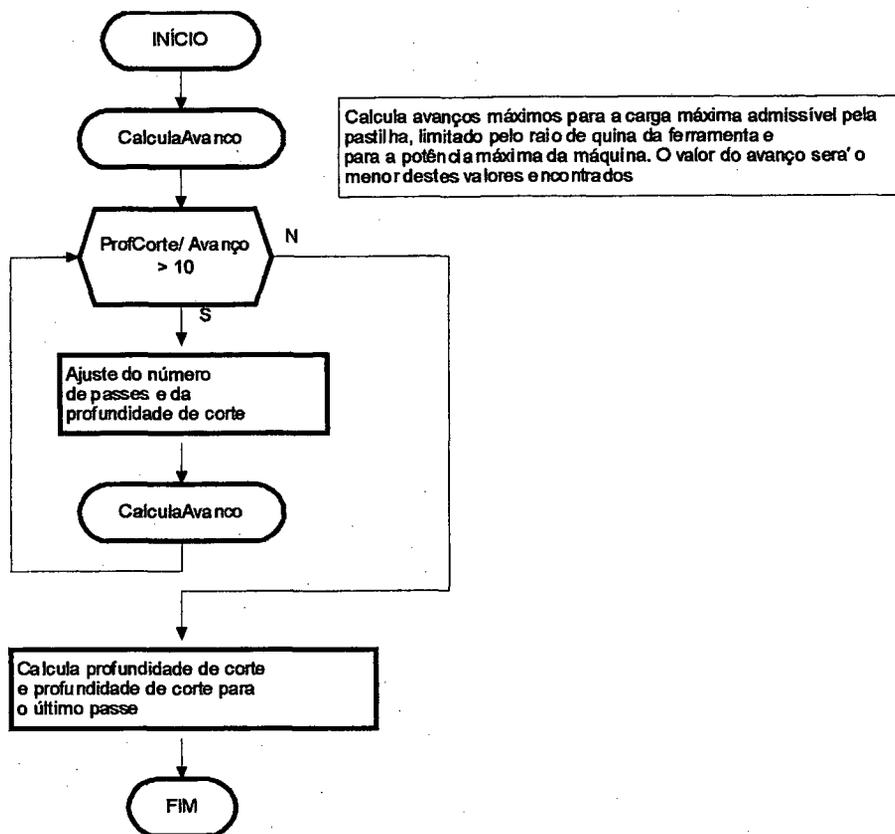


Figura 6.10 - Fluxograma do ajuste de índice de esbeltez.

6.3.2.11 - Acabamento superficial.

Este procedimento não é obrigatório caso seja necessário apenas o desbaste, pois o programa passa para o procedimento seguinte. Caso contrário, é necessário fornecer a profundidade de corte para o acabamento. O programa não aceitará o valor fornecido caso a profundidade de corte do acabamento for maior que a do desbaste. Feito isto serão recalculados os passes de desbaste, e em seguida o programa pede o avanço para o acabamento, este pode ser fornecido de duas maneiras: ou o valor direto do avanço desejado ou a rugosidade máxima permitida para o acabamento. Se a opção for pela rugosidade, o avanço é então calculado de acordo com a equação (5.12). A figura 6.11 mostra detalhes do procedimento de acabamento superficial.

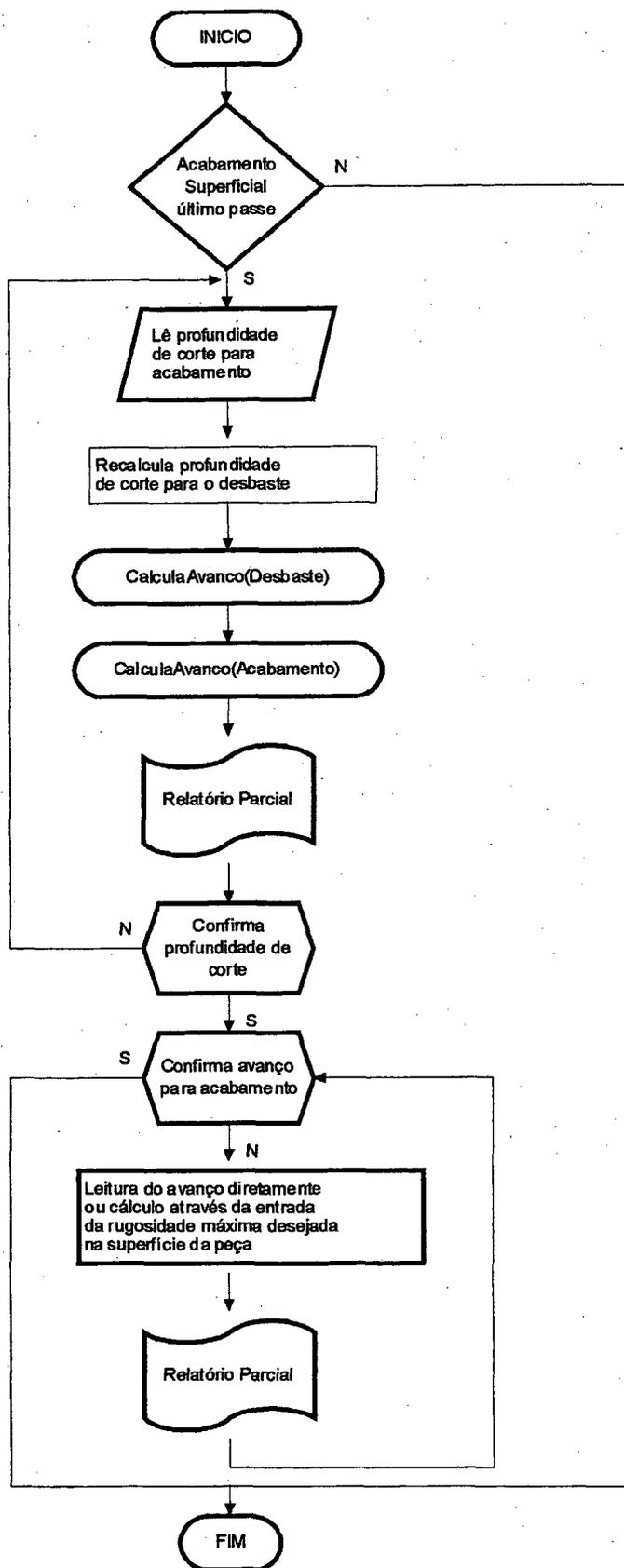


Figura 6.11 - Fluxograma do procedimento de acabamento superficial

6.3.2.12 - Procedimento de cálculo da velocidade de corte otimizada.

Uma vez que o avanço, a profundidade de corte e a vida da ferramenta estejam calculados, são aplicados na fórmula expandida de Taylor, para o par material/ferramenta, já disponível desde a seleção da ferramenta. Desta maneira fica determinada a velocidade de corte otimizada para a operação em questão.

6.3.2.13 - Procedimentos para ajuste das rotações.

Uma vez determinada a velocidade de corte otimizada, devem ser calculadas as rotações necessárias para cada passe. No capítulo 5, nos itens 5.1.1 a 5.1.3 são descritas as restrições de ajuste das rotações, apenas faz-se necessário salientar que, este ajuste é feito de modo diferente em operações de cilindramento e faceamento. No cilindramento as rotações são calculadas para cada passe, tanto com variadores contínuos quanto com variadores escalonados de rotações. Já no faceamento, quando se trata de máquina com variadores contínuos calcula-se a rotação inicial e final do corte, e nas máquinas com variadores escalonados é dada a opção de dividir o faceamento em trechos de forma que a rotação é ajustada para cada trecho, evitando-se grandes quedas de velocidade entre o início e o fim do corte.

6.3.2.14 - Procedimentos para cálculo do tempo de corte da peça.

Uma vez determinadas as rotações, os avanços e os passes necessários a uma operação, o tempo total de usinagem (tempo principal) é calculado para toda a operação sobre uma peça. Para este cálculo o procedimento usa a equação (2.14) para cada passe, totalizando ao final, o tempo total de corte por peça.

6.3.2.15 - Procedimento para cálculo do custo e tempo total de um lote.

Uma vez concluída a operação, são totalizados os tempos e custos por lote usinado, gerando assim os seguintes valores de custos: custo total de preparação que inclui também as operações de posicionamento da ferramenta e carga e descarga das peças; custo de usinagem propriamente, custo com desgaste de ferramentas, custo com o tempo de troca de ferramentas, custos indiretos, aqui chamados de fixos para facilitar a compreensão no jargão das empresas; custo com material da peça e custo total do lote. São fornecidos também os tempos gastos em preparação, tempo total de corte do lote, tempo gasto em troca de ferramentas e o tempo total para a operação neste lote. Estas informações são então repassadas ao procedimento operações, que foi o procedimento que chamou uma das operações (cilindramento ou faceamento), onde será mostrado ao usuário sob a forma de relatório em duas ou três páginas. Se aceito pelo usuário, será armazenado para posterior totalização das operações.

6.4 - Operação do programa.

Para demonstrar o funcionamento do programa Dadus, serão calculadas as condições de usinagem para remoção de material da peça representada na figura 6.12 . Trata-se de uma peça simples, apenas para fins de demonstração das operações de faceamento e cilindramento. Aqui serão mostrados os passos para obtenção dos resultados, desde o fornecimento dos dados da peça, escolha do material, seleção do torno, ferramentas até o relatório final.

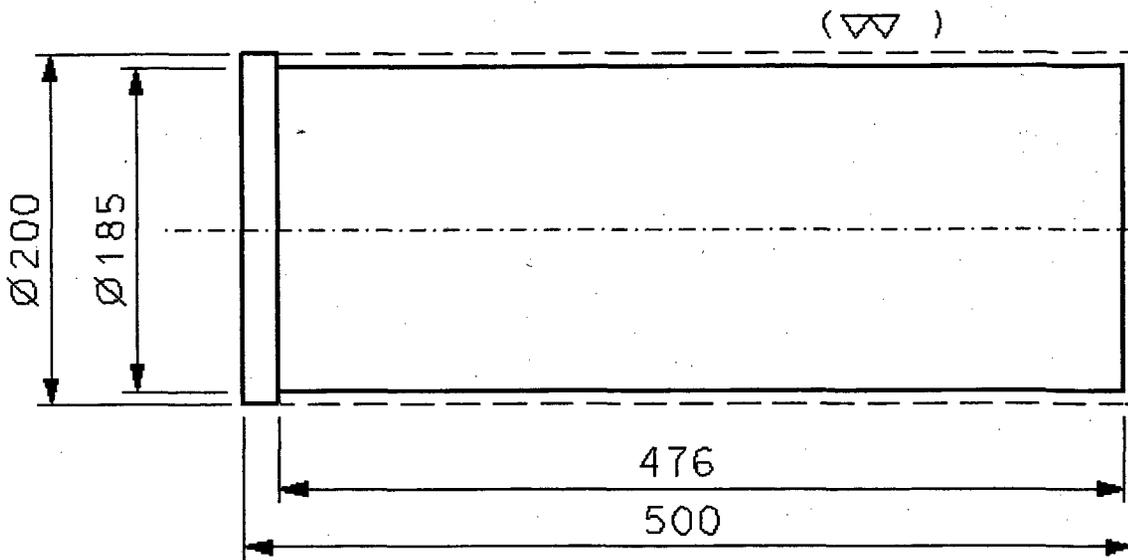


Figura 6.12 - Desenho da peça Eixo Teste

Inicialmente o sistema mostrará uma tela de apresentação e logo após, fica disponível a tela com o menu de opções do DADUS. Feito isto, o usuário deve fornecer os dados gerais da peça através da opção Dados da Peça. A figura 6.13 mostra a tela inicial completa já com os dados da peça, descrevendo a peça bruta, que é uma barra pré-usinada em aço ABNT-1020, com diâmetro inicial de 200 mm e comprimento de 500 mm. A figura 6.14 mostra um detalhe de como é feita a seleção do material da peça entre os aqueles contidos no arquivo de materiais.

Arquivos	Dados da peça	Operações	Relatórios	Totalização
Dados Gerais da Peça Código da Peça: EX1 Descrição da Peça: Eixo Teste Tamanho do Lote: 5 Processo de Fabricação da Peça Bruta: Laminado Material: Código: ABNT-1020 Descrição: ACO ABNT 1020 ENSAIO ETT Custo de Material por Peça: 80.50 [US\$]			Operações Cilindramento Faceamento	
Dados geométricos: Diâmetro: 200.000 [mm] Comprimento: 500.000 [mm]				
Relação de Operações Realizadas				
Nº	Operação	Ferramenta	Máquina	Custo [US\$]
← Selecionam		<ENTER> Executa		Esc Sai do Sistema

Figura 6.13 - Tela inicial do programa Dadus com as opções disponíveis e com os dados da peça já fornecidos

Dados Gerais da Peça	
Código da Peça:	EX1
Descrição da Peça:	Eixo Teste
Tamanho do Lote:	5
Processo de Fabricação da Peça Bruta:	Laminado
Material:	
Escolha de Material	
Código	Descrição
CK 35	
CK 35 U	
CK 45	
C 60 W	
GS-25 CR MO 4	
C 15	
ST 35	
CK 67	
C 60 W 3	
ABNT-1020	ACO ABNT 1020 ENSAIO ETT
↑↓	PgUp PgDn <ENTER> Confirma

Figura 6.14 - Janela de seleção do material da peça.

A etapa seguinte é selecionar a opção Operações que dá acesso ao menu de operações, onde será escolhida qual a operação a realizar. No exemplo em questão foi feita a opção por iniciar pelo torneamento cilindro. A peça está fixa entre placa e ponta rotativa e após o torneamento cilíndrico será faceada apoiada por uma luneta com rolamentos. Uma vez selecionada a operação, será apresentada a janela de seleção da máquina, onde o usuário poderá mover o cursor acima e abaixo, com as teclas (↑↓, PgUp, PgDn). Uma vez escolhida a máquina, basta confirmar com "ENTER", assim todos os dados sobre a máquina e seu operador passam a estar disponíveis para o programa.

Máquina:		Cilindramento	
		Descrição:	
		Escolha de Máquina	
T - Ø5	Torno Romi I - 45		14.72 KW
TORNO N. 2	MUN-U (copiador)		4.42 KW
TORNO N. 3	Torno P400		5.52 KW
TORNO N. 7	Torno MIN - 15		1.55 KW
TESTE	TESTE MAQUINA CONTINUA		15.00 KW
NA-Ø1	TORNO NARDINI		5.40 KW
C-1Ø	MAZAK COSMOS 1ØU		6.62 KW
C-3Ø	COSMOS 3Ø		17.65 KW
TORMAX-3Ø	TORNO ROMI ET		4.40 KW

↑↓ PgUp PgDn <ENTER> Confirma

Esc Retorna

Figura 6.15 - Janela para seleção de máquina.

Selecionada a máquina, o programa automaticamente mostra uma nova janela, agora para a seleção da ferramenta a ser utilizada. A seleção é feita de maneira análoga a da máquina, como mostra a figura 6.16. Feito isto o programa mostrará nova tela onde será feita a opção do tempo de vida do gume, este tempo deve estar dentro da faixa de máxima eficiência como mostra a figura 6.17, do contrário não será aceito pela crítica do procedimento. A escolha pode ser feita por introdução direta da vida ou pela seleção de um número entre zero e dez, de forma que em zero terá o tempo de máxima produção e em dez o de mínimo custo. Nesta

mesma tela são fornecidos os dados sobre a geometria da operação e os tempos secundários da mesma.

Cilindramento			
Máquina:	TORMAX-30	Descrição:	TORNO ROMI EIT
Ferramenta:		Fabricante:	
		Classe:	
Escolha de Ferramenta			
Código da Pastilha	Fabricante	Classe	Suporte
TNMM160408TN	SANDVIK	P35R	PTJNR2525-A16
<p style="text-align: center;">↑↓ PgUp PgDn <ENTER> Confirma</p>			
Esc Retorna			

Figura 6.16 - Janela para seleção da ferramenta.

Cilindramento			
Máquina:	TORMAX-30	Descrição:	TORNO ROMI EIT
Ferramenta:	TNMM160408TN	Fabricante:	SANDVIK
		Classe:	P35R
Uida ferramenta:	7.50 [Min.Seg]	[2.56 A 12.60] [Min.Seg]	
Critério de Otimização:	5 [0 ==> 10	<máxima produção ==> mínimo custo>]	
Entrada de dados geométricos da operação:			
Diâmetro final:	185.000 [mm]		
Local inicial do corte:	0.000 [mm]		
Local final do corte:	480.000 [mm]		
Tempos:			
Tempo de colocação e retirada da peça:	4.50 [Min.Seg/Peça]		
Tempo de aproximação afastamento da ferramenta:	0.25 [Min.Seg/Peça]		
Tempo de preparação da máquina:	25 [Min.Seg]		
Esc Retorna			

Figura 6.17 - Escolha da vida da ferramenta, entrada de dados geométricos da operação e tempos secundários.

Após o fornecimento dos dados da operação será apresentado um relatório parcial onde surgem os primeiros resultados. Nele além do comprimento e profundidade total do corte, são mostrados o número de passes, profundidade de corte, avanço, fator limitante do avanço e índice de esbeltez. É dada a opção do usuário modificar a profundidade de corte e, caso faça ultrapassar o índice de esbeltez o programa questionará se o usuário realmente deseja esta situação. Isto é feito para dar maior flexibilidade ao programa pois muitas vezes pode o usuário necessitar, por uma situação particular, exceder por pouco o índice de esbeltez. Uma vez determinados os parâmetros para o desbaste, o programa questionará se haverá operação de acabamento, se positivo, o usuário fornece a profundidade de corte para o acabamento, assim o programa refaz os cálculos para o desbaste, e calcula a profundidade mais próxima possível da desejada. Caso o usuário a aceite, deverá escolher o valor do avanço, que não poderá ser maior que o valor usado no desbaste. Existem duas formas de escolha para o avanço de acabamento: a primeira é o fornecimento direto do valor desejado, a outra é a partir do valor máximo da rugosidade R_t . No exemplo o valor usado foi uma rugosidade de $16 \mu\text{m}$, isto aciona uma rotina de cálculo que fornecerá o valor do avanço para esta condição. A figura 6.18 mostra o relatório parcial, se confirmado, isto acionará os procedimentos de cálculo das velocidades e rotações.

Máquina: TORMAX-30		Cilindramento					
Ferramenta: INMM160408-QR		Descrição: TORNO ROMI ETT	Classe: P35R				
		Fabricante: SANDVIK					
Dados geométricos da operação:							
Comprimento de corte: 480.000 [mm]							
Profundidade de corte total: 7.500 [mm]							
Parâmetros selecionados para o desbaste:							
Número de passes: 3							
Profundidade de corte: 2.000 [mm]							
Avanço: 0.43300 [mm/rot]		limitado por Máquina (Potencia)					
Índice de esbeltez: 4.62							
Parâmetros do acabamento superficial:							
Profundidade de corte: 1.500 [mm]							
Avanço: 0.32700 [mm/rot]							
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2">Aceita avanço para o último passe?</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Sim</td> <td style="text-align: center;">Não</td> </tr> </table>				Aceita avanço para o último passe?		Sim	Não
Aceita avanço para o último passe?							
Sim	Não						
			Esc Retorna				

Figura 6.18 - Cálculo dos avanços e profundidades de corte para o cilindramento

Após a confirmação do avanço, o programa realiza os cálculos das velocidades de corte para desbaste e acabamento e, as respectivas rotações. Os tempos e custos da operação são totalizados e mostrados ao usuário. As figura 6.19, 6.20 e 6.21 são as telas do relatório parcial da operação, elas podem ser verificadas usando as teclas (PgUp,PgDn), e caso a operação seja aceita serão armazenadas em memória.

Relatório de operação - Cilindramento			1
Máquina:	TORMAX-30		
Código da Pastilha:	INMM160408-QR	Fabricante: SANDVIK	Classe: P35R
Alterações na geometria da peça:			
Local do corte (inicial --> final):	0.000 --> 480.000 [mm]		
Diâmetro (inicial --> final):	200.000 --> 185.000 [mm]		
Tempos e custos (lote de 5 peças):			
Etapas	Tempos [Min.seg]	Custos [US\$]	
Preparação	56.15	5.97	
Corte	72.17	25.74	
Troca de ferramenta	13.30	1.43	
Ferramenta	-----	21.34	
Fixos	-----	4.73	
Total.....	142.02	59.21	
Vida da Ferramenta:			
Tempo de vida da ferramenta (gume):	7.58 [Min.seg]		
Critério de otimização:	5 [0 ==> 10 (máx. produção ==> mín. custo)]		
Número de gumes utilizados:	9		
PgDn - próxima página			Esc Retorna

Figura 6.19 - Relatório parcial de tempos e custos.

Relatório de operação - Cilindramento			2
Dados do desbaste:			
Profundidade de corte: 2.000 [mm]			
Avanço: 0.43300 [mm/rot]		limitado por: Máquina (Potencia)	
Número de passes: 3			
Nº	Rotação [rpm]	UC real [m/min]	
1	287.0	180.33	
2	300.0	184.73	
3	300.0	180.96	
PgUp - página anterior			PgDn - próxima página
			Esc Retorna

Figura 6.20 - Relatório das condições de usinagem em desbaste para o cilindramento.

Relatório de operação - Cilindramento		3
Dados do acabamento superficial no último passe:		
Profundidade de corte: 1.50 [mm]		
Avanço: 0.32700 [mm/rot]		
Rotação: 458.0 [rpm]		UC real: 270.50 [m/min]
PgUp - página anterior		Esc Retorna

Figura 6.21 - Relatório das condições de usinagem para o acabamento.

Uma vez confirmada a operação anterior, o programa volta a tela principal com o menu de opções, agora de modo análogo ao que se fez para o cilindramento escolhe-se o faceamento. A seleção de máquina e ferramenta é idêntica a do cilindramento, chegando

novamente o usuário novamente a uma tela para escolha da vida da ferramenta, dados geométricos da operação e tempos secundários, conforme a figura 6.22 .

Máquina: TORMAX-30	Faceamento
Ferramenta: TNMM160408-QR	Descrição: TORNO ROMI ETI
	Fabricante: SANDVIK
	Classe: P35R
Vida ferramenta: 7.50 [Min.Seg]	[2.56 A 12.60] [Min.Seg]
Critério de Otimização: 5 [0 ==> 10	<máxima produção ==> mínimo custo]
Entrada de dados geométricos da operação:	
Diâmetro final: 0.000 [mm]	
Local inicial do corte: 0.000 [mm]	
Local final do corte: 4.000 [mm]	
Tempos:	
Tempo de colocação e retirada da peça: 5.50 [Min.Seg/Peça]	
Tempo de aproximação afastamento da ferramenta: 0.20 [Min.Seg/Peça]	
Tempo de preparação da máquina: 1 [Min.Seg]	
Esc Retorna	

Figura 6.22 - Escolha da vida da ferramenta, entrada de dados geométricos e tempos secundários, operação de faceamento.

Após este passo, da mesma maneira que no cilindramento, o programa mostra uma tela com valores dos parâmetros de usinagem. Apenas para as máquinas com variadores escalonados de rotação é necessário informar-se o número de trechos em que se deseja fracionar o faceamento, de modo a obter se uma menor queda entre a velocidade inicial e a final. Assim no exemplo o cálculo do faceamento foi dividido em dois trechos, conforme pode ser visto na figura 6.23.

Máquina: FORMAX-30	Faceamento
Ferramenta: INMM160408-0R	Descrição: TORNO ROMI ETI
	Fabricante: SANDVIK
	Classe: P35R
Dados geométricos da operação:	
Comprimento de corte: 92.500 [mm]	
Profundidade de corte total: 4.000 [mm]	
Parâmetros selecionados para o desbaste:	
Número de passes: 2	Número de trechos: 2
Profundidade de corte: 2.000 [mm]	
Avanço: 0.55700 [mm/rot]	limitado por Máquina <Potencia>
Índice de esbeltez: 3.59	
Aceita profundidade de corte calculada?	
Sim Não	

Esc Retorna

Figura 6.23 - Cálculo dos avanços e profundidade de corte no faceamento.

Os resultados são fornecidos em relatório semelhante ao do cilindramento, apenas as rotações são dadas para os trechos ao invés de passes. Quando se tratar de máquina com variação contínua de rotações, são fornecidas a rotação inicial e a rotação final.

Os resultados de tempos e custos tem a mesma forma dos já vistos na figura 6.19, e as condições de usinagem da operação são mostradas como na figura 6.24.

Relatório de operação - Faceamento			2
Dados do desbaste:			
Número de passes: 2			
Profundidade de corte: 2.000 [mm]			
Avanço: 0.55700 [mm/rot] limitado por: Máquina <Potencia>			
Nº	Rotação [rpm]	UC real [m/min]	
1	380.0	165.64	
2	1156.0	167.97	
PgUp - página anterior			Esc Retorna

Figura 6.24 - Relatório das condições de usinagem no faceamento.

Uma vez realizadas as operações, o usuário poderá verificar o relatório individual de cada operação, para isto, é bastante selecionar a opção Relatórios do menu principal. Assim terá acesso a relação de operações realizadas, que se encontra no quadro inferior da tela, como mostrado na figura 6.25. Desta forma, um relatório já visto no momento em que se realizou a operação pode ser novamente verificado.

Arquivos	Dados da peça	Operações	Relatórios	Totalização
Dados Gerais da Peça Código da Peça: EX1 Descrição da Peça: Eixo Teste Tamanho do Lote: 5 Processo de Fabricação da Peça Bruta: Laminado Material: Código: ABNT-1020 Descrição: ACO ABNT 1020 ENSAIO ETT Custo de Material por Peça: 80.50 [US\$]				Operações Cilindramento Faceamento
Dados geométricos: Diâmetro: 200.000 [mm] Comprimento: 500.000 [mm]				
Relação de Operações Realizadas				
Nº	Operação	Ferramenta	Máquina	Custo [US\$]
1	Cilindramento	TNMM160408-QR	TORMAX-30	59.21
2	Faceamento	TNMM160408-QR	TORMAX-30	5.57
← Seleccionam		<ENTER> Executa		Esc Sai do Sistema

Figura 6.25 - Tela principal após a realização das operações.

No menu da tela principal encontra-se a opção de totalização, ela abre uma janela para verificação das parcelas de custos gerados até o momento pelas operações de usinagem, além de mostrar o tempo total de usinagem da peça. A figura 6.26 mostra a janela de totalização.

Totalização de custos da peça	
Custos: [US\$]	
Custo de preparação:	9.35
Custo de usinagem:	26.77
Custo de ferramenta:	21.34
Custo de troca de ferramenta:	1.43
Custo fixo:	5.89
Custo de material:	402.50
Custo total de fabricação do lote:	467.28
Tempo total de fabricação do lote:	176.46 [Min.seg]
Imprimir relatório completo da peça?	
<input type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não

Figura 6.26 - Janela de totalização dos custos de usinagem.

Existe ainda a opção de se imprimir um relatório completo da operação. No Anexo III encontra-se a listagem deste exemplo, gerada pelo programa Dadus.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões.

Este trabalho descreve um ensaio de usinagem de longa duração e o desenvolvimento de um sistema computacional para determinação de condições otimizadas de usinagem, para o processo de torneamento. O uso da metodologia proposta para o ensaio de longa duração mostrou-se eficaz, pois, possibilitou a obtenção dos dados necessários para o arquivo de dados tecnológicos de usinagem, utilizando-se condições próximas as de uso normal da ferramenta[15], tornando assim os resultados mais significativos.

Os dados obtidos no ensaio serviram para a determinação da constante e dos expoentes da equação expandida de Taylor para o par material da peça / material da ferramenta, através do método de regressão linear múltipla. Este resultado serviu para a utilização em um exemplo destinado a validar o sistema computacional.

Mesmo tendo-se demonstrado eficazes na determinação de condições de corte, os ensaios de usinagem de longa duração tem um elevado custo e consomem muito tempo, sendo difícil a sua ampla aplicação por parte das indústrias. Desta maneira ensaios específicos como os realizados neste trabalho só se justificam quando houver volume considerável de produção, seja pelo tamanho dos lotes, ou seja pela repetição de uso do mesmo processo em vários lotes.

A determinação dos parâmetros de usinagem na maioria das empresas de manufatura, continua sendo realizada de maneira não otimizada, um dos motivos alegados é que a relação custo/benefício seria pequena[22], especialmente pelo fato das bases de dados estarem inicialmente sobre plataformas de médio e grande porte. O sistema apresentado neste trabalho apresenta uma solução condizente com o atual estágio em que se encontra o desenvolvimento de computadores pessoais, onde, a cada dia que passa estes estão mais baratos e com maior capacidade computacional, sendo amplamente utilizados inclusive em pequenas e médias empresas.

O sistema para determinação de condições otimizadas de usinagem (DADUS) mostrou-se uma ferramenta simples e bastante rápida. Podem ser feitos cálculos e gerados relatórios para diferentes situações em poucos minutos, o que possibilita avaliar mais de uma solução para uma mesma usinagem, sem o trabalho repetitivo de pesquisa em manuais e tabelas, o que deve levar os analistas de processos a uma melhor avaliação das condições de corte. A velocidade de corte otimizada, o avanço, e a profundidade de corte, com os passes devidamente distribuídos assim como a rotação ajustada à máquina são parâmetros fornecidos de maneira rápida, clara e eficaz. Outra vantagem é que a preparação de orçamentos pode ser facilitada pois, o cálculo dos tempos de usinagem bem como os tempos secundários são realizados automaticamente e ficam disponíveis como parte dos relatórios.

Os resultados dos testes em otimizações mostraram coerência com aqueles esperados, e um bom desempenho de acesso às informações tecnológicas, tanto no que tange aos cálculos de otimização, quanto nas consultas, pois, o programa que administra os arquivos do sistema pode ser chamado de dentro do programa DADUS de maneira bem objetiva para o usuário. Porém, nem sempre é possível a utilização de todo o potencial do sistema, um exemplo é quando do uso de máquinas com baixa potência ou rotação, neste caso os resultados otimizados podem estar fora da faixa de rotações ou da potência limite da máquina, impedindo o uso de avanços adequados.

7.2 - Sugestões para trabalhos futuros.

A estrutura modular do sistema abre várias possibilidades de continuação deste trabalho, podendo este ser incorporado à outros ou ir na direção de sua ampliação e de sua otimização.

Uma primeira sugestão seria a construção de módulos para as outras operações do processo de torneamento, tornando o sistema mais completo, bem como evoluir para um sistema mais amplo, com processos de fresamento e furação. No processo de furação já foram desenvolvidos trabalhos anteriores no Departamento de Eng. Mecânica da UFSC[58], sendo

necessária no entanto a adequação das duas propostas a uma forma comum de processamento das informações.

O acoplamento do sistema DADUS a um sistema gerenciador de ferramentas deve aumentar a sua eficiência, pois além do processo de otimização das condições de corte, introduz uma substancial melhoria no auxílio à seleção e controle no uso das ferramentas.

A implantação deste sistema usando um maior número de dados, através de um centro de informações de usinagem, em empresas de pequeno e médio porte poderia representar uma melhoria na sua produtividade.

Outra sugestão seria aproveitar os módulos de otimização do sistema DADUS, integrando-os a um dos sistemas de planejamento de processos auxiliado por computador (CAPP) desenvolvidos no Departamento de Engenharia mecânica da UFSC como por exemplo o trabalho descrito em [59].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [01] GROOVER, Mikell P. **Automation, production Systems, and Computer Integrated Manufacturing.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
- [02] CHANG, T.C. ; WYSK, R.A. **An Introduction to Automated Process Planning Systems.** New Jersey: Prentice-hall, 1985.
- [03] MACHINING data handbook. Cincinnati : Machinability Data Center Inc. 3. ed., 1980. 2v.
- [04] BOEHS, L.; FERREIRA, A. C. **Aspectos da Concepção de um Centro de Informações de Usinagem (CINFUS) no Brasil.** In COBEM (8:1985). Anais... p.701-704.
- [05] DAFES, user manual, version S1/3. Aachen : EXAPT, 1979.
- [06] BOEHS, Lourival. **Projeto e implantação de um sistema computadorizado de banco de dados de usinagem(CINFUS).** Florianópolis, 1988. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [07] EXAPT standard werkstoffdatei fuer die rechnerunterstuetzte schnittwertermittlung beim drehen. Aachen , [s.d].
- [08] FERRARESI, Dino. **Características de usinagem dos metais para operação de torneamento : força e velocidade de corte de diferentes metais.** São Paulo: ABM-Associação Brasileira de Metais. 1987.
- [09] MESQUITA, Noemia G. de Mattos de. **Determinação dos parâmetros da fórmula expandida de Taylor.** Florianópolis, 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [10] KÖNIG, W. **Tecnologia da Fabricação : tornear, furar e fresar.** Aachen:[s.n.],1981. v.1. Tradução : W. L. Weingaertner.
- [11] FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Edgar Blücher, 1970. v. 1.
- [12] STEMER, C.E. **Ferramentas de Corte : ferramentas simples de tornear.** Florianópolis : UFSC, 1987.
- [13] KRONENBERG, M. **Machining Science and Application : theory and practice for operation and development of machining process.** Oxford: Pergamon Press, 1966.

- [14] MACHADO, A. R.; BOEHS L. e GIANINI, W. L.. Torneamento com metal duro e cerâmica. **Máquinas e Metais**, São Paulo. mai. 1987.
- [15] FERRARESI, Dino. Otimização das condições de usinagem em produção seriada. **Máquinas e Metais**, São Paulo, p24-37. nov. 1989.
- [16] WEINGAERTNER, W.L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 2. ed. São Paulo: Alcan - Alumínio do Brasil, 1991.
- [17] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Specification for tool-life testing, with single point turning tools**. ISO-3685. 2.ed.,[s.l.], 1993.
- [18] VENKATESH, V.C.; SATCHITHANANDAM, M. A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes. **Annals of the CIRP**. v.29, n.1,p.19-22, 1980.
- [19] CONSALTER, L. A. **Arquivo de dados tecnológicos de usinagem para a determinação automática de condições de corte em tornos com comando numérico**. Florianópolis, 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [20] GIRONDI, Amir Elmo de Castro. **Determinação automática de condições de usinagem na programação de máquinas NC**. Florianópolis, 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [21] HITOMI, K. **Manufacturing Systems Engeneering**. London: Taylor & Francis, 1979.
- [22] QUEIROZ, Abelardo A.; BOEHS, L.. **Seleção otimizada de condições de usinagem : software apoiado por banco de dados**. In:SCNB(6:1986).Anais ..., p. 01.01-01.17.
- [23] ARMAREGO, E.J.A.; BROWN, R.H. **The machining of metals**. New Jersey: Prentice-Hall, 1969.
- [24] ERMER, D.S. Optimization of the constrained machining economics problem by geometric programming. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. p.1067-1072, nov. 1971.
- [25] _____; KROMODIHARDJO, S. Optmization of multipass turning with constrains. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. v.103, p.462-468, nov. 1981.
- [26] IWATA, K.; MUROTSU, Y. ; IWATSUBO, T., FUJII, S. A probabilistic approach to the determination of the optimum cutting conditions. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. p.1099-1107, nov. 1972.

- [27] IWATA, K.; MUROTSU, Y.; OBA, F. Optimization of cutting conditions for multi-pass operations considering probabilistics nature in machining processes. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME.** p.210-217, fev. 1977.
- [28] ROSSETTO, S.; ZOMPI, A. A stochastic tool-life model. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME.** v.103, p.126-130, fev. 1981.
- [29] _____; LEVI, R. Fracture and wear as factor affecting stochastic tool-life model and machining economics. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME.** p.281-286, fev. 1977.
- [30] KOULAMAS, Christos P. Simultaneous determination of optimal machining conditions and tool replacement policies in constrained machining Econ. problems by geometric programming. **International J. of Prod. Res.** v.29, n.12, p.2407-2421, 1991.
- [31] COWTON, C.J.; WIRTH, A. On the economics of cutting tools. **International J. of Prod. Res.** v.31, n.10, p.2441-2446, 1991.
- [32] LAMBERT, Brian K. ; WALVEKAR, Arun G. Optimization of multi-pass machining operations. **International J. of Prod. Res.** v.16, n.4, p.259-265, 1978.
- [33] LAMBERT, Brian K. ; WALVEKAR, Arun G. An application of geometric programming to machining variable selection. **International J. of Prod. Res.** v.8, n.3, p.241-244, 1970.
- [34] HITOMI, K.; OHASHI, K. Optimum process design for a single-stage multifunctional production system. **Transaction of the ASME.** v.103, p.218-223, may. 1981.
- [35] OKUSHIMA, K.; HITOMI, K. A study of economical machining : an analysis of the maximum-profit cutting speed. **International J. of Prod. Res.** v. 3, n.1, p.73-78, 1964.
- [36] ZHOU, Chen; WYSK, R. A. Tool status recording and its use in probabilistic optimization. **J. of Eng. for Industry, Transactions. of the ASME.** v.114, p.494-499, nov. 1992.
- [37] SHIN, Y. C. ; JOO, Y. S. Optimization of machining condition with practical constraints. **International J. of Production Research.** v.30, n.12, p.2907-2919, 1992.
- [38] AGAPIOU, J. S. The optimization of machining operations based on a combined criterion, Part 1: the use of combined objectives in single-pass operations. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME.** v.114, p.500-507, nov. 1992.

- [39] AGAPIOU, J. S. The optimization of machining operations based on a combined criterion, Part 2: multipass operations. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. v.114, p.500-507, nov. 1992.
- [40] _____. Optimization of multistage machining systems, Part 1: mathematical solution. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. v.114, p.524-531, nov. 1992.
- [41] _____. Optimization of multistage machining systems, Part 2: mathematical solution. **J. of Eng. for Industry, Transactions of the ASME**. v.114, p.532-538, nov. 1992.
- [42] HITOMI, K. Analises of optimal machining conditions for flow-type automated manufacturing systems. **International J. of Prod. Res.** v.29, n.12, p.2423-2432, 1991.
- [43] BOEHS, L. **Metodologia de ensaios sistemáticos de usinagem para processo de torneamento**. Florianópolis. [s.d.]. Publicação Interna. GRUCON-Universidade Federal de Santa Catarina.
- [44] SOLAJA, V. ; KULJANIC, E.. Random strategy method for determining tool Life equations. **Annals of the CIRP**. v.29, n. 1, p.351-356, 1980.
- [45] WALKENBACH, J. , MAGUINESS, D. **Excel 4 para Windows : guia completo**. Rio de Janeiro:Berkley, 1992.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Classificação por composição química de aços para construção mecânica**. NBR-6006. Mar., 1980.
- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais metálicos - determinação do tamanho de grão(TG)**. NBR-6000. Mar., 1980.
- [48] COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo:Edgard Blucher, 1981.
- [49] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da dureza Brinell de materiais metálicos**. NBR 6394, 1980.
- [50] SPIEGEL, Murray R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.Coleção Schaum
- [51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos**. NBR-6152.
- [52] ENSAIOS geométricos de máquinas ferramentas. Florianópolis, 1989. Publicação interna .FUNDAÇÃO CERTI. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [53] SANDVIK-COROMANT. **Herramientas de Tornear: Productos para el mecanizado del metal**. 1993-1994. C-1000:4-SPA.

- [54] COSTA NETO, Pedro L. de Oliveira. **Estatística**. São Paulo : Edigard Blücher. 1977-1987.
- [55] CRESPO, A. A. **Estatística Fácil**. São Paulo: Saraiva, 1991.
- [56] HOFF, M.; DAMMER, L.; WESCH, H.; BROKAMP, R. **Anleitung zur firmenspezifischen schnittwertermittlung mit hilfe von korrekturfaktoren - ergebnisse einer arbeitsgruppe**. Aachen:WZL,[19--]. Tradução: Rolf B. Schroeter.
- [57] ROZENFELD, Henrique. Um sistema CAPP modular para industrias pequenas e Medias. **Máquinas e Metais**. São Paulo, n.290, p.26-38, mar. 1990.
- [58] EW, A.N. **Planejamento do processo auxiliado por computador com exemplo de aplicação em operações de furação**. Florianópolis, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina.
- [59] MOREIRA, N.P.; FERREIRA, A.C. **Ambiente aberto visando o CIM : uma proposta de base**. Trabalho submetido ao Congresso Internacional de Computação Gráfica. (1992:[s.l.]).

APÊNDICE I

RESULTADOS USADOS NO CÁLCULO DOS EXPOENTES E DA CONSTANTE DA EQUAÇÃO EXPANDIDA DE TAYLOR.

Pontos	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	VB (mm)	T (min)
1	172	0,201	1,6	0,10	3,35
2	172	0,201	1,6	0,14	6,70
3	172	0,201	1,6	0,17	10,05
4	172	0,201	1,6	0,20	13,40
5	172	0,201	1,6	0,23	16,75
6	172	0,201	1,6	0,25	20,10
7	172	0,201	1,6	0,27	23,45
8	172	0,201	1,6	0,29	26,80
9	172	0,201	1,6	0,31	30,15
10	172	0,201	1,6	0,33	33,50
11	190	0,278	2,5	0,05	1,60
12	190	0,278	2,5	0,10	3,20
13	190	0,278	2,5	0,13	4,80
14	190	0,278	2,5	0,17	6,40
15	190	0,278	2,5	0,21	8,00
16	190	0,278	2,5	0,24	9,60
17	190	0,278	2,5	0,28	11,20
18	190	0,278	2,5	0,31	12,80
19	190	0,278	2,5	0,34	14,40
20	190	0,278	2,5	0,38	16,00
21	210	0,201	1,6	0,12	2,45
22	210	0,201	1,6	0,17	4,90
23	210	0,201	1,6	0,20	7,35
24	210	0,201	1,6	0,23	9,80
25	210	0,201	1,6	0,25	12,25
26	210	0,201	1,6	0,27	14,70
27	210	0,201	1,6	0,29	17,15
28	210	0,201	1,6	0,31	19,60
29	210	0,201	1,6	0,33	22,05
30	210	0,201	1,6	0,34	24,50

Pontos	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	VB (mm)	T (min)
31	210	0,278	1,6	0,07	1,32
32	210	0,278	1,6	0,12	2,64
33	210	0,278	1,6	0,16	3,96
34	210	0,278	1,6	0,19	5,28
35	210	0,278	1,6	0,22	6,60
36	210	0,278	1,6	0,25	7,92
37	210	0,278	1,6	0,28	9,24
38	210	0,278	1,6	0,30	10,56
39	210	0,278	1,6	0,33	11,88
40	210	0,278	1,6	0,35	13,20
41	210	0,433	1,6	0,14	1,10
42	210	0,433	1,6	0,19	2,20
43	210	0,433	1,6	0,23	3,30
44	210	0,433	1,6	0,27	4,40
45	210	0,433	1,6	0,29	5,50
46	210	0,433	1,6	0,32	6,60
47	210	0,433	1,6	0,35	7,70
48	210	0,433	1,6	0,37	8,80
49	210	0,433	1,6	0,39	9,90
50	210	0,433	1,6	0,41	11,00
51	210	0,201	2,5	0,05	1,81
52	210	0,201	2,5	0,09	3,62
53	210	0,201	2,5	0,13	5,43
54	210	0,201	2,5	0,16	7,24
55	210	0,201	2,5	0,20	9,05
56	210	0,201	2,5	0,23	10,86
57	210	0,201	2,5	0,26	12,67
58	210	0,201	2,5	0,30	14,48
59	210	0,201	2,5	0,33	16,29
60	210	0,201	2,5	0,36	18,10

Pontos	Vc (m/min)	f (mm/rot)	ap (mm)	VB (mm)	T (min)
61	240	0,201	1,6	0,11	3,00
62	240	0,201	1,6	0,17	6,00
63	240	0,201	1,6	0,21	9,00
64	240	0,201	1,6	0,25	12,00
65	240	0,201	1,6	0,29	15,00
66	240	0,201	1,6	0,32	18,00
67	240	0,201	1,6	0,35	21,00
68	240	0,201	1,6	0,38	24,00
69	240	0,201	1,6	0,41	27,00
70	240	0,201	1,6	0,43	30,00
71	260	0,201	1,6	0,11	1,80
72	260	0,201	1,6	0,16	3,60
73	260	0,201	1,6	0,20	5,40
74	260	0,201	1,6	0,23	7,20
75	260	0,201	1,6	0,25	9,00
76	260	0,201	1,6	0,28	10,80
77	260	0,201	1,6	0,30	12,60
78	260	0,201	1,6	0,32	14,40
79	260	0,201	1,6	0,34	16,20
80	260	0,201	1,6	0,36	18,00

APÊNDICE II

TESTE DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO DE KOLMOGOROV-SMIRNOV E DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA DO ENSAIO [09,54].

Para que o resultado dos ensaios tenha um grau de confiabilidade aceitável é necessário medir o desgaste do inserto um número mínimo de vezes, no decorrer do ensaio. No presente trabalho usou-se como referência uma amostra mínima de 40 observações, tomando como base o trabalho de Mesquita [09].

Como forma de validar a hipótese de que os desgastes de flanco tinham uma distribuição normal, e verificar se o tamanho da amostra havia sido correto, aplicou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov sobre os resultados obtidos.

A população foi dividida em classes de mesma amplitude, usando-se o número inteiro mais próximo do valor de k na equação abaixo:

$$k = 1 + 3,3 \log n$$

onde,

k : é o número de classes de mesma amplitude

n : número de observações de VB.

Como o número de observações foi igual a 80, tem-se que a população deve ser dividida em 7 classes de igual amplitude.

A frequência, f_i , com que os desgastes aparecem dentro de cada classe é mostrada em um gráfico na próxima página.

A estatística de Kolmogorov-Smirnov é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$D_n = \max |F_n(VB) - F_o(VB)|$$

onde,

$F_n(VB)$ é a função distribuição acumulada determinada com $i = 0, 1, 2, \dots, n$ sendo n o número total de observações e é definida como:

$$F_n(VB) = \frac{F_i}{n}$$

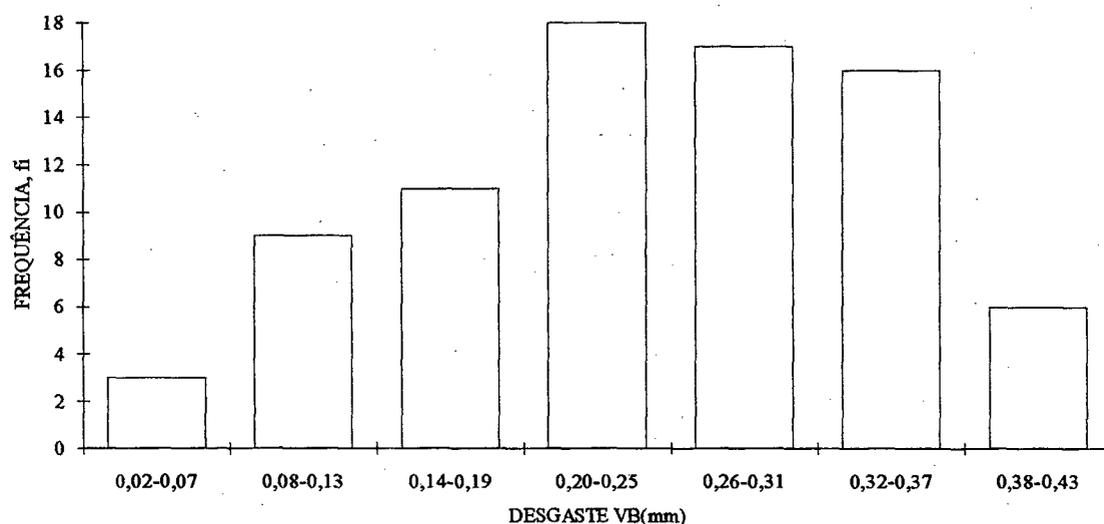
$F_o(VB)$ é a função de distribuição acumulada da normal reduzida definida pela equação que segue, com de ϕ tirados da tabela de distribuição normal [54]

$$F_o(VB) = \phi \left(\frac{VB - VB_{\text{médio}}}{S} \right)$$

onde,

S : Desvio padrão dos desgastes de flanco

$VB_{\text{médio}}$: é a média dos desgastes de flanco.



Os valores da média dos desgastes e o desvio padrão calculados foram respectivamente:

$$VB_{\text{médio}} = 0,25 \text{ mm}$$

$$S = 0,09 \text{ mm}$$

A tabela abaixo encontram-se os valores calculados para o teste de aderência, onde o valor obtido de $D_n = 0,0480$.

Classes	f_j	$F_n(VB)$	$F_o(VB)$	$ F_n(VB)-F_o(VB) $
$0,02 \leq VB \leq 0,07$	3	0,0375	0,0281	0,0094
$0,08 \leq VB \leq 0,13$	9	0,1500	0,1020	0,0480
$0,14 \leq VB \leq 0,19$	11	0,2875	0,2676	0,0199
$0,20 \leq VB \leq 0,25$	18	0,5125	0,5080	0,0045
$0,26 \leq VB \leq 0,31$	17	0,7250	0,7486	0,0236
$0,32 \leq VB \leq 0,37$	16	0,9250	0,9049	0,0201
$0,38 \leq VB \leq 0,43$	6	1,0000	0,9750	0,0250

Tomando-se um nível de significância igual a 5%, ($\alpha=0,05$) e tendo um número de observações igual a 80, encontra-se $d_{\alpha,n}$ segundo valores de tabela como:

$$d_{\alpha,n} = \frac{1,36}{\sqrt{80}} = 0,1521$$

Como este valor é maior que o valor da estatística de Kolmogorov-Smirnov, fica aceita a hipótese de distribuição normal das observações de VB. Assim pode-se calcular o tamanho da amostra mínima pela expressão:

$$N = \left[\frac{Z_{\alpha} \cdot S}{\delta} \right]^2$$

onde

Z_{α} : coeficiente da curva normal , igual a 1,96, para 95% de probabilidade dos valores estarem certos.

S : desvio padrão

δ : erro percentual máximo admissível, tomado como $\pm 5\%$.

Então calculando-se o valor de N na expressão tem-se:

$$N = \left[\frac{1,96 \cdot 0,09}{0,05} \right]^2 = 12,70$$

Assim o número mínimo de medições seria 13 (treze), como o valor usado foi maior, pode-se afirmar que o uso dos dados de Mesquita[09] para determinar o número de observações foi validado.

APÊNDICE III

Relatorios parciais das operacoes:

Operacao n. 1 - Cilindramento

Maquina : TORMAX-30

Codigo da Pastilha : TNMM160408-QR Fabricante: SANDVIK Classe: P35R

Alteracoes na geometria da peca:

Local do corte (inicial --> final) : 0.000 --> 480.000[mm]

Diâmetro (inicial --> final) : 200.000 --> 185.000 [mm]

Tempos e custos (lote de 5 pecas):

Etapas	Tempos [Min. Seg]	Custos [US\$]
Preparacao	56.15	5.97
Corte	72.17	25.74
Troca de Ferramenta	13.30	1.43
Ferramenta	-----	21.34
Fixos	-----	4.73
Total.....	142.02	59.21

Vida da Ferramenta :

Tempo de vida da ferramenta (gume) : 7.58 [min.Seg]

Critério de otimizacao: 5 [0 ==> 10 (max. producao ==> min. custo)]

Numero de gumes utilizados : 9

Dados de desbaste :

Profundidade de corte : 2.000 [mm]

Avanco: 0.43300 [mm/rot] limitado por: Maquina (Potencia)

Numero de passes: 3

N.	Rotacao [rpm]	VC real [m/min]
1	287.0	180.33
2	300.0	184.73
3	300.0	180.96

Dados de acabamento superficial no ultimo passe:

Profundidade de corte: 1.50[mm]

Avanco: 0.32700 [mm/rot]

Rotacao : 458.0[rpm]

VC real: 270.50 [m/min]

Operacao n. 2 - Faceamento

Maquina : TORMAX-30

Codigo da Pastilha : TNMM160408-QR Fabricante: SANDVIK Classe: P35R

Alteracoes na geometria da peca:

Local do corte (inicial --> final) : 0.000 --> 4.000[mm]

Diametro (inicial --> final) : 185.000 --> 0.000 [mm]

Tempos e custos (lote de 5 pecas):

Etapas	Tempos [Min. Seg]	Custos [US\$]
Preparacao	31.50	3.38
Corte	2.54	1.03
Troca de Ferramenta	0.00	0.00
Ferramenta	-----	0.00
Fixos	-----	1.16
Total.....	34.44	5.57

Vida da Ferramenta :

Tempo de vida da ferramenta (gume) : 7.58 [min.Seg]

Critério de otimizacao: 5 [0 ==> 10 (max. producao ==> min. custo)]

Numero de gumes utilizados : 0

Dados de desbaste :

Numero de passes: 2

Profundidade de corte : 2.000 [mm]

Avanco: 0.55700 [mm/rot] limitado por: Maquina (Potencia)

Trechos :

N.	Rotacao [rpm]	VC real [m/min]
1	380.0	165.64
2	1156.0	167.97

Relatorio final da peca

Codigo da Peca : EX1

Descricao da Peca : Eixo Teste

Tamanho do Lote : 5

Processo de fabricacao da Peca Bruta: Laminado

Material:

Codigo: ABNT - 1020

Descricao : ACO ABNT 1020 ENSAIO ETT

Custo de Material por Peca : 80.50 [US\$]

Dados geometricos iniciais:

Diametro : 200.000 [mm]

Comprimento : 500.000 [mm]

Geometria final da peca:

Trecho	Inicio	-->	Fim	Diametro
1	0.000		4.000	0.000
2	4.000		480.000	185.000
3	480.000		500.000	200.000