

Alexandre de Albuquerque Kanenobu

Guilherme Cruz Rossi

*note final
9.6 (muito bom)*



Modelagem de Processos de Usinagem Fresamento de Topo

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção da Graduação em Engenharia
Mecatrônica

São Paulo

2004

Alexandre de Albuquerque Kanenobu

Guilherme Cruz Rossi

**Modelagem de Processos de Usinagem
Fresamento de Topo**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção da Graduação em Engenharia Mecatrônica

Área de Concentração: Engenharia de Projeto e Fabricação

Professor Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo

2004

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eu, Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, exercendo a função de Professor Orientador deste trabalho, informo que este Trabalho de Formatura está **APROVADO** para apresentação final perante a Banca Examinadora.

São Paulo, 3 de Dezembro de 2004.



Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Alexandre Kannabin
Guilherme Rom.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Gilmar Batalha Ferreira pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Ao Eng. Fábio Luis Nobre Lemos pelo suporte oferecido e esclarecimento das dúvidas a respeito da linguagem de programação utilizada neste trabalho.

Ao Eng. Thiago Pontin Tancredi pelo apoio e suporte oferecidos durante o trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é encontrar as relações existentes entre os parâmetros de corte e a rugosidade da superfície usinada numa operação de fresamento de topo. Para tanto, foram realizados experimentos nos quais os parâmetros estudados neste trabalho (rotação do fuso, avanço e profundidade de corte) foram variados, sendo que a rugosidade da superfície usinada foi medida para cada um dos casos. Para interpretar os resultados, foi utilizado o Método da Regressão Linear Múltipla, através do qual foi possível encontrar a equação que rege o comportamento da rugosidade superficial em função dos parâmetros de corte aqui estudados. Verificou-se que o parâmetro de corte que mais influencia a rugosidade superficial é o avanço, seguido pela rotação do fuso (inversamente proporcional) e por fim a profundidade de corte. Além disso, foi realizado um estudo das forças de corte atuantes no processo de fresamento de topo, sendo que estas informações juntamente com as fornecidas pelos ensaios já mencionados foram utilizadas para a implementação de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão.

Palavras-chave: Fresamento, Rugosidade, Força de Corte, Parâmetros de Corte.

ABSTRACT

The main objective of this work was to search and formalize a possible relationship between machining parameters and roughness characteristics of an end milled surface. The experimental methodology has focused the evaluation of roughness as a function of the following variables: spindle speed, feed rate and depth of cutting. The experimental data was modeled following Multiple Linear Regression Method, enabling a prediction of the roughness by given the milling parameters setting. The results show that the most expressive parameter to the surface roughness is the feed, followed by the spindle speed (with a negative contribution) and so by the depth of cutting. Besides, a research was made about the cutting forces in the end milling process. These information were used together with the results of the previous section to implement a tool, which helps the user to make the decision about the cutting parameters.

Keywords: *End Milling, Roughness, Cutting Force, Cutting Parameters.*

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE SÍMBOLOS | |
| 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 - OBJETIVOS | 2 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - FRESAMENTO DE TOPO (STEMMER, 1989) | 3 |
| 3.1 - MOVIMENTOS DA PEÇA E DA FERRAMENTA | 3 |
| 3.2 – MATERIAL USADO NA FERRAMENTA ESTUDADA (AÇO RÁPIDO COMUM) | 4 |
| 3.3 - FORMAÇÃO DE CAVACO | 4 |
| 3.4 – PRINCIPAIS FALHAS E DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE: | 5 |
| 4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – MODELAGEM DE FORÇAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO | 6 |
| 4.1 – MODELO DE FORÇA | 6 |
| 4.2 – FORÇA COMO FUNÇÃO DO TEMPO | 8 |
| 4.3 - VARIAÇÃO DA ÁREA DA SEÇÃO | 8 |
| 4.4 – FUNÇÃO DE ÁREA ROTACIONADA | 10 |
| 4.5 - ANÁLISE DA FORÇA ESPECÍFICA | 11 |
| 5 – REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA | 13 |
| 6 – CORPOS-DE-PROVA | 14 |
| 7 – ENSAIO PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MÁXIMOS E MÍNIMOS | 17 |
| 8 – ENSAIO DO PESO DOS PARÂMETROS SOBRE A RUGOSIDADE | 19 |
| 9 – RESULTADOS | 23 |
| 9.1- ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MÁXIMOS E MÍNIMOS | 23 |
| 9.2- ENSAIO DO PESO DOS PARÂMETROS | 24 |
| 9.3 - EQUAÇÃO QUE RELACIONA A RUGOSIDADE E OS PARÂMETROS DE CORTE | 28 |
| 10 – FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 11 – DISCUSSÕES | 36 |
| 11.1 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA FERRAMENTA (MÓDULO RUGOSIDADE) | 36 |
| 11.2 – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DA FERRAMENTA (MÓDULO FORÇAS DE CORTE) | 38 |
| 11.3 – EFEITOS DE SEGUNDA E TERCEIRA ORDEM | 40 |
| 12 - CONCLUSÕES | 42 |
| 13 – ANEXOS | 43 |
| A- MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA | 43 |
| B- CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA | 49 |
| 14 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 57 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 4.1.1 – Fresamento de Topo – extraída de (Araújo e Silveira, 2001)</i> | 7 |
| <i>Figura 4.2.1 - Referência da Ferramenta de Fresamento extraída de (Araújo e Silveira, 2001).....</i> | 8 |
| <i>Figura 4.3.1 - Área Variável do Cavaco extraída de (Araújo e Silveira, 2001)</i> | 9 |
| <i>Figura 4.3.2 - Área Funcional por uma Flutuação extraída de (Araújo e Silveira, 2001)</i> | 10 |
| <i>Figura 4.5.1 - Análise experimental extraída de (Araújo e Silveira, 2001)</i> | 12 |
| <i>Figura 4.5.2 - Análise Gráfica extraída de (Araújo e Silveira, 2001)</i> | 12 |
| <i>Figura 6.1 - Serra Hidráulica.....</i> | 14 |
| <i>Figura 6.2 - Matéria-prima dos corpos-de-prova.....</i> | 14 |
| <i>Figura 6.3 - Fresadora Ferramenteira.....</i> | 15 |
| <i>Figura 6.4 - Corpo-de-prova semi-acabado</i> | 15 |
| <i>Figura 6.5 - Retífica.....</i> | 16 |
| <i>Figura 8.1 - Modelagem dos Experimentos</i> | 20 |
| <i>Figura 9.2.1 – Relação entre os efeitos dos parâmetros.....</i> | 27 |
| <i>Figura 10.1 - Tela inicial do Software.....</i> | 29 |
| <i>Figura 10.2 - Ferramenta de Prever Rugosidade</i> | 30 |
| <i>Figura 10.3 - Ferramenta de Estimar Parâmetros</i> | 31 |
| <i>Figura 10.4 – Função Objetivo.....</i> | 32 |
| <i>Figura 10.5 – Restrições.....</i> | 32 |
| <i>Figura 10.6 – Representação gráfica da região cúbica, contínua e convexa, definida pelas restrições do problema</i> | 33 |
| <i>Figura 10.7 – Janelas de Processo</i> | 34 |
| <i>Figura 10.8 – Ferramenta “Prever Forças de Corte”</i> | 35 |
| <i>Figura 11.2.1 – Força de Corte Fresa de 2 dentes</i> | 38 |
| <i>Figura 11.2.2 – Força de Corte Fresa 4 dentes.....</i> | 38 |
| <i>Figura 11.2.3 – Força de Corte Fresa 6 dentes.....</i> | 39 |
| <i>Figura 11.2.4 – Força de Corte Fresa de 8 dentes</i> | 40 |
| <i>Figura 13.A.1 – Tela inicial da Ferramenta</i> | 44 |
| <i>Figura 13.A.2 – Ferramenta “Prever Rugosidade”</i> | 45 |
| <i>Figura 13.A.3 – Ferramenta “Estimar Parâmetros de Corte”.....</i> | 46 |
| <i>Figura 13.A.4 – Ferramenta “Prever Forças de Corte”</i> | 47 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabela 4.1.1 - Classificação dos tipos.</i> | 7 |
| <i>Tabela 4.3.1 - Limites de integração por fase.</i> | 9 |
| <i>Tabela 4.3.2 - Valores de Variáveis.</i> | 9 |
| <i>Tabela 4.5.1 - Análise específica da força.</i> | 11 |
| <i>Tabela 9.1.1 - Ensaio dos Máximos e Mínimos.</i> | 23 |
| <i>Tabela 9.2.1 - Ensaio do Peso dos Parâmetros.</i> | 26 |
| <i>Tabela 11.1.1 - Validação da Ferramenta</i> | 37 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- V_c : Velocidade de Corte [m/min];
 V_f : Velocidade de Avanço [mm/min];
 V_e : Velocidade Efetiva de Corte [m/min];
 ϕ : Ângulo da direção de avanço [°];
 η : Ângulo da direção efetiva de corte [°];
 Φ : Ângulo da parte infinitesimal da ferramenta [°];
 K (vetor): Vetor Força específica de corte [N/mm²];
 h : Espessura do cavaco [mm];
 d : Diâmetro da ferramenta [mm];
 λ : Ângulo de hélice [°];
 a : Profundidade de corte [mm];
 z : Número de dentes;
 R_a : Rugosidade [μm];
 f_z : Avanço por dente [mm/(min*dente)];
 n : Número de replicações;
 F_x : Força de corte na direção perpendicular ao avanço [N];
 F_y : Força de corte na direção do avanço [N];

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a concorrência existente entre os processos produtivos é muito elevada, sendo que as indústrias vêm procurando reduzir custos de fabricação em todas as atividades que desenvolve. Neste contexto também se enquadram os processos de manufatura mecânica, em especial os processos de usinagem (Sarhan, 2001). Este Trabalho de Formatura tem como objetivo estudar alguns aspectos destes processos, para que se encontrem maneiras de otimizá-los. Numa primeira etapa, o objetivo é encontrar as relações existentes entre alguns parâmetros de corte e a rugosidade média da superfície usinada, utilizando para isso o Método da Regressão Linear Múltipla. Os resultados encontrados podem ser utilizados para uma melhor seleção dos parâmetros de corte a serem utilizados em determinadas situações, para que se encontre a melhor relação custo-benefício de cada processo.

Numa segunda etapa, serão estudadas as forças de corte existentes na usinagem, para que se possa acrescentar um módulo de previsão destas forças na ferramenta de auxílio à decisão que é o propósito deste trabalho

O enfoque do trabalho será no processo de Fresamento de Topo, o qual será utilizado nas modelagens e no levantamento dos dados experimentais.

O texto está organizado do seguinte modo: O Capítulo 1 apresenta uma introdução do trabalho, sendo que os objetivos estão no Capítulo 2. Os Capítulos 3 e 4 trazem revisões bibliográficas sobre o fresamento de topo e sobre forças de corte respectivamente. No Capítulo 5 é apresentado o Método da Regressão Linear Múltipla, e no Capítulo 6 são descritas as etapas de manufatura dos corpos-de-prova; os Capítulos 7 e 8 mostram os ensaios que foram realizados e o Capítulo 9 traz os resultados destes. O Capítulo 10 explica como foi implementada a Ferramenta de Auxílio à Tomada de Decisão, e o Capítulo 11 traz discussões a respeito dos resultados fornecidos pela mesma. Os Capítulos subsequentes, 12, 13 e 14, trazem as conclusões do trabalho, os anexos e as referências bibliográficas respectivamente.

2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo encontrar relações entre os parâmetros de corte (e suas interações) e a rugosidade superficial da superfície usinada numa operação de fresamento de topo, para que se possam saber quais os parâmetros que mais influenciam positiva ou negativamente sobre a rugosidade superficial.

Estes dados serão de grande valia na determinação dos parâmetros necessários para que se possa obter uma rugosidade desejada num processo de fresamento de topo.

Além disso, tem-se como objetivo realizar uma modelagem das forças de corte no processo de fresamento de topo, sendo que será utilizada uma modelagem teórica para prever estas forças no fresamento de topo.

Assim, o objetivo final deste trabalho é criar uma ferramenta que auxilie o seu usuário a selecionar de maneira correta os parâmetros de corte, para que ele consiga fabricar peças com o acabamento superficial desejado (utilizando os dados da rugosidade superficial) e consiga dimensionar qual é a potência da máquina necessária para realizar estas operações (utilizando os dados de forças de corte).

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - FRESAMENTO DE TOPO (Stemmer, 1989)

3.1 - Movimentos da peça e da ferramenta

Os movimentos e velocidades de corte podem ser definidos em relação à peça:

- Movimento de corte: é o movimento produzido com o objetivo de provocar um movimento relativo entre a peça e a face da ferramenta. No caso do fresamento de topo, este movimento corresponde à rotação da fresa.
- Velocidade de corte (V_c): é a velocidade instantânea do movimento principal de um ponto selecionado no gume, em relação à peça.
- Movimento de avanço: é causado para provocar um movimento relativo adicional entre a peça e a face da ferramenta, gerando uma remoção contínua de cavaco quando somado ao movimento de corte. No caso do fresamento de topo, consiste na movimentação da mesa da fresadora.
- Velocidade de avanço (V_f): é a velocidade instantânea do movimento de avanço num ponto selecionado no gume, em relação à peça.
- Movimento efetivo de corte: resultante entre os movimentos de corte e de avanço.
- Velocidade efetiva de corte (V_e): resultante entre as velocidades de corte e de avanço.
- Ângulo da direção de avanço (ϕ): ângulo entre as direções dos movimentos de corte e de avanço, medido a partir da direção do movimento de corte.
- Ângulo da direção efetiva de corte (η): ângulo entre as direções dos movimentos de corte e efetivo, medido a partir da direção do movimento de corte .

3.2 – Material usado na ferramenta estudada (aço rápido comum)

O aço rápido assim é chamado pois consegue manter a dureza em temperaturas elevadas em torno de 520° a 600°, enquanto os aços ferramenta já têm diminuído a sua dureza em temperaturas da ordem de 250°. Isso, associado com uma maior resistência à abrasão, permite que os aços rápidos trabalhem em velocidades bem mais elevadas além de propiciar-lhes uma maior vida útil.

3.3 - Formação de Cavaco

A forma dos cavacos produzidos nos processos de usinagem pode variar devido a uma série de fatores, dentre eles o avanço, a profundidade e a velocidade de corte, geometria da ferramenta, material da peça, etc. Os principais tipos de cavaco que podem ser gerados estão descritos a seguir:

- Cavaco contínuo – o material da peça é recalcado pela ferramenta até que escorrega ao longo do plano de cisalhamento sem romper, deslizando pela superfície de saída da ferramenta. Está associado a um baixo coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta. É o que proporciona um melhor acabamento superficial e consume menos energia.
- Cavaco cisalhado – enquanto o cavaco escorrega ao longo do plano de cisalhamento, este fissura no ponto mais solicitado, sendo que devido à pressão e à temperatura, essas fissuras se soldam. A força de corte cresce progressivamente até que rompe. Isso gera vibrações prejudiciais à máquina e que levam a um acabamento superficial pior.
- Cavaco arrancado – é o que se produz na usinagem de materiais frágeis. São pequenos fragmentos gerados por ruptura. Freqüentemente, material é arrancado abaixo da superfície usinada, sendo que para evitar essa possibilidade devem-se usar ferramentas muito bem afiadas e avanços pequenos.

3.4 – Principais falhas e desgaste da ferramenta de corte:

As principais formas de desgaste da ferramenta são:

- Lascamento da aresta de corte – devido a solicitações mecânicas ou térmicas da aresta de corte que causam a quebra de pedaços da aresta. Produz superfícies ásperas e irregulares.
- Trincas de origem térmica – surgem devido ao grande gradiente de temperaturas existente na zona de corte.
- Desgaste de flanco – é a faixa desgastada no flanco da ferramenta. Geralmente é usado como critério de fim de vida da ferramenta.
- Crateramento – concavidade que se forma na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito do cavaco com a ferramenta. Pode levar à quebra da ferramenta.
- Aresta postiça de corte – formada por adesão de material do cavaco na superfície de saída, mudando a geometria de corte. Pode, no momento em que se descola da ferramenta, riscar a peça e/ou a ferramenta.

As causas dos tipos de desgastes e falhas apresentados anteriormente, podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Deformação plástica – quando a dureza da ferramenta não resiste mais às pressões de usinagem.
- Abrasão – é a remoção de material via mecanismos de trincamento, sulcamento, micro-corte ou outros de finas partículas de material. Aumenta com o aumento do número de inclusões na peça.
- Aderência – entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta sob altas temperaturas e pressões presentes na zona de corte.
- Difusão – processo de desgaste envolvendo difusão de átomos na interface entre peça e ferramenta. É ativado em temperaturas elevadas que aumentam a mobilidade dos átomos nesta interface.
- Oxidação – devido ao aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação camadas oxidadas.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – MODELAGEM DE FORÇAS DE CORTE NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO (Araújo e Silveira, 2001)

4.1 – *Modelo de Força*

Modelagem de força instantânea diferencial para uma única aresta de corte é normalmente escrita pela fórmula Martelotti:

$$d\vec{F} = \vec{K}dA = \vec{K}tdb \quad (1)$$

onde K (vetor) é um vetor chamado força específica de corte e a força instantânea é a soma das partes diferenciais calculadas em pequenos pedaços da ferramenta, multiplicados pela força específica e pela espessura do cavaco h , que para o fresamento de topo pode ser escrita como:

$$h = f_z \sin \phi \quad (2)$$

onde Φ é o ângulo da parte infinitesimal da ferramenta de corte medido em relação à direção normal do avanço por dente (F_z),

$$f_z = \frac{Vf}{Nz} \quad (3)$$

onde Vf , N e z são respectivamente velocidade de avanço, velocidade de rotação e número de arestas de corte.

Os pequenos pedaços da ferramenta podem ser calculados por

$$db = \frac{d}{2 \tan \lambda} d\phi \quad (4)$$

onde d é o diâmetro da ferramenta e λ é o ângulo de hélice (Figura. 4.1.1)

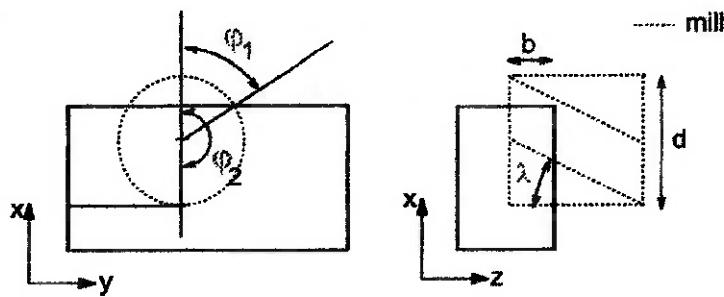


Figura 4.1.1 – Fresamento de Topo – extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

O ângulo δ é calculado por

$$\delta = \frac{2a \tan \lambda}{d} \quad (5)$$

onde a é a profundidade de corte.

O ângulo δ é usado para classificar a geometria de corte como Tipo I ou Tipo II (Tabela. 4.1.1), onde φ_1 e φ_2 são os ângulos de entrada e de saída, respectivamente (Figura. 4.1.1).

Tabela 4.1.1 - Classificação dos tipos.

| <i>Tipo I</i> | <i>Tipo II</i> |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| $\delta \leq \varphi_2 - \varphi_1$ | $\delta > \varphi_2 - \varphi_1$ |

A força se torna:

$$\vec{F}_i = \int \vec{K} dA = \int \vec{K} dA = \int \vec{K} \frac{df_z \sin \phi}{2 \tan \lambda} d\phi \quad (6)$$

Então, a força total de corte, considerando todas as N_f arestas de corte de fresa, é calculada pela soma:

$$\vec{F} \sum_{i=1}^z \vec{F}_i \quad (7)$$

4.2 – Força como função do tempo

O vetor de força de fresamento ($\vec{F}_{\text{vetor}}(t)$) é escrito como uma multiplicação de duas parcelas: um relativo a força específica, escrito como um vetor ($\vec{K}_{\text{vetor}}(t)$), e outro relativo a área de corte, uma função escalar ($A(t)$). Essa forma será chamada daqui em diante de Abordagem da Função de variação da área.

$$\vec{F}(t) = \vec{K}(t)A(t) \quad (8)$$

A variável de tempo t pode ser substituída pelo ângulo de rotação θ de um ponto fixo P na periferia da ferramenta: (Figura. 2)

$$\vec{F}(\theta) = \vec{K}(\theta)A(\theta) \quad (9)$$

A função $A(\theta)$ será calculada separadamente na próxima seção.

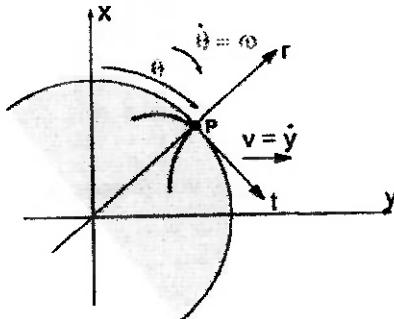


Figura 4.2.1 - Referência da Ferramenta de Fresamento extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

4.3 - Variação da Área da Seção

Na Figura. (4.3.1), pode-se observar a área da seção do cavaco (A_1) do primeiro dente de corte no ângulo de corte θ , para uma geometria de corte tendo $\phi_1 = 0$ e $\phi_2 = \pi$.

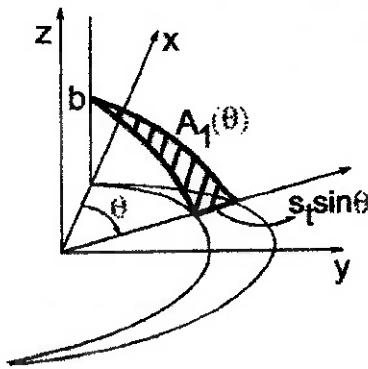


Figura 4.3.1 - Área Variável do Cavaco extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

A área do cavaco pode ser calculada por:

$$A_1(\theta) = \int_{L_1(\theta)}^{L_2(\theta)} \frac{s_t d}{2 \sin \lambda} \sin \phi d\phi \quad (10)$$

onde os limites L_1 e L_2 são funções de θ e são calculados diferentemente para cada fase de corte de θ , como pode ser observado na tabela (4.3.1).

Tabela 4.3.1 - Limites de integração por fase.

| Fase | Tipo I | | Tipo II | |
|---------------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | $L_1(\theta)$ | $L_2(\theta)$ | $L_1(\theta)$ | $L_2(\theta)$ |
| Para $e_1 < \theta \leq e_2$ – Fase A | e_1 | θ | e_1 | θ |
| Para $e_2 < \theta \leq e_3$ – Fase B | $\theta - \delta$ | θ | e_1 | e_2 |
| Para $e_3 < \theta \leq e_4$ – Fase C | $\theta - \delta$ | e_3 | $\theta - \delta$ | e_2 |

Os valores de e_1 , e_2 , e_3 e e_4 podem ser extraídos da tabela (4.3.2).

Tabela 4.3.2 - Valores de Variáveis.

| | Tipo I | Tipo II |
|-------|----------------------|----------------------|
| e_1 | φ_1 | φ_1 |
| e_2 | $\varphi_1 + \delta$ | φ_2 |
| e_3 | φ_2 | $\varphi_1 + \delta$ |
| e_4 | $\varphi_2 + \delta$ | $\varphi_2 + \delta$ |

Para uma simples aresta de corte e geometria de corte Tipo I, a função de variação da área da seção do cavaco é apresentada na Figura. (4.3.2).

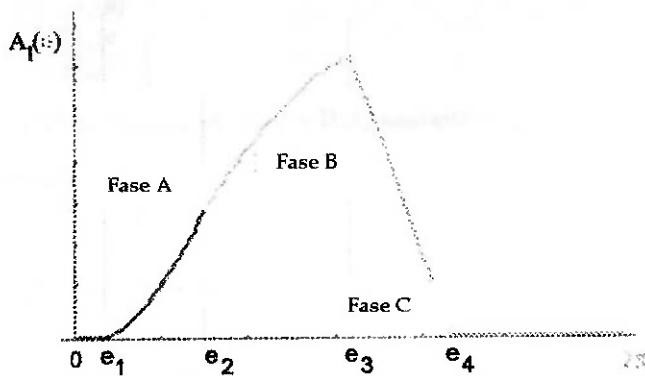


Figura 4.3.2 - Área Funcional por uma Flutuação extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

4.4 – Função de Área Rotacionada

Com o intuito de comparar o presente modelo com dados experimentais, os componentes de força devem ser decompostos nas direções x, y e z, como costumam ser gravadas nos ensaios de usinagem.

$$\vec{F}(\theta) = \begin{bmatrix} F_x(\theta) \\ F_y(\theta) \\ F_z(\theta) \end{bmatrix} = A(\theta) \begin{bmatrix} K_x(\theta) \\ K_y(\theta) \\ K_z(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Mas não é conveniente escrever a força específica de corte num referencial fixo x,y,z. Para reescrevê-la num referencial de ferramenta mais apropriado t,r,z (direções tangencial, radial e axial), outra função $Ar(\theta)$ deve ser introduzida:

$$\begin{bmatrix} F_x(\theta) \\ F_y(\theta) \\ F_z(\theta) \end{bmatrix} = Ar(\theta) \begin{bmatrix} K_t(\theta) \\ K_r(\theta) \\ K_z(\theta) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Na verdade, a função $Ar(\theta)$ é a matriz de rotação $R(\theta)$ multiplicada pela área $A(\theta)$.

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

4.5 - Análise da Força Específica

O problema está concentrado na análise da força específica de corte. Trabalhos empíricos consideraram a força específica como um simples valor para cada par ferramenta-peça e relacionam os componentes através de constantes de proporcionalidade; estas pesquisas consideram que a força específica é constante com o tempo.

Abordagens analíticas calculam a força específica de corte como uma função dos parâmetros de corte.

Ortogonal e Oblíquo são os modelos mais importantes e as forças específicas de corte são apresentadas na Tabela. (4.5.1), onde Φ é o ângulo “shear”, α é o ângulo “rake”, β é o ângulo de fricção, η é o ângulo de fluxo do cavaco e o índice n significa a componente normal destes ângulos.

Tabela 4.5.1 - Análise específica da força.

| | <i>Modelo Ortogonal</i> | <i>Modelo Oblíquo</i> |
|-------|---|---|
| K_t | $\frac{\tau_s \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$ | $\frac{\tau_s}{\sin \phi_n} \frac{(\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan \lambda \tan \eta \sin \beta_n)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}$ |
| K_r | $\frac{\tau_s \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$ | $\frac{\tau_s}{\sin \phi_n} \frac{(\cos(\beta_n - \alpha_n) \tan \lambda - \tan \eta \sin \beta_n)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}$ |
| K_z | 0 | $\frac{\tau_s}{\sin \phi_n \cos \lambda} \frac{(\sin(\beta_n - \alpha_n))}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2 \eta \sin^2 \beta_n}}$ |

Se estes parâmetros são constantes com o tempo, a força específica de corte não irá mudar no tempo. Para analisar este comportamento, para cada ponto de θ ,

$$K(\theta) = A_r^{-1}(\theta)F(\theta) \quad (14)$$

pode ser aplicado a qualquer dado experimental de processos de fresamento, então, se a força específica de corte é constante, o resultado deve ter o mesmo valor.

No gráfico da Figura. (4.5.1), pode-se observar que o experimento utilizou os seguintes parâmetros:

$$d = 18.1\text{mm}, \quad \lambda = 30.0, \quad N_f = 4, \quad b = 5.08, \quad \varphi_1 = 0, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \quad v = 30 \frac{\text{m}}{\text{min}}, \quad s_t = 0.05.$$

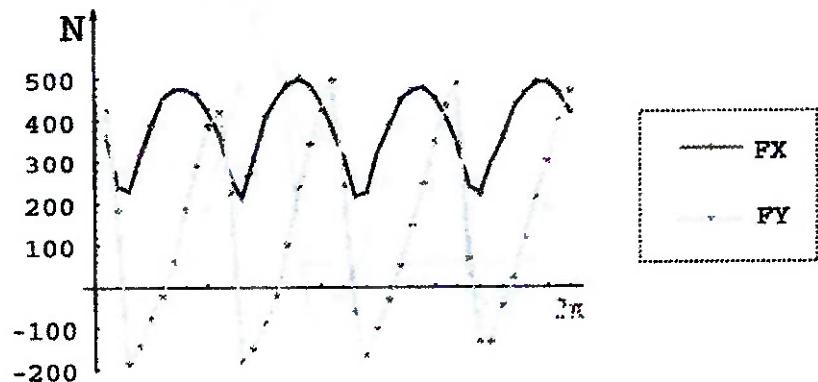


Figura 4.5.1 - Análise experimental extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

Pegando cada ponto da curva Figura. (4.5.1) e calculando a Eq. (14), resulta num comportamento mostrado na Figura. (4.5.2), o que mostra que o comportamento de $K(\theta)$ não é constante.

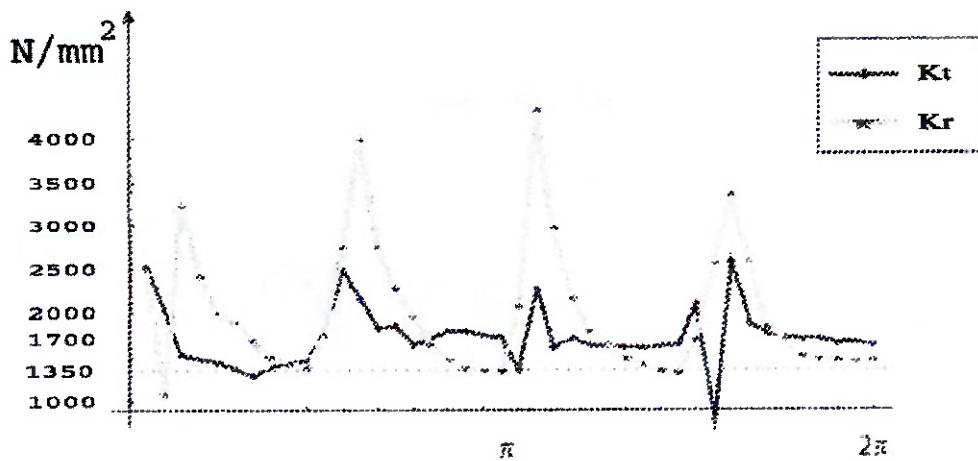


Figura 4.5.2 - Análise Gráfica extraída de (Araújo e Silveira, 2001)

5 – REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A técnica de regressão múltipla é uma metodologia para o estudo das relações entre variáveis. É implementada visando à determinação de relações entre variáveis dependentes e independentes, podendo ser usada para analisar dados e gerar um modelo. A partir de um modelo de regressão múltipla, podem-se obter as variáveis preditivas e determinar a relação entre as variáveis do critério e as variáveis preditivas (Jennrich, 1995). Neste sentido, a técnica de regressão múltipla seria útil na predição da variável dependente tal como a máxima rugosidade da superfície usinada em cada rotação via variáveis independentes tais como a velocidade do fuso, avanço e profundidade de corte.

É desejável que um modelo deduza um modelo matemático para as suas relações físicas funcionais. Entretanto, isso geralmente é muito difícil ou impossível para o processo de fresamento de topo, devido à grande quantidade de fatores envolvidos. Daí, modelos físicos só podem ser criados nos casos mais simples.

Assim, o modelo deve carregar vários fatores experimentais. Para fazer isso, os fatores devem variar e assumir dois níveis, um máximo e um mínimo, e os resultados devem ser guardados. Depois disso, funções matemáticas devem ser procuradas para aproximar os valores encontrados experimentalmente, dentro de uma certa precisão.

Porém, isso só é válido se a variação dos fatores entre os níveis máximo e mínimo puder descrever o comportamento do mesmo neste intervalo. Para isso, deve-se constatar que o comportamento deste fator é contínuo e monotônico, o que é bem razoável em se tratando de processos de corte tecnológicos, como é o caso do fresamento de topo.

6 – CORPOS-DE-PROVA

Para a realização dos ensaios, é necessária a fabricação de corpos-de-prova (20 ao todo). Os corpos-de-prova foram usinados a partir de barras de aço ABNT 1020 quadradas, com 32 x 32 x 3000 mm .

Para a fabricação de corpos-de-prova, foram seguidas as seguintes etapas:

Em primeiro lugar, foi utilizada uma serra hidráulica FRANHO modelo SF - 250 Figura (6.1) para cortar a matéria-prima, fazendo peças já com o comprimento desejado de 320mm Figura (6.2).



Figura 6.1 - Serra Hidráulica

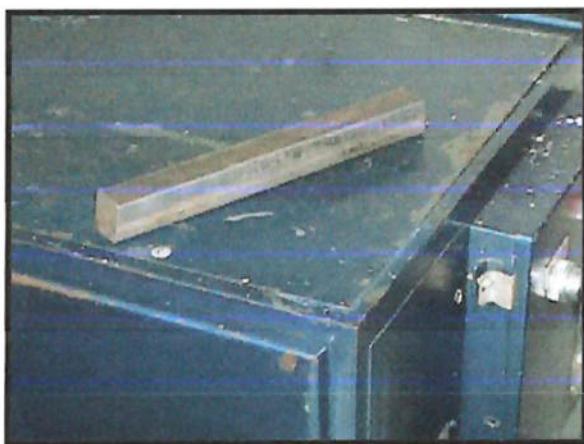


Figura 6.2 - Matéria-prima dos corpos-de-prova

Com os corpos-de-prova já cortados, passou-se para o processo de fresamento, a fim de continuar o processo de fabricação dos mesmos. Foi utilizada uma fresa de topo com 8 pastilhas de metal duro numa fresadora Romi U-30.

Os parâmetros utilizados para o fresamento foram:

- Rotação do fuso: 250 RPM;
- Velocidade de avanço: 80 mm/min;
- Profundidade de corte: 0,1 a 0,2 mm.



Figura 6.3 - Fresadora Ferramenteira.

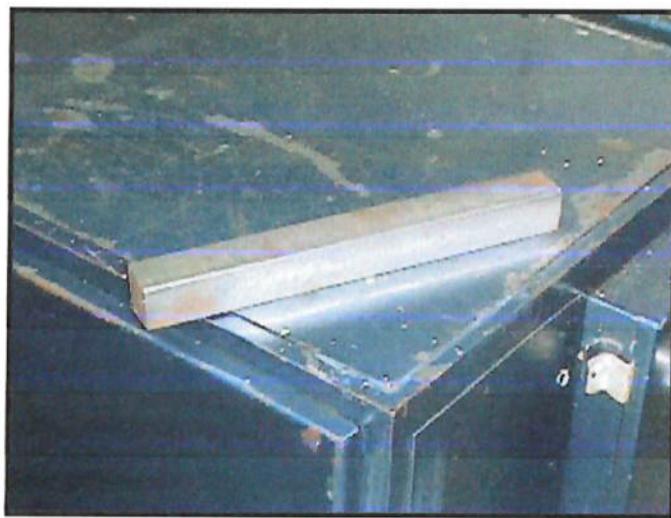


Figura 6.4 - Corpo-de-prova semi-acabado

Com o fresamento de topo, conseguiu-se atingir a tolerância desejada de 0,1 mm (dimensional e paralelismo), sendo que a medida dos lados dos corpos-de-prova

foi definida como $37,0 \pm 0,5$ mm. Porém, na face em que acontecerá o contato destes com os sensores, será ideal uma rugosidade superficial baixa $Ra 0,8 \mu\text{m}$, o que não foi possível conseguir com o processo de fresamento. Assim, um dos lados de cada um dos corpos-de-prova foi retificado numa retífica Mello modelo RPT2 ano 1986.

Para a medição da rugosidade, foi utilizado um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 3+.



Figura 6.5 - Retífica

7 – ENSAIO PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS MÁXIMOS E MÍNIMOS (ISO8688-2)

São ensaios para a determinação dos valores máximos e mínimos dos três parâmetros de corte envolvidos neste estudo: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

Isto é necessário, pois o experimento do peso dos parâmetros de corte que será realizado numa etapa posterior desta pesquisa, precisa de dois diferentes níveis para cada parâmetro, um nível alto (valor máximo) e um baixo (valor mínimo). Torna-se muito importante a localização dos máximos e mínimos que podem ser utilizados na fresadora CNC, objeto de estudo desta pesquisa, pois quanto maior o intervalo entre os níveis altos e baixos de cada parâmetro maior será a informação contida nos resultados do experimento do peso dos parâmetros. Esta afirmação admite um comportamento monotônico da força de corte em função da variação dos parâmetros de usinagem.

A metodologia utilizada para a realização deste ensaio, foi a de manter constante o avanço por dente (f_z) e variar os parâmetros avanço (f) e a rotação do fuso (N) de acordo com a equação:

$$f = f_z \cdot N \cdot Z \quad (15)$$

onde z = número de dentes.

Segundo a literatura (**Machining Data Handbook, 1980**), o f_z ótimo para fresas de topo de 16 mm de diâmetro é igual à 0,055 mm/(dente.rotação). Inicialmente, a profundidade de corte (a_p) é mantida constante num valor menor do que o máximo especificado pelo fabricante ($d/2 = 8$ mm), sendo $a_p = 6$ mm. Depois de encontrados valores máximos e mínimos para f e N , estes dois parâmetros são fixados em valores próximos aos seus máximos encontrados, e a profundidade de corte é variada, encontrando-se também os seus valores máximos e mínimos. O critério de decisão para a chegada dos parâmetros máximos e mínimos é a rugosidade média (R_a) da superfície usinada, sendo estabelecido a priori um valor limite de 6 μm (**Halevi, 1995**).

Para este ensaio, foi criado um programa em linguagem G para a operação da fresadora CNC. O esquema do programa assim como um esclarecimento sobre as suas operações está descrito a seguir:

Programa em linguagem G para a usinagem de uma ranhura:

X + 20,000 Y + 24,000 F 500 M 03

X + 20,000 Z - 6,000 F 500 M 03

X + 5,000 Z - 6,000 F 200 M 08

X - 125,000 Z - 6,000 F 50 M 03

X - 125,000 Z + 40,000 F 500 M 03

X + 40,000 Y + 60,000 F 1000 M 00

STOP

O programa basicamente realiza uma operação de ranhurado, na região central da peça. Após alguns testes, estipulou-se que o comprimento da ranhura deveria ser de 120 mm, para tornar possível uma boa avaliação do acabamento da superfície usinada, assim como a medição da rugosidade. Os valores indicados para o avanço e profundidade de corte são referentes ao primeiro ensaio realizado.

8 – ENSAIO DO PESO DOS PARÂMETROS SOBRE A RUGOSIDADE

Será utilizada a abordagem de Análise de Regressão Múltipla para a determinação da influência de cada um dos parâmetros de corte estudados isoladamente assim como as suas correlações sobre a rugosidade da superfície usinada.

Para isto, será realizado um delineamento 2^k fatorial do experimento, com duas replicações para cada combinação, que está descrito em (Montgomery, 2001). Delineamentos fatoriais são freqüentemente usados em experimentos envolvendo muitos fatores onde é necessário estudar o efeito dos fatores sobre uma resposta.

Destes, o caso mais importante é o k fatorial com dois níveis, um alto e um baixo. Um ensaio completo requer 2^k observações. Pelo fato de só existirem dois níveis para cada fator, deve-se assumir que o comportamento da resposta provocada pelos mesmos é aproximadamente linear dentro da faixa de valores compreendidos entre os dois níveis.

É utilizada uma notação especial para representar as possíveis combinações entre os fatores. Em geral, uma combinação de fatores é representada por uma série de letras minúsculas. Se uma letra está presente, então o fator correspondente a ela está no nível alto naquela combinação; se estiver ausente, o fator está no nível baixo. Por exemplo, num experimento 2^4 fatorial, uma combinação com A e C no nível alto e B e D no nível baixo é representada por ac. Combinações onde todos os fatores estão no nível baixo são representadas por (1). Cada uma dessas representações indica a soma de todas as observações com a mesma combinação de níveis de fatores.

Os três fatores a serem estudados são os seguintes:

- Avanço (F) – **a** nas figuras;
- Roação do Fuso (N) – **b** nas figuras;
- Profundidade de Corte (A_p) – **c** nas figuras.

Os níveis altos e baixos destes parâmetros serão obtidos pelo ensaio dos parâmetros máximos e mínimos.

Para este experimento, será usado um delineamento fatorial 2^3 , que possui 8 combinações possíveis de níveis de fatores. Porém, serão feitas duas replicações para cada combinação, resultando em um total de 16 ensaios.

Geometricamente, essa modelagem é um cubo como o da Figura (8.1), com as oito combinações formando os seus cantos. Com este, é possível estimar 3 efeitos principais (F , N , A_p), três efeitos de interação de fatores dois a dois e um efeito da interação dos três fatores juntos.

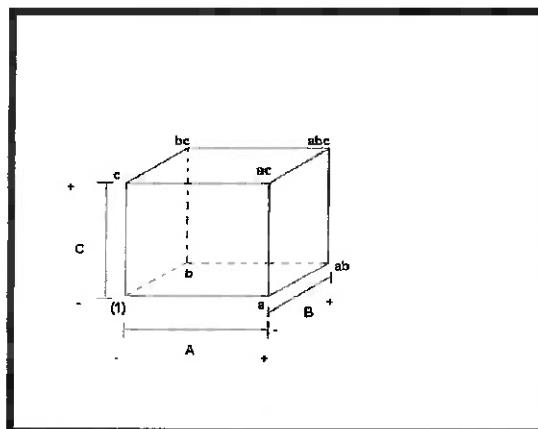


Figura 8.1 - Modelagem dos Experimentos

Utilizando-se a figura 8.1, os efeitos podem ser facilmente estimados. Por exemplo, o efeito principal F pode ser estimado somando-se os valores obtidos das quatro combinações do lado direto do cubo, onde F está no nível mais alto, subtraindo deste total a soma dos valores obtidos das quatro combinações do lado esquerdo do cubo, onde F está no nível mais baixo, e dividindo-se este total por $4 \times n$, onde $n = 2$ replicações. Isto resulta em:

$$Efeito F = \frac{1}{4n} [f + f.N_f.ap + f.N.ap - (l) - N_f.ap - N.ap] \quad (16)$$

Da mesma maneira, os outros efeitos principais podem ser estimados, sendo que para o efeito de N devem-se usar os lados da frente e de trás do cubo, e para A_p , deve-se usar os lados de cima e de baixo do cubo, resultando em:

$$EfeitoVc = \frac{1}{4n} [N + f.N + N.ap + f.N.ap - (l) - f - ap - f.ap] \quad (17)$$

$$EfeitoAp = \frac{1}{4n} [ap + f.ap + N.ap + f.N.ap - (l) - f - N - f.N] \quad (18)$$

Os efeitos das interações dos fatores dois a dois são estimados, no caso da interação F-N, pela diferença entre a soma dos efeitos de F nos dois níveis de N. Por convenção, metade desta diferença é chamada de interação R-N. Simbolicamente, as três interações entre os fatores são:

$$EfeitoF - N = \frac{1}{4n} [f.N.ap - N.ap + f.N - N - f.ap + ap - f + (l)] \quad (19)$$

$$EfeitoF - Ap = \frac{1}{4n} [(l) - f + N - f.N - ap + f.ap - N.ap + f.N.ap] \quad (20)$$

$$EfeitoN - Ap = \frac{1}{4n} [(l) + f - N - f.N - ap - f.ap + N.ap + f.N.ap] \quad (21)$$

A interação F-N- A_p é definida como a soma das diferenças entre a interação F-N para os dois diferentes níveis de A_p , sendo assim:

$$EfeitoR - N - Ap = \frac{1}{4n} [f.N.ap - N.ap - f.ap + ap - f.N + N + f - (l)] \quad (22)$$

Normalmente, num experimento como este, seria realizada uma análise de variância (ANOVA), para a determinação de quais são os fatores que realmente

possuem efeitos significativos sobre a rugosidade da superfície usinada. Porém, no caso deste experimento, os fatores estudados já foram pré-selecionados dentre vários outros, e deseja-se realizar um experimento posterior com todos eles para a estimativa do desgaste de fresas de topo, sendo que assim não é necessário desconsiderar nenhum deles, mesmo que seu efeito seja bem pequeno.

Deve-se lembrar que o objetivo deste ensaio é a determinação dos pesos de cada parâmetro de corte, e não eliminar da análise aqueles que por ventura não tenham participação significativa na rugosidade da superfície usinada.

A partir dos valores estimados para os efeitos de cada parâmetro e suas interações, pode-se avaliar qual é o peso de cada um dos parâmetros de corte sobre a rugosidade medida.

9 – RESULTADOS

9.1- Ensaio para Determinação dos Parâmetros Máximos e Mínimos

Seguindo metodologia descrita anteriormente neste trabalho, os ensaios foram realizados, sendo os resultados encontrados mostrados na tabela a seguir:

Tabela 9.1.1 – Ensaio dos Máximos e Mínimos

| Ensaio | f (mm/min) | N (rpm) | ap (mm) | Ra média (μm) |
|--------|--------------|-----------|-----------|----------------------|
| 1 | 50 | 450 | 6 | 2,44 |
| 2 | 39 | 355 | 6 | 3,28 |
| 3 | 31 | 280 | 6 | 2,48 |
| 4 | 25 | 224 | 6 | 1,96 |
| 5 | 62 | 560 | 6 | 3,32 |
| 6 | 78 | 710 | 6 | 3,22 |
| 7 | 20 | 180 | 6 | 1,98 |
| 8 (*) | 50 | 450 | 8 | Falha |
| 9 | 50 | 450 | 1 | 2,76 |

(*) O ensaio 8 não pôde ser completado, pois a combinação de parâmetros de corte ao qual ente se refere causou vibração e ruídos excessivos no sistema, além de evidência de quebra da ferramenta. Por este motivo, este ensaio teve que ser interrompido por uma parada de emergência.

A análise dos resultados permite que sejam tiradas algumas conclusões a respeito do aparato experimental montado:

- Avanço (f): máximo = 78 mm/min.
Mínimo = 25 mm/min.
- Rotação do fuso (N): máx = 710 rpm.
mín = 224 rpm.

- Profundidade de corte (ap): máximo = 6 mm.
mínimo = 1 mm.

Deve-se lembrar que estes não são os valores de máximos e mínimos reais, apenas estimativas realizadas, embasadas em metodologia científica, para que a faixa de operação da fresadora fosse esboçada e para que o Ensaio do Peso dos Parâmetros tivesse um resultado mais significativo.

Justificativas:

Devido ao ocorrido no ensaio 8, e como os parâmetros f e N já haviam sido testados nestes valores para $ap = 6$ mm, pode-se concluir que $ap = 8$ mm é um valor que o sistema não suporta, embora a indicação do fabricante é de que a profundidade máxima de corte é metade do diâmetro da fresa, ou seja, 8 mm.

O ensaio 6 mostrou que a rugosidade da superfície usinada não varia significativamente quando f e N são aumentados mantendo-se fz constante. Assim, foi decidido que 78 mm/min e 710 rpm seriam o parâmetro máximo, devido a problemas de rigidez do aparato experimental.

Como a rugosidade não aumentou significativamente com a diminuição de f e N , foi decidido que seus valores mínimos seriam 25 mm/min e 224 rpm respectivamente, pois, no Ensaio do Peso dos Parâmetros, um avanço muito grande com rotação do fuso pequena pode causar avarias à ferramenta.

Finalmente, decidiu-se determinar que a mínima profundidade de corte seria igual a 1 mm, pois com valores menores do que estes começariam a surgir forças devido ao “efeito de cunha”.

9.2- Ensaio do Peso dos Parâmetros

Seguindo metodologia descrita anteriormente neste trabalho, foram utilizadas fresas para a realização dos 16 ensaios, sendo que cada combinação possível de parâmetros máximos e mínimos foi ensaiada duas vezes, um com uma fresa nova e outra com uma fresa usada. Não foram notadas diferenças significativas entre a

rugosidade de uma peça usinada com uma fresa nova de uma usinada com uma fresa usada, para uma mesma combinação de parâmetros de corte.

Isso faz com que se acredite que o desgaste da fresa em um processo de ranhurado com os que foram realizados é mínimo, sendo que a vida da fresa é muitas vezes superior a este tempo de usinagem.

Para cada combinação de parâmetros de corte, a rugosidade da superfície usinada foi medida três vezes, conforme a Tabela (9.2.1), sendo que o valor utilizado para a realização dos cálculos do Método de Regressão Linear Múltipla será a média entre estes três valores.

A partir das fórmulas explicitadas e comentadas no tópico Materiais e Métodos, pode-se calcular os efeitos de cada parâmetro e suas interações. Assim, seguem-se os referidos cálculos:

$$(1) = 1,11 + 1,07 = 2,18.$$

$$c = 1,35 + 1,29 = 2,64.$$

$$b = 0,93 + 1,20 = 2,13.$$

$$bc = 1,45 + 1,55 = 3,00.$$

$$a = 4,90 + 2,75 = 7,65.$$

$$ac = 2,57 + 2,77 = 5,34.$$

$$ab = 1,93 + 1,14 = 3,07.$$

$$abc = 1,64 + 2,69 = 4,33.$$

$$n = \text{Número de Replicações} = 2.$$

Tabela 9.2.1 – Ensaio do Peso dos Parâmetros

| Ensaio | Fresa | Fatores | <i>f</i> (mm/min) | <i>N</i> (rpm) | <i>ap</i> (mm) | <i>Ra1</i> (μ m) | <i>Ra2</i> (μ m) | <i>Ra3</i> (μ m) | <i>Ram</i> (μ m) |
|--------|-------|---------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 1 (*) | (1) | 25 | 224 | 1 | 1,12 | 1,16 | 1,04 | 1,11 |
| 2 | 2 (*) | c | 25 | 224 | 6 | 1,52 | 1,20 | 1,32 | 1,35 |
| 3 | 3 (*) | b | 25 | 710 | 1 | 0,78 | 1,26 | 0,74 | 0,93 |
| 4 | 4 (*) | bc | 25 | 710 | 6 | 1,48 | 1,50 | 1,38 | 1,45 |
| 5 | 5 (*) | a | 78 | 224 | 1 | 4,84 | 4,62 | 5,24 | 4,90 |
| 6 | 6 (*) | ac | 78 | 224 | 6 | 2,96 | 2,48 | 2,28 | 2,57 |
| 7 | 7 (*) | ab | 78 | 710 | 1 | 1,92 | 1,70 | 2,16 | 1,93 |
| 8 | 8 (*) | abc | 78 | 710 | 6 | 1,64 | 1,64 | 1,64 | 1,64 |
| 9 | 8 | (1) | 25 | 224 | 1 | 1,14 | 1,04 | 1,02 | 1,07 |
| 10 | 7 | c | 25 | 224 | 6 | 1,10 | 1,48 | 1,30 | 1,29 |
| 11 | 6 | b | 25 | 710 | 1 | 1,14 | 1,18 | 1,28 | 1,20 |
| 12 | 5 | bc | 25 | 710 | 6 | 1,70 | 1,48 | 1,46 | 1,55 |
| 13 | 4 | a | 78 | 224 | 1 | 2,74 | 2,78 | 2,72 | 2,75 |
| 14 | 3 | ac | 78 | 224 | 6 | 2,74 | 2,56 | 3,02 | 2,77 |
| 15 | 2 | ab | 78 | 710 | 1 | 1,06 | 1,32 | 1,04 | 1,14 |
| 16 | 1 | abc | 78 | 710 | 6 | 2,52 | 2,86 | 2,70 | 2,69 |

Obs 1: As fresas marcadas com (*) são fresas novas.

Obs 2: $a = f$; $b = N$ e $c = ap$.

Assim:

$$\begin{aligned}
 \text{Efeito } f &= (1/4*n) * [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] = \\
 &= (1/4*2) * [7,65 + 3,07 + 5,34 + 4,33 - 2,18 - 2,13 - 2,64 - 3,00] = \\
 &= (1/8) * (10,44) \gg \\
 &\gg \text{Efeito } f = 1,305.
 \end{aligned}$$

Efeito N = $(1/4*n)*[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] =$
 $= (1/4*2)*[2,13 + 3,07 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,64 - 5,34] =$
 $= (1/8)*(-5,28) >>$
>> Efeito N = -0,66.

Efeito ap = $(1/4*n)*[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] =$
 $= (1/4*2)*[2,64 + 5,34 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,13 - 3,07] = \backslash$
 $= (1/8)*(0,28) >>$
>> Efeito ap = 0,035.

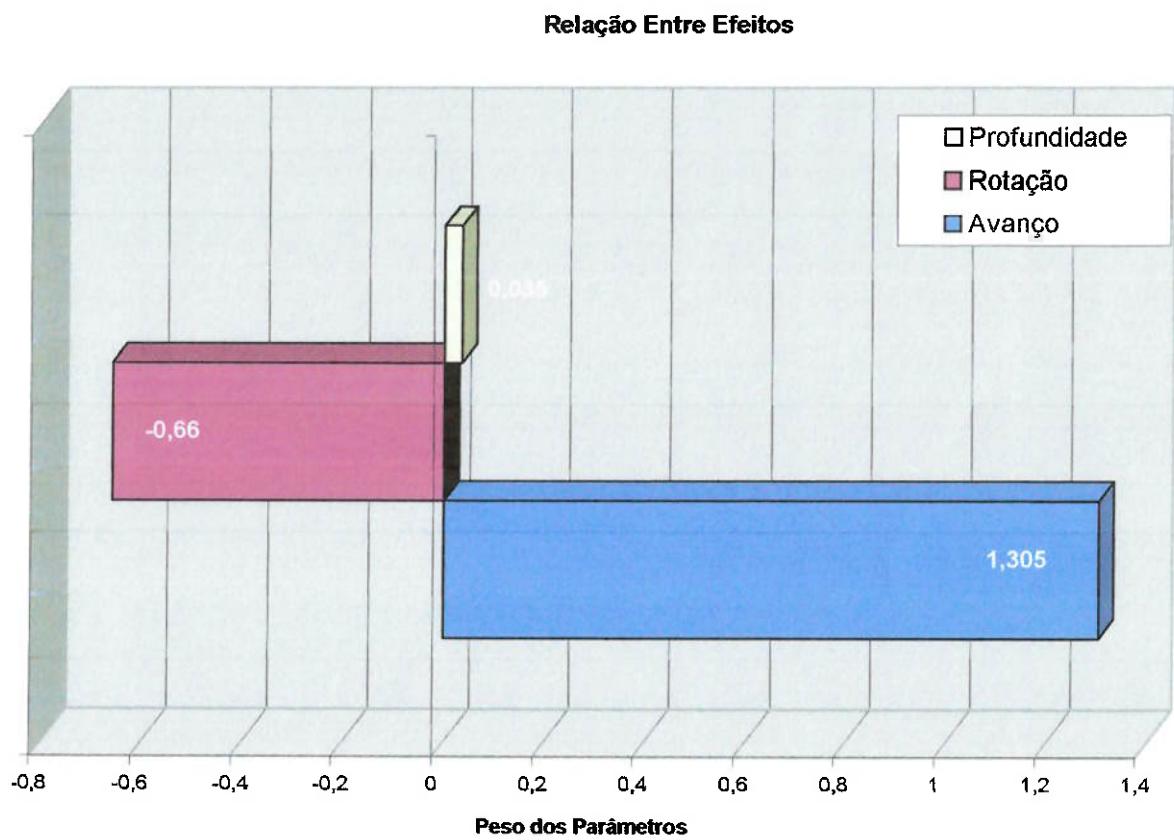


Figura 9.2.1 – Relação entre os efeitos dos parâmetros

9.3 - Equação que relaciona a rugosidade e os parâmetros de corte

A partir dos efeitos encontrados para cada um dos parâmetros de corte, pode-se determinar a equação que relaciona a rugosidade da superfície usinada e os parâmetros de corte da seguinte forma:

$$Ra = a*N + b*f + c*ap + E \quad (23)$$

Os parâmetros a , b e c correspondem aos coeficientes que definem a influência de cada um dos parâmetros, e são determinados como a metade da influência do respectivo parâmetro. Assim:

$$a = (\text{Efeito } N) / 2 \quad (24)$$

$$b = (\text{Efeito } f) / 2 \quad (25)$$

$$c = (\text{Efeito } ap) / 2 \quad (26)$$

A variável E corresponde ao erro aleatório devido ao método de regressão linear múltipla empregado para a obtenção dos efeitos dos parâmetros.

O método utilizado para a obtenção do erro aleatório foi o de comparar o resultado fornecido pela equação sem este erro com os dados experimentais obtidos nos ensaios. Este procedimento foi repetido para todos os 16 ensaios realizados, e foi obtida uma média aritmética dos valores de erro, resultando num erro aleatório igual a **1,86 micrometros**.

Calculando os coeficientes da equação:

$$a = \text{Efeito } N / 2 = -0,66 / 2 \gg$$

$$\gg a = \mathbf{-0,33}$$

$$b = \text{Efeito } f / 2 = 1,305 / 2 \gg$$

$$\gg b = \mathbf{0,6525}$$

$$c = \text{Efeito } ap / 2 = 0,035 / 2 \gg$$

$$\gg c = \mathbf{0,0175}$$

E a equação se torna:

$$Ra = 1,86 - 0,33*N + 0,6525*f + 0,0175*ap \quad (27)$$

10 – FERRAMENTA DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO

Utilizando a equação encontrada através do Método de Regressão Linear Múltipla e de uma implementação de um algoritmo teórico retirado de (Altintas, 2000), foi desenvolvida uma ferramenta que tem como objetivo auxiliar o operador da máquina em chão de fábrica ou até mesmo o projetista ao desenvolver um novo produto.

Esta ferramenta foi desenvolvida em linguagem VBA, com base em um arquivo do Microsoft Excel.

Basicamente, o software possui dois módulos distintos: O Módulo Rugosidade e o Módulo Forças de Corte.



Figura 10.1 - Tela inicial do Software

Modulo Rugosidade: Este módulo possui duas ferramentas, uma para prever a rugosidade da superfície usinada, informando ao programa os parâmetros de corte utilizados. A outra, é estimar os parâmetros de corte ideais para um processo de usinagem, informando ao programa dados sobre o processo tais como tipo de material da peça e rugosidade superficial esperada.

O módulo de prever rugosidade superficial funciona como uma aplicação direta da equação que relaciona a rugosidade superficial e os parâmetros de corte.



Figura 10.2 - Ferramenta de Prever Rugosidade

Porém, para que os parâmetros de corte possam ser inseridos na equação, estes devem passar por um processo de linearização. Este processo se faz necessário devido ao resultado que o Método de Regressão Linear Múltipla fornece.

Como neste método trabalha-se com níveis altos (+1) e níveis baixos (-1) dos parâmetros, qualquer valor entre estes dois níveis deve ser linearizado no intervalo de -1 até +1. Assim, funções para linearizar os parâmetros inseridos pelo usuário do software foram implementadas.

Já o módulo de estimar os parâmetros de corte, possui algumas regras além da própria equação. O usuário deve inserir os seguintes parâmetros: Tipo de operação (que pode ser desbaste ou acabamento), Tipo de Material da peça (que pode ser de fácil ou difícil usinagem) e rugosidade superficial esperada para o processo.

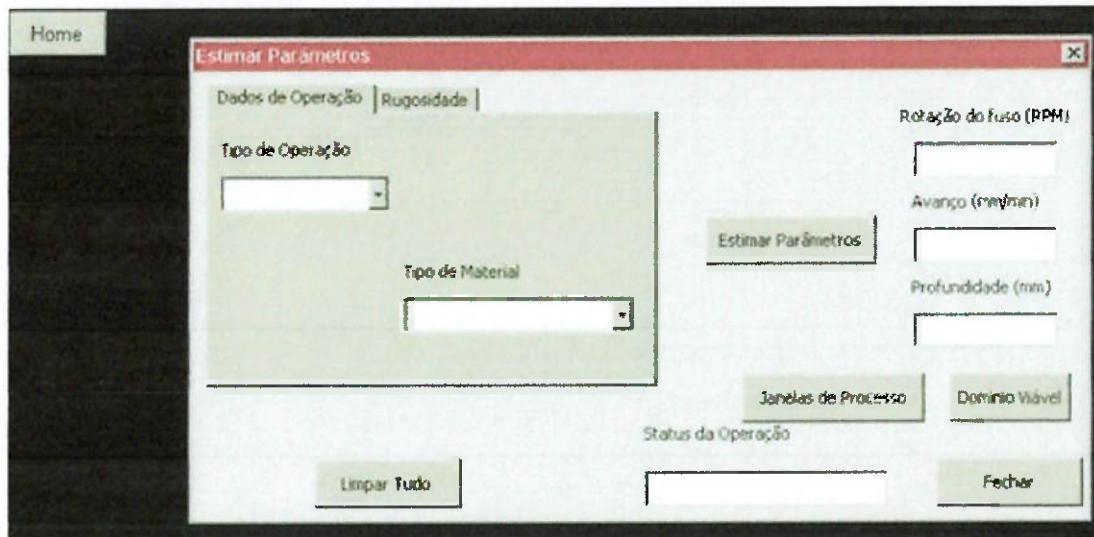


Figura 10.3 - Ferramenta de Estimar Parâmetros

Assim, para todas as combinações possíveis de informações de tipo de operação e tipo de material (4 combinações possíveis), foram definidos valores de rotação do fuso e de profundidade de corte. Por exemplo, se a operação for de desbaste e o material da peça for de difícil usinagem, a rotação do fuso é determinada como 300 rpm e a profundidade de corte como 3 mm. Já se a operação for de acabamento e o material de fácil usinagem, a rotação do fuso é determinada como 700 rpm e a profundidade de corte como 1 mm.

A partir da rotação do fuso e da profundidade de corte obtidas desta maneira, além da rugosidade da superfície desejada informada pelo usuário, estes dados são inseridos na equação e o avanço é calculado.

Caso não seja possível encontrar um valor de avanço para uma certa combinação de rotação do fuso, profundidade de corte e rugosidade superficial, o software exibe uma mensagem informando que é impossível realizar uma operação com tais parâmetros.

Neste trabalho foi utilizado um método de otimização para encontrar a melhor resposta para o software de previsão de rugosidade. Na formulação do problema de otimização estão presentes os seguintes conceitos: variáveis de projeto, função objetivo, restrições e domínio viável e inviável.

As variáveis de projeto são classificadas em variáveis contínuas e discretas. As variáveis contínuas podem assumir qualquer valor, já as variáveis discretas estão

limitadas a valores isolados. Sendo o caso de variáveis discretas o nosso pois como dito antes elas estão dentro de uma certa gama de resultados.

A função objetivo (ou "objective function") deve quantificar o que queremos otimizar e será função das variáveis de projeto escolhidas. A função objetivo deve ser usada como uma medida da eficiência o projeto. A função objetivo pode ser classificada em simples ou multiobjetivo (ou multicritério). A função é dita simples quando temos apenas um objetivo e é denominada multiobjetivo quando queremos otimizar vários objetivos de uma só vez. Este trabalho se enquadra no caso multiobjetivo. A função objetivo deste trabalho pode ser expressa por:

$$Ra = -0,33 \cdot rot + 0,6525 \cdot f + 0,0175 \cdot ap + 1,86$$

Figura 10.4 – Função Objetivo

As restrições, que são as limitações impostas para se obter a solução otimizada, logo acima. Definido o problema de otimização, o próximo conceito é discutir a região de localização da sua solução. A parte do domínio em que as restrições são respeitadas é denominada domínio viável, enquanto que a parte do domínio em que alguma restrição não é respeitada é denominado domínio inviável.

As restrições do problema podem ser definidas como os limites máximos e mínimos em que a equação é válida, assim sendo:

$$\begin{aligned} 224 &< rot &< 710 & \text{(rpm)} \\ 25 &< f &< 78 & \text{(mm/min)} \\ 1 &< ap &< 6 & \text{(mm)} \end{aligned}$$

Figura 10.5 – Restrições

Esse domínio é representado em um espaço tridimensional pela Figura (10.6) a seguir:

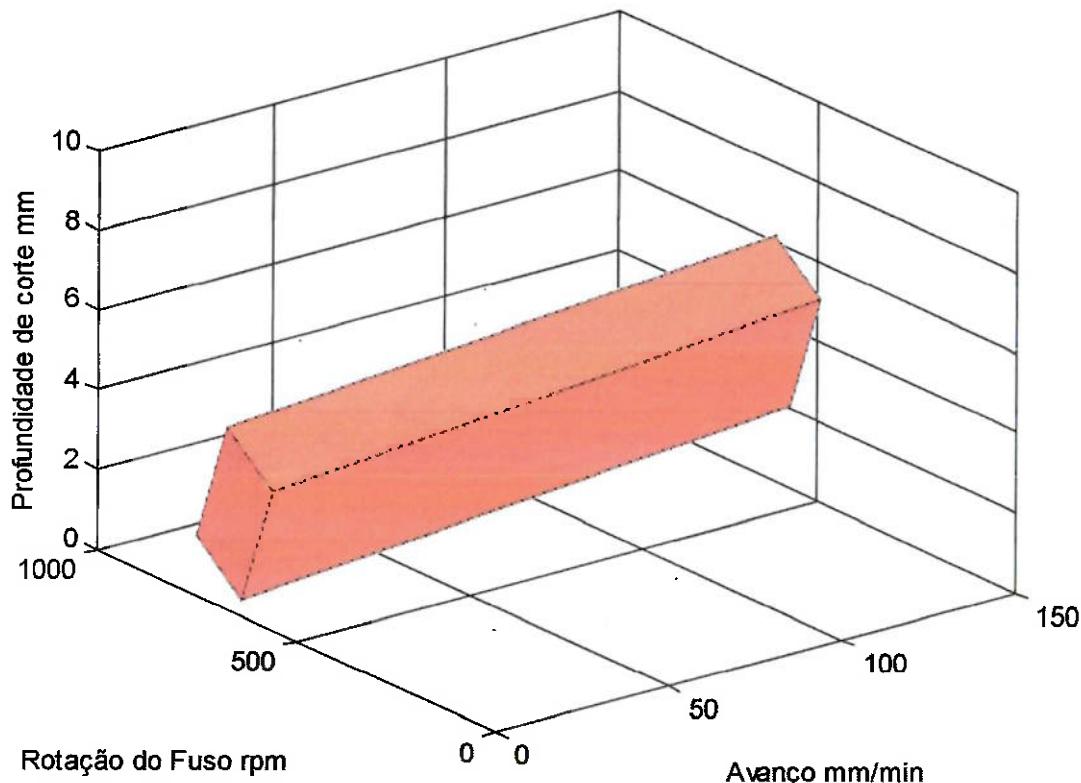


Figura 10.6 – Representação gráfica da região cúbica, contínua e convexa, definida pelas restrições do problema.

A implementação do método de otimização consistiu em se plotar o plano representado pela intersecção da função objetivo e as restrições do problema, sendo que este resultado deve ser comparado com o gráfico das janelas de processo.

As quatro possibilidades de condições de operação disponíveis na ferramenta podem ser traduzidas em “Janelas de Processo”, que definem regiões no espaço 3D definido pelos três parâmetros de corte. Isso pode ser evidenciado na Figura (10.7) a seguir:

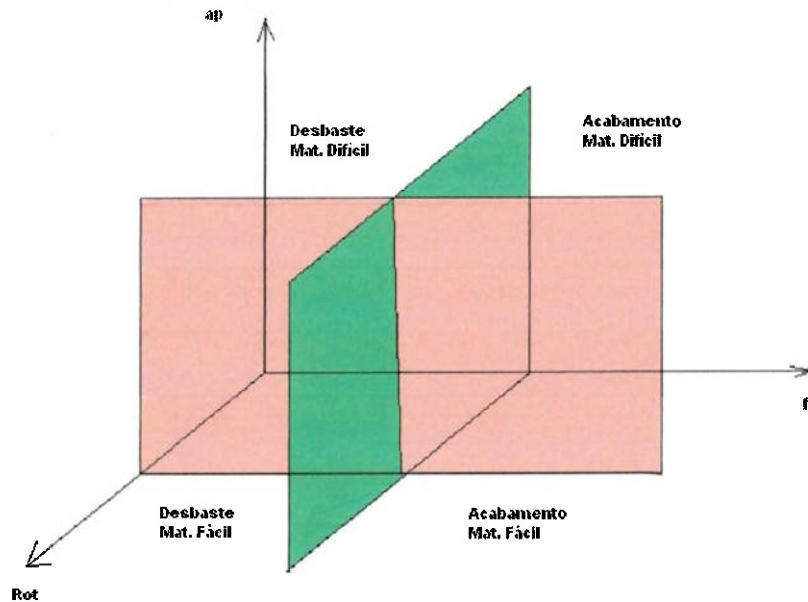


Figura 10.7 – Janelas de Processo

Módulo Forças de Corte: Neste módulo, existe uma ferramenta para a previsão das forças de corte numa operação de fresamento de topo. O algoritmo implementado integra a força de corte, começando de zero, ao longo da profundidade de corte e ao longo de uma rotação completa da ferramenta em torno de seu próprio eixo, sendo que no caso desta ferramenta, os dados de cada iteração são armazenados e posteriormente plotados em um gráfico que é exibido para o usuário. O algoritmo calcula o valor das componentes de força nos eixos x e y (direção de avanço e direção perpendicular à de avanço), sendo que a ferramenta utiliza estes valores para compor a força resultante de corte, que também é exibida no gráfico.

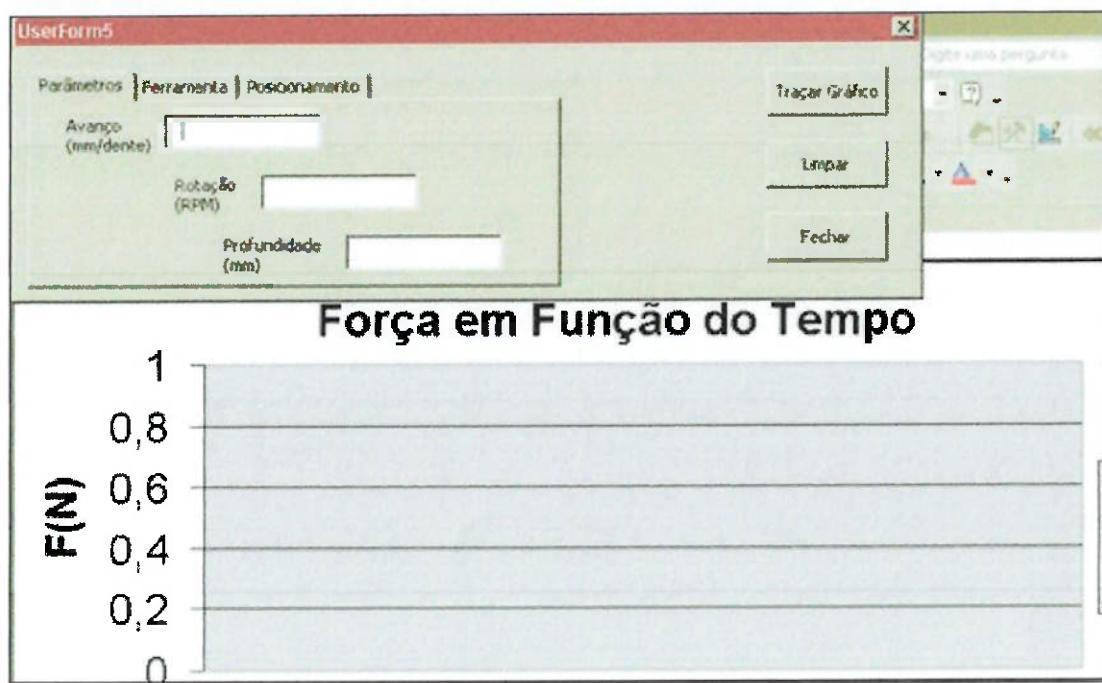


Figura 10.8 – Ferramenta “Prever Forças de Corte”

11 – DISCUSSÕES

11.1 – Validação dos Resultados da Ferramenta (Módulo Rugosidade)

O cálculo feito para se verificar a validade do modelo proposto, foi o de medir o erro entre os valores de rugosidade obtidos em cada um dos ensaios e os valores fornecidos pela ferramenta para os mesmos parâmetros de corte. Daí, deve-se comparar este erro com o erro entre os valores medidos nos experimento para o mesmo conjunto de parâmetros, sendo que assim podemos comparar a precisão da ferramenta com a variabilidade do processo. O cálculo foi realizado sempre dividindo o maior valor pelo menor valor de rugosidade e subtraindo-se 1 do resultado. Todos os resultados de erro foram somados e a soma dos erros devido à variabilidade do processo foi comparada com a soma dos erros da ferramenta. Os resultados encontrados estão na tabela a seguir:

Tabela 11.1.1 – Validação da Ferramenta

| Ensaios | <i>f</i> | <i>n</i> | <i>ap</i> | <i>Ra exp</i> | <i>Ra ferr</i> | Variabilidade | Erro |
|--------------|----------|----------|-----------|---------------|----------------|--------------------|-------------|
| | (mm/min) | (rpm) | (mm) | (μ m) | (μ m) | Processo | Ferramenta |
| 1 | 25 | 224 | 1 | 1,11 | 1,55 | 4% | 40% |
| 2 | 25 | 224 | 6 | 1,35 | 1,585 | 5% | 17% |
| 3 | 25 | 710 | 1 | 0,93 | 0,89 | 29% | 4% |
| 4 | 25 | 710 | 6 | 1,45 | 0,925 | 7% | 57% |
| 5 | 78 | 224 | 1 | 4,9 | 2,855 | 78% | 72% |
| 6 | 78 | 224 | 6 | 2,57 | 2,89 | 8% | 12% |
| 7 | 78 | 710 | 1 | 1,93 | 2,195 | 69% | 14% |
| 8 | 78 | 710 | 6 | 1,64 | 2,23 | 64% | 36% |
| 9 | 25 | 224 | 1 | 1,07 | 1,55 | 4% | 45% |
| 10 | 25 | 224 | 6 | 1,29 | 1,585 | 5% | 23% |
| 11 | 25 | 710 | 1 | 1,2 | 0,89 | 29% | 35% |
| 12 | 25 | 710 | 6 | 1,55 | 0,925 | 7% | 68% |
| 13 | 78 | 224 | 1 | 2,75 | 2,855 | 78% | 4% |
| 14 | 78 | 224 | 6 | 2,77 | 2,89 | 8% | 4% |
| 15 | 78 | 710 | 1 | 1,14 | 2,195 | 69% | 93% |
| 16 | 78 | 710 | 6 | 2,69 | 2,23 | 64% | 21% |
| Total | | | | | | 527% | 544% |
| Erro | | | | | | (544/527)-1 | 3% |

Novamente estes erros foram comparados percentualmente, dividindo-se o maior valor pelo menor e subtraindo-se 1 do resultado. O resultado encontrado foi muito bom, sendo que o erro introduzido pelo uso da ferramenta foi estimado como sendo 3%.

11.2 – Validação dos Resultados da Ferramenta (Módulo Forças de Corte)

Com a utilização do módulo de forças de corte da ferramenta, podem-se verificar alguns padrões nas forças de corte que já são conhecidos, o que garante que o algoritmo reproduz com relativa precisão o fenômeno da variação da força com o tempo. Alguns destes resultados podem ser verificados nos tópicos a seguir:

- O número de dentes da fresa determina o número de picos de força que aparecem em uma rotação da ferramenta.

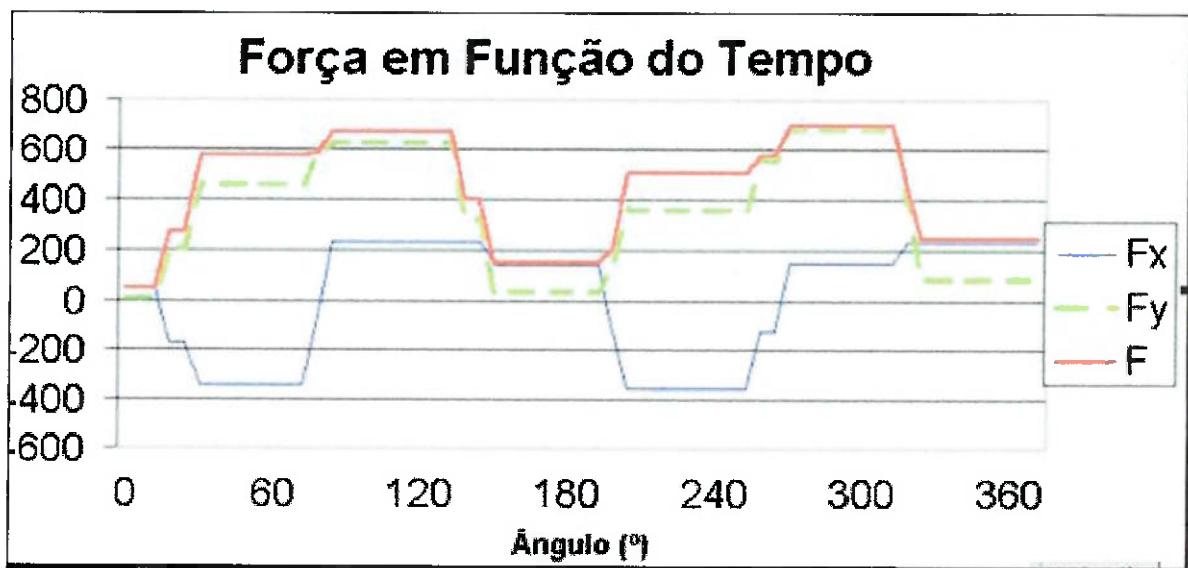


Figura 11.2.1 – Força de Corte Fresa de 2 dentes

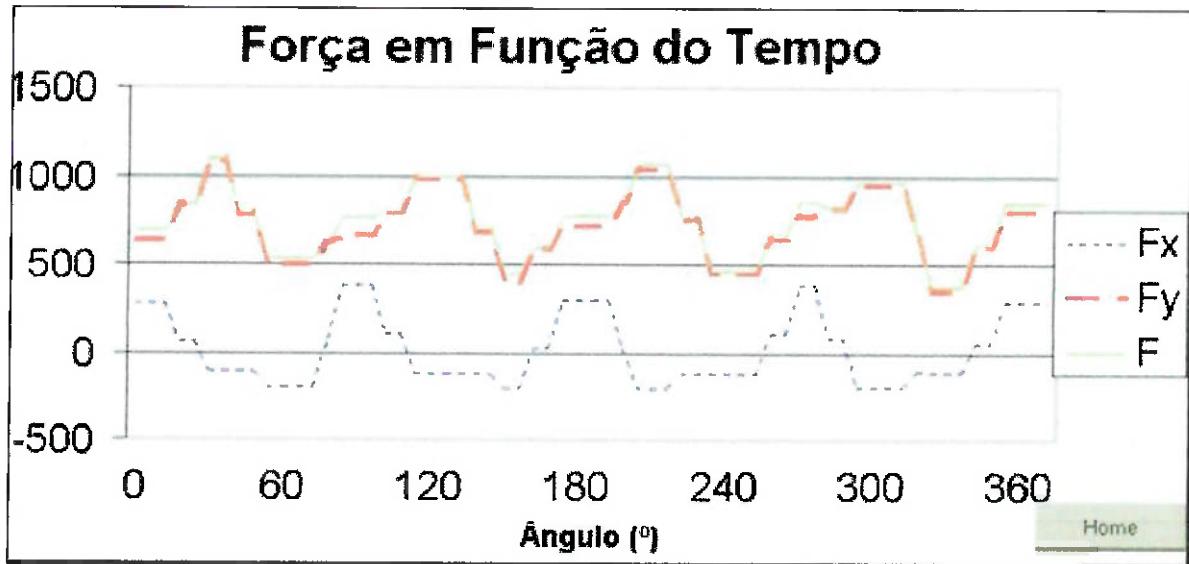


Figura 11.2.2 – Força de Corte Fresa 4 dentes

- Os sinais das forças “Fx” e “Fy” são coerentes com o da teoria (Altintas, 2000), sendo “Fx” negativo e “Fy” positivo.
- No caso de fresas com 2 dentes de corte, existem no gráfico dois pontos em que as forças “Fx” e “Fy” tendem a zero, fazendo com que a força resultante também tenda a zero, como pode ser visto na Figura (11.2.1). Estes pontos são os pontos correspondentes aos instantes de tempo em que um dos dentes da fresa está saindo da peça e o outro está entrando.
- Pode-se perceber que no caso de fresas de 4 dentes isto não ocorre, pois sempre existe o contato de mais de um dente da fresa com a peça, fazendo com que os picos de força “Fx” e “Fy” estejam deslocados, como pode-se perceber na Figura (11.2.2).
- Uma limitação do algoritmo foi verificada, sendo que para fresas de 6 dentes, os gráficos de força não são muito precisos. Esta limitação não se verifica para fresas com maior número de dentes.

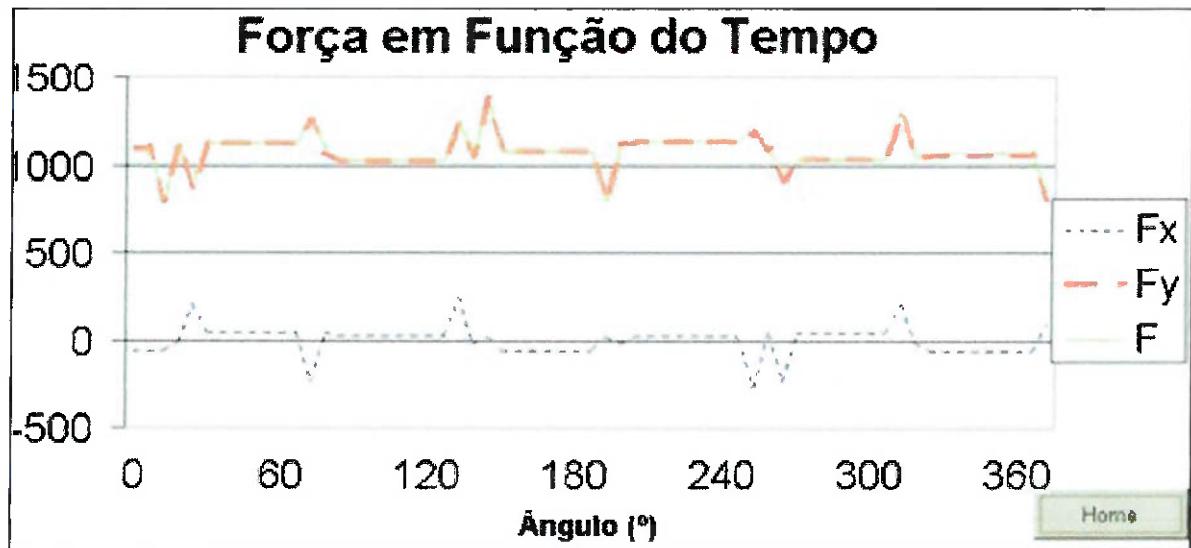


Figura 11.2.3 – Força de Corte Fresa 6 dentes

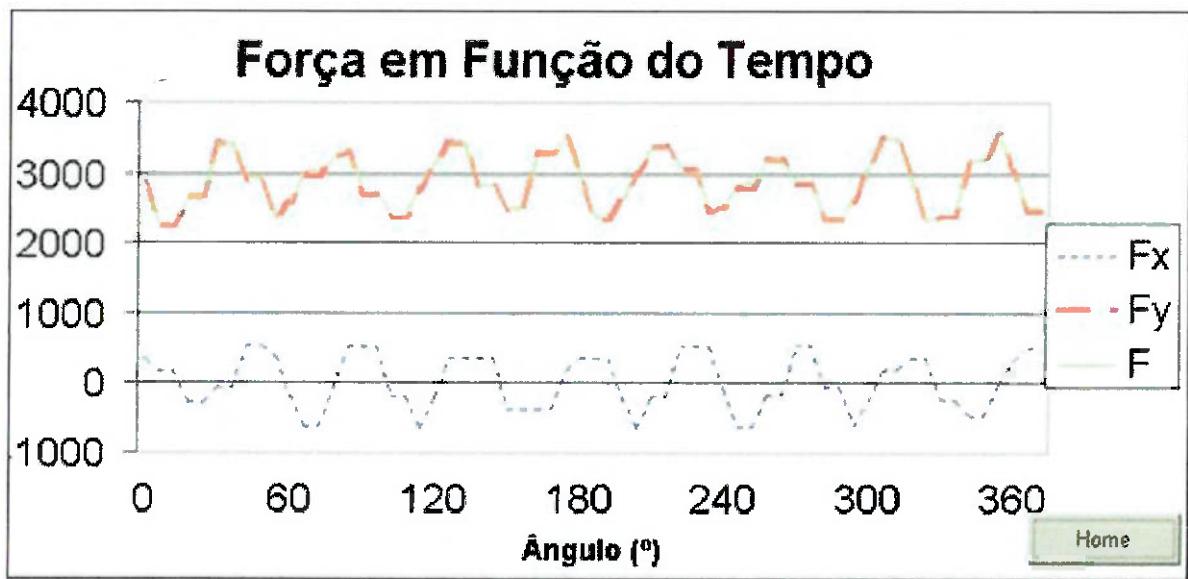


Figura 11.2.4 – Força de Corte Fresa de 8 dentes

11.3 – Efeitos de Segunda e Terceira Ordem

A seguir, serão calculados os efeitos das interações entre os parâmetros dois a dois e da interação entre os 3 parâmetros.

Efeito f-N =

$$\begin{aligned}
 &= (1/4*n)*[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] = \\
 &= (1/4*2)*[4,33 - 3,00 + 3,07 - 2,13 - 5,34 + 2,64 - 7,65 + 2,18] = \\
 &= (1/8)*(-5,9) \gg \\
 &>> \text{Efeito f-N} = -0,7375.
 \end{aligned}$$

Efeito f-ap =

$$\begin{aligned}
 &= (1/4*n)*[(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] = \\
 &= (1/4*2)*[2,18 - 7,65 + 2,13 - 3,07 - 2,64 + 5,34 - 3,00 + 4,33] = \\
 &= (1/8)*(-2,38) \gg \\
 &>> \text{Efeito f-ap} = -0,2975.
 \end{aligned}$$

Efeito N-ap =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] = \\ &= (1/4*2)*[2,18 + 7,65 - 2,13 - 3,07 - 2,64 - 5,34 + 3,00 + 4,33] = \\ &= (1/8)*(3,98) >> \\ &>> \mathbf{Efeito\ N-ap = 0,4975.} \end{aligned}$$

Efeito f-N-ap =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] = \\ &= (1/4*2)*[4,33 - 3,00 - 5,34 + 2,64 - 3,07 + 2,13 + 7,65 - 2,18] = \\ &= (1/8)*(3,16) >> \\ &>> \mathbf{Efeito\ f-N-ap = 0,395.} \end{aligned}$$

Pelos valores encontrados para os efeitos de segunda e terceira ordem, pode-se afirmar que estes não são desprezíveis quando comparados com os de primeira ordem. Porém, não é o escopo deste trabalho analisar tais efeitos.

12 - CONCLUSÕES

Os resultados encontrados para o peso de cada parâmetro de corte, no caso da rugosidade, são coerentes com os encontrados na literatura sobre o assunto (Diniz, 1999). Pode-se perceber que o parâmetro de corte que mais influencia a rugosidade da superfície usinada é o avanço, seguido pela rotação do fuso e pela profundidade de corte, nesta ordem.

Além disso, os resultados mostram o que já era esperado, ou seja, que enquanto o avanço e a profundidade de corte são diretamente proporcionais à rugosidade, a rotação do fuso é inversamente proporcional a esta.

Isso quer dizer que com um aumento do avanço ou da profundidade de corte, a rugosidade irá aumentar, enquanto que se a rotação do fuso for aumentada, irá se observar uma diminuição na rugosidade da superfície usinada.

Os gráficos de domínio viável, juntamente com o gráfico das janelas de processo, são outra ferramenta poderosa no momento de tomada de decisão, sendo que deixa o usuário mais livre para escolher uma combinação de parâmetros de corte que melhor se adapte ao seu conjunto máquina-peça-ferramenta.

O algoritmo para estimativa da força de corte que foi implementado na ferramenta consegue traduzir com relativa fidelidade o fenômeno ocorrido durante o processo de fresamento de topo, agregando assim valor ao módulo de forças de corte.

A Ferramenta de Auxílio à Tomada de Decisão foi implementada com sucesso em todos os seus módulos, sendo que poderá se tornar uma aliada dos processos de projeto e manufatura.

13 – ANEXOS

A- MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA

1. Introdução

Este manual tem por objetivo passar ao usuário as noções básicas de como operar a Ferramenta de Auxílio à Decisão v2.0. Além disso, deve instruir o usuário na maneira como a mesma deve ser instalada e quais são os requisitos básicos do sistema para que esta possa funcionar corretamente.

2. Requisitos básicos do sistema

- Processador Pentium® 266MHz
- 64 MB de memória RAM
- 200 KB de espaço livre em disco
- Drive de disquete de 3,5 polegadas
- Drive de CD-ROM
- Microsoft Windows® 98 ou superior
- Microsoft Excel® 2000 ou superior
- Microsoft Visual Basic® compatível com a versão do Excel
- Matlab® 6.5 R13

3. Instalação

O arquivo da Ferramenta de Auxílio à Decisão v2.0 é fornecido através de um disquete de 3,5 polegadas. O arquivo da ferramenta é “.xls”, e deve ser copiado para o disco rígido para que o software atinja o seu desempenho ideal. A cópia pode ser realizada para qualquer pasta que o usuário desejar.

4. Inicialização

Para começar o uso da ferramenta, o usuário deve primeiramente abrir o software Microsoft Excel®. Então, deve clicar, na barra de ferramentas, no ícone “Ferramentas” → “Opções” → “Segurança” e clicar na opção “Nível de Segurança Médio”. Após o procedimento, o usuário deve fechar o programa.

Após a preparação do software, o usuário deve realizar um duplo clique sobre o arquivo “.xls” fornecido no disquete. Ao ser carregado o programa, será exibida uma mensagem dizendo “Deseja habilitar as Macros do arquivo?”, sendo que o usuário deve selecionar a opção “Sim”. Com isso, a tela inicial da ferramenta é exibida na tela, e esta está pronta para ser utilizada pelo usuário.

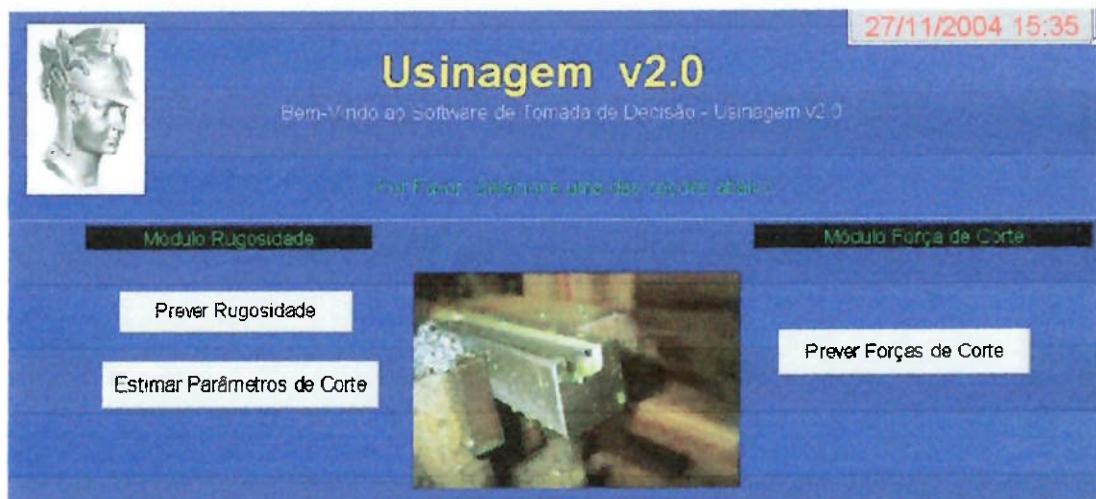


Figura 13.A.1 – Tela inicial da Ferramenta

5. Módulos

A ferramenta é dividida basicamente em dois módulos distintos:

- **Módulo Rugosidade:** Este módulo é composto por duas ferramentas: “Prever Rugosidade” e “Estimar Parâmetros de Corte”. Este módulo foi implementado através de métodos experimentais, e auxilia o usuário a determinar os parâmetros de corte que devem ser utilizados para se atingir um acabamento superficial desejado, ou prever o acabamento superficial de uma operação com os parâmetros informados.
- **Módulo Força de Corte:** Este módulo possui uma ferramenta que proporciona ao usuário uma visualização das forças de corte em função do tempo, em uma rotação da ferramenta, sendo que o usuário pode verificar os seus padrões e valores médios. Este módulo foi implementado através de um algoritmo analítico retirado da literatura técnica da área.

6. Ferramenta “Prever Rugosidade”

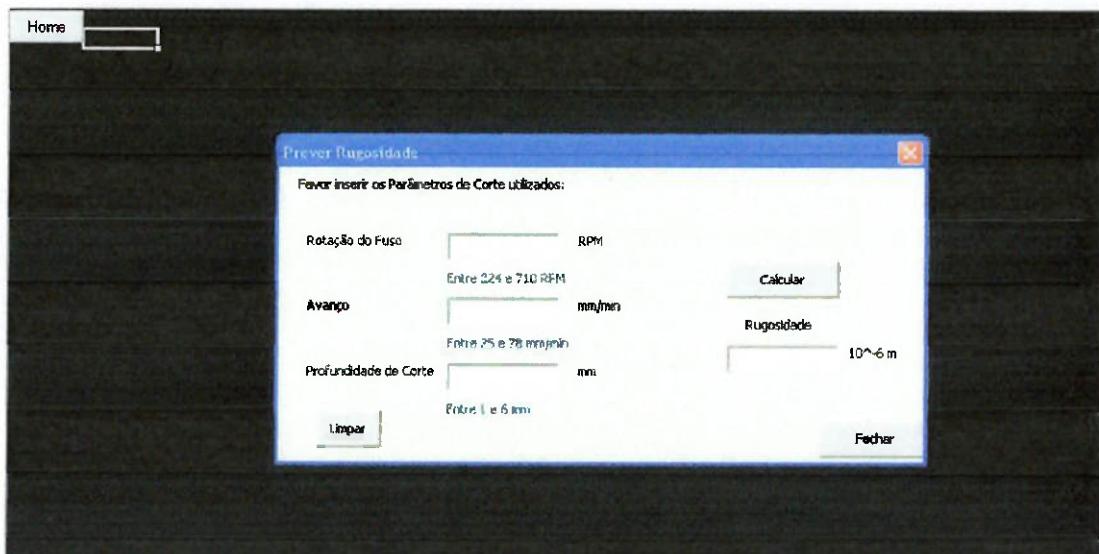


Figura 13.A.2 – Ferramenta “Prever Rugosidade”

Para utilizar esta ferramenta, o usuário deve inserir os parâmetros de corte que deseja utilizar em sua operação. O usuário deve estar atento para que os parâmetros estejam dentro dos intervalos especificados pela ferramenta, sendo que as respostas do mesmo só são válidas para dados dentro destes intervalos, e que o software não aceita valores fora dos intervalos.

O usuário deve inserir todos os dados, sendo que na falta de qualquer um deles o software exibe uma mensagem alertando o usuário.

Então, o usuário deve clicar no botão “Calcular”, sendo que a ferramenta exibe o resultado da rugosidade resultante do processo.

O botão “Limpar” exclui os registros de todos os campos da ferramenta, o botão “Fechar” encerra o uso da ferramenta e o botão “Home” faz que se retorne para a tela inicial do software.

7- Ferramenta “Estimar Parâmetros de Corte”

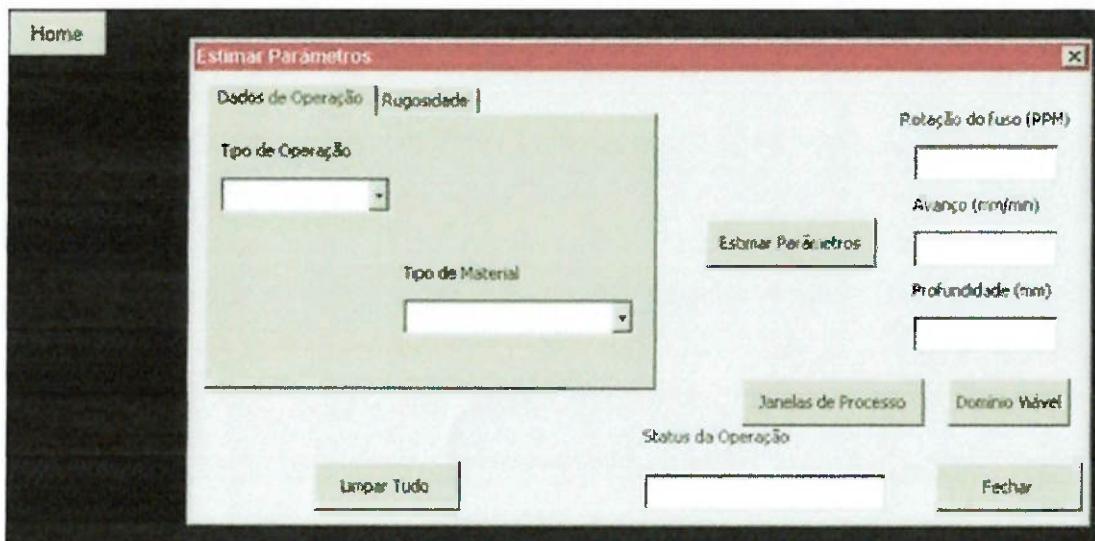


Figura 13.A.3 – Ferramenta “Estimar Parâmetros de Corte”

Para utilizar esta ferramenta, o usuário deve inserir os dados solicitados em duas páginas diferentes:

- Página “Dados da Operação” – O usuário deve informar o tipo de operação que irá realizar (Desbaste ou Acabamento), e se o material que está usinando é de “Fácil Usinagem”, como por exemplo, um aço ABNT 1020, ou se é um aço de mais “Difícil Usinagem”, como por exemplo, um aço ABNT 4045.
- Página “Rugosidade” – O usuário deve informar a rugosidade que deseja atingir com o processo.

A partir dos dados informados pelo usuário, a ferramenta sugere valores para os 3 parâmetros de corte estudados (Rotação do Fuso, Avanço e Profundidade de Corte), sendo que para isso o usuário deve utilizar os seguintes comandos:

- Botão “Estimar Parâmetros” – ao ser clicado, faz com que os valores sugeridos para os parâmetros de corte sejam exibidos nos respectivos campos. Caso alguma das entradas não tenha sido informada, a ferramenta exibe um alerta para o usuário e não realiza o cálculo.
- Botão “Limpar Tudo” – ao ser clicado, faz com que os valores de todos os campos da ferramenta sejam apagados.

- Botão “Domínio Viável” – ao ser clicado, a ferramenta exibe um gráfico mostrando todas as soluções possíveis para que a rugosidade desejada seja atingida. Para que o usuário possa tomar uma decisão, este gráfico deve ser utilizado juntamente com o gráfico das janelas de processo. Módulo interfaceado com o Matlab®.
- Botão “Janelas de Processo” – ao ser clicado, a ferramenta exibe um gráfico das janelas de processo, que devem servir de auxílio ao usuário no momento em que este está analisando o gráfico do domínio viável.
- Botão “Fechar” – ao ser clicado, faz com que a ferramenta de “Estimar Parâmetros de Corte” seja fechada.
- Botão “Home” – ao ser clicado, faz com que se volte para a tela inicial do sistema.

8. Ferramenta “Prever Forças de Corte”

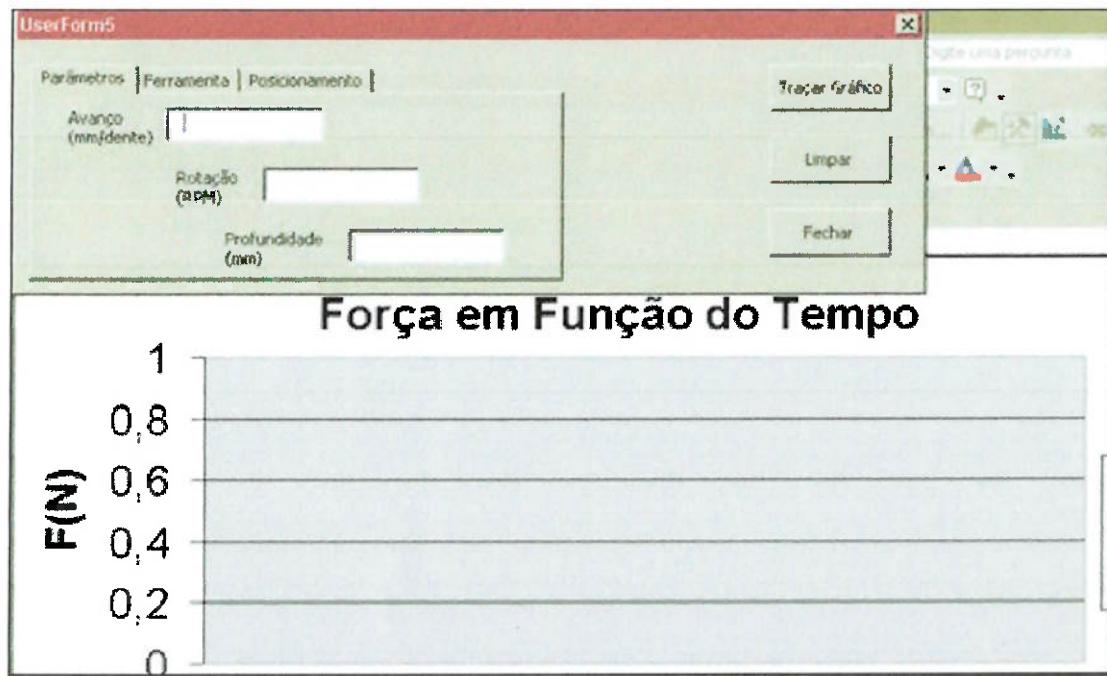


Figura 13.A.4 – Ferramenta “Prever Forças de Corte”

Para utilizar esta ferramenta, o usuário deve inserir os dados de 3 páginas diferentes:

- Página “Parâmetros” – Nesta página devem ser inseridos os parâmetros de corte da operação que será realizada (Rotação do fuso, Avanço e Profundidade de Corte).
- Página “Ferramenta” – Nesta página devem ser inseridos os dados que caracterizam a ferramenta que está sendo utilizada no processo (Diâmetro, Número de dentes e Ângulo de Cunha).
- Página “Posicionamento” – Nesta página devem ser inseridos os dados referentes à posição da ferramenta em relação à peça, ou seja, se a ferramenta está totalmente inserida na peça ou apenas alguma porcentagem desta está inserida na peça. Os parâmetros são “Ângulo de Entrada” e “Ângulo de Saída”.

B- CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA

' Página inicial

'Botão de acesso à Ferramenta Prever Rugosidade

```
Private Sub CommandButton1_Click()
    Sheets("Rugosidade").Select
End Sub
```

'Botão de acesso à Ferramenta Estimar Parâmetros de Corte

```
Private Sub CommandButton2_Click()
    Sheets("Parâmetros").Select
End Sub
```

'Botão de acesso à Ferramenta Prever Forças de Corte

```
Private Sub CommandButton3_Click()
    Sheets("Forças").Select
End Sub
```

'Ativação do link com o Matlab

```
Private Sub Worksheet_Activate()
    mlautostart ("yes")
End Sub
```

'Ferramenta Prever Rugosidade

'Botão "Home" que volta à página inicial

```
Private Sub CommandButton1_Click()
    Sheets("Home").Select
End Sub
```

'Ativação do formulário para entrada de dados da ferramenta

```
Private Sub Worksheet_Activate()
    UserForm1.Show
End Sub
```

'Rotina acionada pelo botão "Calcular"

```
Private Sub CommandButton1_Click()
    'Condição de que todos os valores estão preenchidos
    If (TextBox1.Value <> "" And TextBox2.Value <> "" And TextBox3.Value <> "") Then
        'linearização de RPM
        rot = (TextBox1.Value / 243) - (467 / 243)
        'linearização de Avanço
        av = (2 * TextBox2.Value / 53) - (103 / 53)
```

```

' linearização de profundidade
prof = (2 * TextBox3.Value / 5) - (7 / 5)
'Cálculo da rugosidade a partir da equação
rug = 1.89 + (0.6525 * av) + (-0.33 * rot) + (0.0175 * prof)
TextBox4.Value = rug
Else
    'Mensagem de que faltam dados a serem preenchidos
    UserForm2.Show
End If
End Sub

'Botão de para limpar todos os campos
Private Sub CommandButton2_Click()
    TextBox1.Value = ""
    TextBox2.Value = ""
    TextBox3.Value = ""
    TextBox4.Value = ""
End Sub

'Botão para fechar o formulário de inserção de dados
Private Sub CommandButton3_Click()
    Unload Me
End Sub

```

'Ferramenta Estimar Parâmetros de Corte

```

'Botão "Home" para voltar à tela inicial da Ferramenta
Private Sub CommandButton1_Click()
    Sheets("Home").Select
End Sub

'Ativação do formulário de inserção dos dados
Private Sub Worksheet_Activate()
    UserForm3.Show
End Sub

'Ações realizadas ao ser clicado o botão "Estimar Parâmetros"
Private Sub CommandButton1_Click()
    'Mensagem emitida se o usuário deixar de preencher o valor de rugosidade
    desejado.
    If TextBox4.Value = "" Then
        TextBox8.Value = "Favor inserir todos os dados!"
        TextBox5.Value = ""
        TextBox6.Value = ""
        TextBox7.Value = ""
    Else

```

```

'Seleção de Desbaste de material de fácil usinagem
If ComboBox1.Value = "Desbaste" And ComboBox2.Value = "Fácil
Usinagem (1020)" Then
    'Sugestão de 500rpm
    rot = 500
    'Linearização da rotação
    rotlin = (rot / 243) - (467 / 243)
    TextBox5.Value = rot
    'Sugestão de profundidade de 6 mm
    prof = 6
    'Linearização da profundidade
    proflin = (2 * prof / 5) - (7 / 5)
    TextBox7.Value = prof
    'Cálculo do avanço linearizado através dos outros dois
    parâmetros e da rugosidade informada
    avlin = (TextBox4.Value - 1.89 + 0.33 * rotlin - 0.0175 * proflin)
    / 0.6525
    'Cálculo do avanço real a partir do linearizado
    av = (avlin + (103 / 53)) * (53 / 2)
    'No caso do avanço ser menor que zero, o software informa
    que não é possível chegar a uma rugosidade desejada nas condições informadas.
    If av <= 0 Then
        TextBox5.Value = ""
        TextBox6.Value = ""
        TextBox7.Value = ""
        TextBox8.Value = "Impossível"
    Else
        TextBox6.Value = av
        TextBox8.Value = "Ok"
    End If
    'Seleção de Desbaste de material de difícil usinagem
    ElseIf ComboBox1.Value = "Desbaste" And ComboBox2.Value =
    "Difícil Usinagem (4140)" Then
        rot = 300
        rotlin = (rot / 243) - (467 / 243)
        TextBox5.Value = rot
        prof = 4
        proflin = (2 * prof / 5) - (7 / 5)
        TextBox7.Value = prof
        avlin = (TextBox4.Value - 1.89 + 0.33 * rotlin - 0.0175 * proflin)
        / 0.6525
        av = (avlin + (103 / 53)) * (53 / 2)
        If av <= 0 Then
            TextBox5.Value = ""
            TextBox6.Value = ""
            TextBox7.Value = ""
            TextBox8.Value = "Impossível"
        Else

```

```

        TextBox6.Value = av
        TextBox8.Value = "Ok"
    End If
    'Seleção de Acabamento de material de fácil usinagem
    ElseIf ComboBox1.Value = "Acabamento" And ComboBox2.Value =
    "Fácil Usinagem (1020)" Then
        rot = 700
        rotlin = (rot / 243) - (467 / 243)
        TextBox5.Value = rot
        prof = 1.5
        proflin = (2 * prof / 5) - (7 / 5)
        TextBox7.Value = prof
        avlin = (TextBox4.Value - 1.89 + 0.33 * rotlin - 0.0175 * proflin)
        / 0.6525
        av = (avlin + (103 / 53)) * (53 / 2)
        If av <= 0 Then
            TextBox5.Value = ""
            TextBox6.Value = ""
            TextBox7.Value = ""
            TextBox8.Value = "Impossível"
        Else
            TextBox6.Value = av
            TextBox8.Value = "Ok"
        End If
    'Seleção de Acabamento de material de difícil usinagem
    ElseIf ComboBox1.Value = "Acabamento" And ComboBox2.Value =
    "Difícil Usinagem (4140)" Then
        rot = 600
        rotlin = (rot / 243) - (467 / 243)
        TextBox5.Value = rot
        prof = 1
        proflin = (2 * prof / 5) - (7 / 5)
        TextBox7.Value = prof
        avlin = (TextBox4.Value - 1.89 + 0.33 * rotlin - 0.0175 * proflin)
        / 0.6525
        av = (avlin + (103 / 53)) * (53 / 2)
        If av <= 0 Then
            TextBox5.Value = ""
            TextBox6.Value = ""
            TextBox7.Value = ""
            TextBox8.Value = "Impossível"
        Else
            TextBox6.Value = av
            TextBox8.Value = "Ok"
        End If
    'No caso de algum dado não ser inserido
    Else
        TextBox8.Value = "Favor inserir todos os dados!"
    End If

```

```

        TextBox5.Value = ""
        TextBox6.Value = ""
        TextBox7.Value = ""
    End If
End If
End Sub

'Botão "Fechar" que fecha o formulário de inserção de dados
Private Sub CommandButton2_Click()
    Unload Me
End Sub

'Botão "Limpar" que apaga os dados de todos os campos do formulário
Private Sub CommandButton3_Click()
    ComboBox1.Value = ""
    ComboBox2.Value = ""
    TextBox4.Value = ""
    TextBox5.Value = ""
    TextBox6.Value = ""
    TextBox7.Value = ""
    TextBox8.Value = ""
End Sub

'Botão "Domínio Viável" que plota um gráfico em Matlab de todas as combinações
possíveis de parâmetros para a rugosidade informada
Private Sub CommandButton4_Click()
    Cells(1, 7).Value = TextBox4.Value
    'Macro gravada que faz o link entre o Excel e o Matlab para a plotagem do
gráfico
    Matlab
End Sub

'Botão "Janelas de Processo", que exibe o gráfico das Janelas de Processo
Private Sub CommandButton5_Click()
    Sheets("Janelas de Processo").Select
    Unload Me
End Sub

'Cria as opções dos combobox ao inicializar o formulário
Private Sub UserForm_Activate()
    ComboBox1.AddItem ("")
    ComboBox1.AddItem ("Desbaste")
    ComboBox1.AddItem ("Acabamento")
    ComboBox2.AddItem ("")
    ComboBox2.AddItem ("Fácil Usinagem (1020)")
    ComboBox2.AddItem ("Difícil Usinagem (4140)")
End Sub

```

```

'Apaga as opções dos combobox ao fechar o formulário
Private Sub UserForm_Deactivate()
    ComboBox1.RemoveItem ("")
    ComboBox1.RemoveItem ("Desbaste")
    ComboBox1.RemoveItem ("Acabamento")
    ComboBox2.RemoveItem ("")
    ComboBox2.RemoveItem ("Fácil Usinagem (1020)")
    ComboBox2.RemoveItem ("Difícil Usinagem (4140)")
End Sub

```

'Terraforma Prever Forças de Corte

Option Explicit

```

'Botão Home para voltar à página inicial
Private Sub CommandButton2_Click()
    Sheets("Home").Select
End Sub

```

'Ações ao abrir a tela de Prever Forças de Corte

```

Private Sub Worksheet_Activate()
    Dim i As Integer
    'Loop para limpar a tabela com os dados que geram o gráfico
    For i = 2 To 130
        Cells(i, 17).Value = ""
        Cells(i, 18).Value = ""
    Next i
    'Mostrar o formulário de forças de corte
    UserForm5.Show
End Sub

```

'Botão "Traçar Gráfico", que implementa o algoritmo

```

Private Sub CommandButton1_Click()
    'Declaração da variáveis e dos vetores
    Dim Fi(), Fx(), Fy(), Ft(), F(), Tc(), a() As Double
    Dim fip As Double
    Dim K As Double
    Dim L As Double
    Dim i As Integer
    Dim j As Integer
    Dim Kzinho As Integer
    Dim N As Integer
    Dim fi1 As Integer
    Dim fi2 As Integer
    Dim h As Double
    Dim deltaft As Double
    Dim deltafr As Double

```

```
Dim deltafx As Double
Dim deltafy As Double
```

'Leitura dos parâmetros de entrada do algoritmo

```
Cells(2, 14).Value = TextBox1.Value
Cells(3, 14).Value = TextBox2.Value
Cells(1, 14).Value = TextBox3.Value
Cells(6, 14).Value = TextBox4.Value
Cells(7, 14).Value = TextBox5.Value
Cells(8, 14).Value = TextBox6.Value
Cells(4, 14).Value = TextBox7.Value
Cells(5, 14).Value = TextBox8.Value
```

```
fip = 2 * 3.1415 / Cells(7, 14).Value
K = 2 * 3.1415 / Cells(9, 14)
L = Cells(1, 14).Value / Cells(10, 14).Value
```

'Para poder fazer estes procedimentos o K deve ser inteiro

```
ReDim Preserve Fi(1 To CInt(K))
ReDim Preserve Fx(1 To CInt(K))
ReDim Preserve Fy(1 To CInt(K))
ReDim Preserve Ft(1 To CInt(K))
```

'Implementação do algoritmo

```
For i = 1 To CInt(K)
```

```
    Fi(i) = Cells(4, 14).Value + i * Cells(9, 14).Value
```

```
    Fx(i) = 0
```

```
    Fy(i) = 0
```

```
    Ft(i) = 0
```

```
    N = Cells(7, 14).Value
```

```
    For Kzinho = 1 To N
```

```
        fi1 = (Kzinho - 1) * fip + Fi(i)
```

```
        fi2 = fi1
```

'Para poder fazer estes procedimentos o L deve ser inteiro

```
ReDim Preserve a(1 To CInt(L))
```

```
    For j = 1 To CInt(L)
```

```
        a(j) = j * Cells(10, 14).Value
```

```
        fi2 = fi1 - (2 * Tan(Cells(8, 14).Value) / Cells(6,
14).Value) * a(j)
```

```
If Cells(4, 14).Value <= fi2 <= Cells(5, 14).Value Then
```

```
    h = Cells(2, 14).Value * Sin(fi2)
```

```
    deltaft = Cells(10, 14).Value * (Cells(11,
```

```
14).Value * h + Cells(13, 14).Value)
```

```
    deltafr = Cells(10, 14).Value * (Cells(12,
```

```
14).Value * h + Cells(14, 14).Value)
```

```
    deltafx = -deltaft * Cos(fi2) - deltafr * Sin(fi2)
```

```
    deltafy = deltaft * Sin(fi2) - deltafr * Cos(fi2)
```

```

        Fx(i) = Fx(i) + deltafx
        Fy(i) = Fy(i) + deltafy
        Ft(i) = Ft(i) + deltaft
    End If
    Next j
    Next Kzinho
    Cells(i + 1, 17).Value = Fx(i)
    Cells(i + 1, 18).Value = Fy(i)
Next i
End Sub

```

'Botão "Limpar Tudo", que apaga os valores dos campos do formulário e gráfico

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```

    Dim i As Integer
    For i = 2 To 130
        Cells(i, 17).Value = ""
        Cells(i, 18).Value = ""
    Next i
    TextBox1.Value = ""
    TextBox2.Value = ""
    TextBox3.Value = ""
    TextBox4.Value = ""
    TextBox5.Value = ""
    TextBox6.Value = ""
    TextBox7.Value = ""
    TextBox8.Value = ""
End Sub

```

'Botão "Fechar", que fecha o formulário de inserção de dados

```
Private Sub CommandButton3_Click()
```

```

    Unload Me
End Sub

```

14 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

(Altintas, 2000) – ALTINTAS, Y. – **Manufacturing Automation – Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design**, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2000.

(Diniz, 1999) - DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. - **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, MM editora, São Paulo, Brasil, 1999.

(Halevi 1995) – HALEVI, G., WEILL, R. D. – **Principles of Process Planning – A logical approach**, Chapman & Hall, 1995.

(Jennrich, 1995) – JENRICH, R. I. – **“An Introduction to Computational Statistics – Regression Analysis”** - Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1995.

(Montgomery, 2001) - MONTGOMERY, D. C - **“Introduction to Statistical Quality Control”** , New York : Wiley, Fourth Edition, p. 572-615, c 2001.

(Stemmer, 1989) – STEMMER, C. E. – **Ferramentas de Corte**, Editora da UFSC, Florianópolis, Brasil, 2001.

(Sarhan, 2001) - SARHAN, A.; SAYED, R.; NASSR, A. A.; EL-ZAHRY, R. M. – **Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling** – Journal of Materials Processing Technology, number 109, 2001

(Araújo e Silveira, 2001) – Araújo, A. C., Silveira, J. L. – The Influence of Specific Cutting Force on End Milling Models, COBEM, 2001.

(Machining Data Handbook, 1980) – MACHINABILITY DATA CENTER, Volume 1, third edition, 1980.

(ISO8688-2) – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Tool life testing in milling – part 2: End milling – ISO 8688-2. Genève, 1989