Guilherme Cruz Rossi

**Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento
de Bordas de Chapas Utilizadas para a Fabricação de
Tubos de Aço com Costura**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica

São Paulo

2008

Guilherme Cruz Rossi

**Estudo das Forças de Corte no Processo de Fresamento
de Bordas de Chapas Utilizadas para a Fabricação de
Tubos de Aço com Costura**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Engenharia de Projeto de
Fabricação

Professor Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira
Batalha

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Rossi, Guilherme Cruz

**Estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura / G.C. Rossi. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
129 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Fresamento 2.Usinagem 3.Regressão linear múltipla 4.Dinamometria 5.Tubos de aço com costura.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

AGRADECIMENTOS

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

Ao Prof. Dr. Éd Cláudio Bordinassi pela ajuda imprescindível na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sérgio Delijaicov pelos importantes ensinamentos sobre o assunto e apoio na realização do trabalho.

À TenarisConfab que forneceu o material para a fabricação dos corpos-de-prova além de informações sobre o produto e o processo de fabricação de tubos de aço.

À Sandvik Coromant que forneceu as pastilhas para a realização dos ensaios.

Às equipes das oficinas mecânicas da Poli, da UniFEI e da Mauá que auxiliaram na fabricação do dinamômetro, corpos-de-prova e ensaios.

À minha noiva Lisiane que me apoiou durante todo o período de pesquisa, sempre compreensiva nos momentos de ausência.

Aos meus pais que tornaram tudo isso possível.

RESUMO

O propósito deste trabalho é estudar as forças de corte envolvidas no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura e como estas variam em função dos parâmetros de corte utilizados. O objetivo é correlacionar estas forças à qualidade do acabamento superficial das bordas usinadas, uma vez que esta é fundamental para a qualidade final da solda do tubo. Para isso, foi construído um dinamômetro de mesa para medição das forças, e os dados foram analisados através do Método da Regressão Linear Múltipla. Os resultados obtidos demonstraram que, tanto para a força de corte quanto para a rugosidade da superfície usinada, o parâmetro que mais influencia é o avanço por dente, seguido pela largura de corte, sendo que o que menos influencia é a velocidade de avanço. Estes resultados foram comprovados com êxito no processo industrial foco deste estudo através da medição da corrente elétrica dos motores dos eixos-árvore e da vibração dos mesmos.

Palavras-chave: *fresamento, usinagem, regressão linear múltipla, dinamometria, tubos de aço com costura.*

ABSTRACT

This work aims to study the cutting forces involved in the edge milling process for welded pipes manufacturing and how these forces vary due to the cutting parameters. The objective is to create a relationship between these forces and the surface roughness of the machined edges, once it's fundamental to the pipe weld quality. To do this, it was designed and manufactured a dynamometer, and the data was analyzed statistically by the Linear Multiple Regression Method. The results show that for the cutting forces as well as the surface roughness, the most significant parameter is the feed per tooth, followed by the cutting width and the feed speed. These results were successfully proven on the industrial process that is the focus of this study, through the spindle motors electric current and its vibration.

Key-words: *milling, machining, linear multiple regression, strain gage, welded pipes.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 - INTRODUÇÃO	14
2 – OBJETIVOS	15
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 – FRESAMENTO	18
3.1.1 – Tipos de Fresamento	19
3.1.2 - Movimentos da peça e da ferramenta	21
3.1.3 - Formação de Cavaco	22
3.1.4 - Principais falhas e desgaste da ferramenta de corte	24
3.2 – MECÂNICA DO PROCESSO DE FRESAMENTO	27
3.3 – RUGOSIDADE	32
3.3.1 – Definições de alguns parâmetros de rugosidade	33
3.3.2 – Rugosidade no Processo de Fresamento	36
3.4 – EXTENSÔMETROS (STRAIN GAGES)	38
3.4.1 - Princípios da extensometria elétrica	39
3.4.2 - Análise da resistência do condutor	41
3.4.3 - Características dos extensômetros elétricos	44
3.5 – INSTRUMENTAÇÃO	46
3.5.1 - Desempenho estático e dinâmico de instrumentos	48
3.6 – DINAMOMETRIA	51
3.7 - MÉTODO DA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	53
4 – PROJETO DO DINAMÔMETRO	57
5 – CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO	62
5.1 - ANÁLISE PRÉVIA	64
5.2 - PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	65
5.3 - MARCAÇÃO DAS LINHAS DE ORIENTAÇÃO	65
5.4 - COLAGEM	66
5.5 - IDA AO FORNO	67
6 – CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO	68
7 – ESTUDO DE CASO	80
7.1 - DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	81
7.2 - CORPOS-DE-PROVA E FERRAMENTAS	82
7.3 - ENSAIOS	84

7.4 - ANÁLISE DOS DADOS	103
7.5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	114
7.6 - APLICAÇÃO PRÁTICA DOS RESULTADOS	116
8 - CONCLUSÕES	126
9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
11 - ANEXOS	131
ANEXO 1 – MEMORIAL DE CÁLCULO CÉLULAS DE CARGA	131
ANEXO 2 – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO DINAMÔMETRO	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.2.1 – Movimento de corte – Adaptado de (Araújo e Silveira, 2001).....	21
Figura 3.2.1 – Geometria do Processo de Fresamento – adaptado de (Altintas, 2000).....	29
Figura 3.3.1.1 – Ilustração do parâmetro R_a	34
Figura 3.3.1.2 – Ilustração do parâmetro R_y	35
Figura 3.3.1.3 – Ilustração do parâmetro R_z	36
Figura 3.4.1.1 - Deformação específica.....	40
Figura 3.4.3.1 – Formas dos Strain Gages: Uniaxial (a); Bi-axial (b); Tri-axial (c) – Adaptado de (Dally, 1978).....	45
Figura 3.5.1 - Configuração de um instrumento.....	46
Figura 3.5.2 - Esquema de um medidor eletrônico de deformação.....	48
Figura 3.7.1 – Modelagem dos Experimentos.....	54
Figura 4.1 – (a) Anel para medição de forças; (b) Elemento anel para análise elástica – adaptado de (Cook e Rabinowicz, 1963).....	58
Figura 4.2 – Esquema de Montagem das Células de Carga no Dinamômetro.....	61
Figura 5.1 – Desenho de Conjunto do Dinamômetro.....	62
Figura 5.1.1 - Superfícies Seleccionadas para a Primeira Etapa.....	64
Figura 5.1.2 - Superfícies Seleccionadas para Primeira Etapa.....	64
Figura 5.2.1 - Conjunto de Células de Carga com Superfícies Preparadas.....	65
Figura 5.5.1 - Célula de Carga Pronta para Ir ao Forno.....	67
Figura 6.1 – Posição de aplicação das cargas de calibração.....	68
Figura 6.2 – Curvas de Calibração para Carregamento A1.....	71
Figura 6.3 – Curvas de Calibração para Carregamento A2.....	71
Figura 6.4 – Curvas de Calibração para Carregamento A3.....	72
Figura 6.5 – Curvas de Calibração para Carregamento A4.....	72
Figura 6.6 – Curvas de Calibração para Carregamento L1.....	75
Figura 6.7 – Curvas de Calibração para Carregamento L2.....	75
Figura 6.8 – Curvas de Calibração para Carregamento L3.....	76
Figura 6.9 – Curvas de Calibração para Carregamento L4.....	76
Figura 6.10 – Curvas de Calibração para Carregamento L5.....	77
Figura 6.11 – Curvas de Calibração para Carregamento L6.....	77
Figura 6.12 – Curvas de Calibração para Carregamento Axial.....	78
Figura 6.13 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (Y).....	78
Figura 6.14 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (X).....	79
Figura 7.1.1 – Diagrama das Variáveis de Entrada e Saída do Processo de Fresamento.....	81
Figura 7.2.1 – Porta-ferramentas e pastilhas.....	83
Figura 7.2.2 – Matéria-prima dos corpos-de-prova – Aço API 5L X80.....	83
Figura 7.3.1 – Forças de Corte Ensaio vf Replicação 1.....	85
Figura 7.3.2 – Espectro de frequências ensaio vf Replicação 1.....	85
Figura 7.3.3 – Forças de Corte Ensaio vf Replicação 2.....	86
Figura 7.3.4 – Espectro de frequências ensaio vf Replicação 2.....	86
Figura 7.3.5 – Forças de Corte Ensaio ae.vf Replicação 1.....	87
Figura 7.3.6 – Espectro de frequências ensaio ae.vf Replicação 1.....	87
Figura 7.3.7 – Forças de Corte Ensaio ae.vf Replicação 2.....	88
Figura 7.3.8 – Espectro de frequências ensaio ae.vf Replicação 2.....	88
Figura 7.3.9 – Forças de Corte Ensaio fz.vf Replicação 1.....	89
Figura 7.3.10 – Espectro de frequências ensaio fz.vf Replicação 1.....	89
Figura 7.3.11 – Forças de Corte Ensaio fz.vf Replicação 2.....	90
Figura 7.3.12 – Espectro de frequências ensaio fz.vf Replicação 2.....	90
Figura 7.3.13 – Forças de Corte Ensaio fz.ae.vf Replicação 1.....	91
Figura 7.3.14 – Espectro de frequências ensaio fz.ae.vf Replicação 1.....	91
Figura 7.3.15 – Forças de Corte Ensaio fz.ae.vf Replicação 2.....	92

Figura 7.3.16 - Espectro de frequências ensaio fz.ae.vf Replicação 2.....	92
Figura 7.3.17 – Forças de Corte Ensaio (1) Replicação 1	93
Figura 7.3.18 - Espectro de frequências ensaio (1) Replicação 1	93
Figura 7.3.19 – Forças de Corte Ensaio (1) Replicação 2	94
Figura 7.3.20 - Espectro de frequências ensaio (1) Replicação 2	94
Figura 7.3.21 – Forças de Corte Ensaio ae Replicação 1	95
Figura 7.3.22 - Espectro de frequências ensaio ae Replicação 1	95
Figura 7.3.23 – Forças de Corte Ensaio ae Replicação 2	96
Figura 7.3.24 - Espectro de frequências ensaio ae Replicação 2	96
Figura 7.3.25 – Forças de Corte Ensaio fz Replicação 1	97
Figura 7.3.26 - Espectro de frequências ensaio fz Replicação 1	97
Figura 7.3.27 – Forças de Corte Ensaio fz Replicação 2	98
Figura 7.3.28 - Espectro de frequências ensaio fz Replicação 2	98
Figura 7.3.29 – Forças de Corte Ensaio fz.ae Replicação 1	99
Figura 7.3.30 - Espectro de frequências ensaio fz.ae Replicação 1	99
Figura 7.3.31 – Forças de Corte Ensaio fz.ae Replicação 2	100
Figura 7.3.32 - Espectro de frequências ensaio fz.ae Replicação 2	100
Figura 7.3.33 – Detalhe de 2 rotações da ferramenta no Ensaio fz Replicação 1	101
Figura 7.4.1 – Efeito dos Parâmetros sobre a Força de Corte.....	103
Figura 7.4.2 – Efeito dos Parâmetros sobre a rugosidade (R_a).....	104
Figura 7.4.3 – Efeito dos Parâmetros sobre a rugosidade (R_y).....	104
Figura 7.4.4 – ANOVA da Força x avanço por dente.....	105
Figura 7.4.5 – Plotagem dos pontos de Força x avanço por dente.....	105
Figura 7.4.6 – ANOVA da Força x largura de corte	106
Figura 7.4.7 – Plotagem dos pontos de Força x largura de corte	106
Figura 7.4.8 – ANOVA da Força x velocidade de avanço	107
Figura 7.4.9 – Plotagem dos pontos de Força x velocidade de avanço.....	107
Figura 7.4.10 – ANOVA de R_a x avanço por dente	108
Figura 7.4.11 – Plotagem dos pontos de R_a x avanço por dente.....	108
Figura 7.4.12 – ANOVA de R_a x largura de corte	109
Figura 7.4.13 – Plotagem dos pontos de R_a x largura de corte	109
Figura 7.4.14 – ANOVA de R_a x velocidade de avanço.....	110
Figura 7.4.15 – Plotagem dos pontos de R_a x velocidade de avanço	110
Figura 7.4.16 – ANOVA de R_y x avanço por dente.....	111
Figura 7.4.17 – Plotagem dos pontos de R_y x avanço por dente	111
Figura 7.4.18 – ANOVA de R_y x largura de corte	112
Figura 7.4.19 – Plotagem dos pontos de R_y x largura de corte.....	112
Figura 7.4.20 – ANOVA de R_y x velocidade de avanço.....	113
Figura 7.4.5 – Plotagem dos pontos de R_y x velocidade de avanço	113
Figura 7.6.1 – Ensaio 1.....	117
Figura 7.6.2 – Ensaio 2.....	118
Figura 7.6.3 – Ensaio 3.....	118
Figura 7.6.4 – Ensaio 4.....	119
Figura 7.6.5 – Ensaio 5.....	119
Figura 7.6.6 – Ensaio 6.....	120
Figura 7.6.7 – Ensaio 7.....	120
Figura 7.6.8 – Ensaio 8.....	121
Figura 7.6.9 – Ensaio 9.....	121
Figura 7.6.10 – Ensaio 10.....	122
Figura 7.6.11 – Ensaio 11.....	122
Figura 7.6.12 – Ensaio 12.....	123
Figura 7.6.13 – Resultados da Análise de Vibração.....	123
Figura 11.1.1 – Esquema Célula de Carga.....	131

<i>Figura 11.1.2 – Ligação em Ponte.....</i>	<i>131</i>
--	------------

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1.1 – Comparação entre tipos de fresamento.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 6.1 – Dados de calibração carregamento A1.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6.2 – Dados de calibração carregamento A2.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6.3 – Dados de calibração carregamento A3.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.4 – Dados de calibração carregamento A4.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.5 – Dados de calibração carregamento L1.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.6 – Dados de calibração carregamento L2.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.7 – Dados de calibração carregamento L3.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.8 – Dados de calibração carregamento L4.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 6.9 – Dados de calibração carregamento L5.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 6.10 – Dados de calibração carregamento L6.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 7.3.1 – Ensaios Realizados.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 7.3.2 – Forças de Corte.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 7.3.3 – Rugosidade da Superfície Usinada (R_a).....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 7.3.4 – Rugosidade da Superfície Usinada (R_y).....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 7.6.1 – Arranjo Experimental.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabela 7.6.2 - Resultados dos ensaios de comprovação.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 7.6.3 - % Carga dos Motores dos Cabeçotes.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 7.6.4 – Vibração dos Cabeçotes.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 7.6.5 – Variabilidade dos resultados.....</i>	<i>125</i>

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 Força específica de corte.....	[N/mm ²]
h : Espessura do cavaco.....	[mm]
d : Diâmetro da ferramenta.....	[mm]
λ : Ângulo de hélice.....	[°]
a : Profundidade de corte.....	[mm]
a_e : Largura de corte.....	[mm]
Z : Número de dentes.....	[-]
R_a : Rugosidade Média.....	[μm]
R_y : Rugosidade medida entre picos e vales.....	[μm]
f_z : Avanço por dente.....	[mm/volta*aresta]
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]
F_z : Força de Corte na direção axial da ferramenta.....	[N]
v_{cmax} : Velocidade de Máxima Produção.....	[m/min]
t_t : Tempo Total de Confeção.....	[min]
t_{ft} : Tempo de Troca de Ferramental.....	[min]

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a qualidade dos produtos é uma das características mais importantes a se levar em conta nos processos de fabricação. Neste sentido, tanto para projetar estes produtos quanto as máquinas-ferramenta que irão produzi-los, é muito importante conhecer a magnitude das forças envolvidas no processo.

Além disso, é importante conhecer as correlações existentes entre estas forças de corte e os parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço, para que estes possam ser selecionados da melhor maneira possível para cada tipo de operação. Outra variável de saída destas operações é o acabamento superficial, o qual define muitas vezes a qualidade final da peças usinadas, e a necessidade ou não de operações subseqüentes. Muitas vezes o acabamento superficial também é fator limitante tecnologicamente para um processo, como é o caso do processo que será analisado neste trabalho.

Para se realizar a monitoração da força de corte nos processos de usinagem, existem diversos métodos, sendo que alguns deles estão descritos abaixo:

- Emissão Acústica
- Potência elétrica consumida
- Extensômetros (resistivos, piezo-resistivos, piezoelétricos, etc)

Neste contexto, a redução do tempo de ciclo de um equipamento é importante à medida que proporciona um aumento na produtividade do mesmo. Porém, este aumento de produtividade não pode ser realizado comprometendo os custos ou a qualidade do processo. Assim, sempre que se deseja aumentar a produtividade de um equipamento, deve-se realizar um estudo para identificação dos parâmetros que menos influenciam no custo e na qualidade.

2 – OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a construção de um dinamômetro de mesa para a medição dos esforços de usinagem numa operação de fresamento. Este dinamômetro tem seu funcionamento baseado em células de carga montadas com sensores do tipo “Strain Gages” (extensômetros), o que torna possível medir os esforços de corte em 3 direções ortogonais (Cook e Rabinowicz, 1963).

De posse do dinamômetro projetado e construído, serão feitos estudos para correlacionar as forças de corte, os parâmetros de corte e a rugosidade da superfície usinada, através de técnicas de Regressão Linear Múltipla. Esta técnica será utilizada devido à sua fácil aplicação. Para tanto, os dados contidos no intervalo de análise devem ser contínuos e monotônicos. A força de corte será analisada em termos da força resultante de corte, enquanto a rugosidade da superfície usinada será analisada em termos de acabamento superficial da peça.

Os dados serão analisados com o objetivo de otimizar o tempo de ciclo de uma fresadora de bordas de chapas utilizadas para a fabricação de tubos de aço com costura da TenarisConfab, em Pindamonhangaba, São Paulo.

Segundo (Diniz, 2006), para se obter a maior produtividade num processo de corte, deve-se utilizar a velocidade de corte de máxima produção (v_{cmaxp}), na qual o tempo total de confecção de uma peça (t_t) é mínimo. Porém, segundo o mesmo, esta velocidade é dependente da velocidade de troca de ferramental (t_{ft}), assim, é importante não deixarmos de nos preocupar com a vida da ferramenta, pois a mesma influencia não somente os custos de produção, mas também a produtividade em si.

Desta forma, o processo de corte será analisado para que sejam identificadas as variáveis que, quando alteradas para ganho de produtividade, aumentem menos as forças de corte, e que indiretamente estarão impactando menos a vida da ferramenta.

As variáveis analisadas serão a velocidade de avanço (v_f), que está diretamente ligada à produtividade do processo, o avanço por dente (f_z), que está diretamente ligado à capacidade do equipamento, e a largura de corte (a_e), que está diretamente ligada ao produto.

Além de servir como ferramenta para os estudos da força de corte num processo de fresamento, o dinamômetro será utilizado também nas aulas de graduação da Escola Politécnica da USP, que não possui nenhum equipamento semelhante.

O projeto se divide nas seguintes etapas:

Construção do Dinamômetro:

- Pesquisa bibliográfica para aquisição dos conhecimentos necessários para o desenvolvimento do dinamômetro.
- Projeto do Dinamômetro.
- Construção do dinamômetro.
- Levantamento das Curvas de Calibração do dinamômetro.

Estudo de Caso (TenarisConfab):

- Delineamento Experimental.
- Realização de ensaios para estudo das forças de corte no processo de fresamento de bordas de chapas utilizadas para fabricação de tubos de aço com costura.
- Análise estatística dos dados de força e acabamento superficial obtidos.
- Resultados e conclusões.

A organização deste trabalho foi elaborada na forma dos seguintes capítulos:

No capítulo 1, procurou-se expor a motivação deste trabalho, do ponto de vista do ganho de produtividade nos processos de usinagem, além de algumas técnicas para a monitoração das variáveis envolvidas neste processo.

No capítulo 2, foram apresentados os objetivos do trabalho, divididos em duas etapas (Construção do Dinamômetro e Estudo de Caso), além de ser apresentada a metodologia que seria utilizada para se atingir os mesmos.

No capítulo 3, procurou-se fazer uma revisão bibliográfica do processo de fresamento sob o ponto de vista dos tipos de operação, dos movimentos da peça e da ferramenta, da formação de cavaco, das principais falhas e desgastes das ferramentas, da mecânica do processo, da rugosidade da superfície usinada, dos *strain gages* utilizados para medição das forças de corte, da instrumentação do dinamômetro e do Método da Regressão Linear Múltipla utilizada para analisar os resultados.

Nos capítulos 4 e 5, procurou-se demonstrar os cálculos, procedimentos e critérios envolvidos no projeto e na fabricação do dinamômetro.

No capítulo 6, demonstrou-se o procedimento de calibração estática do dinamômetro, assim como os erros envolvidos provenientes do processo de fabricação do mesmo. Ao final do capítulo, foram apresentadas as equações obtidas para corrigir estes erros.

No capítulo 7, foi apresentado o estudo de caso que motivou os experimentos realizados com o dinamômetro. Foram apresentados os resultados obtidos através da medição das forças de corte e da rugosidade da superfície usinada, assim como a discussão destes resultados. Ao final, foi realizada uma verificação prática destes resultados, no próprio equipamento fruto do estudo, sendo que os mesmos foram comprovados.

Já no capítulo 8, foram apresentadas as conclusões obtidas através da realização das duas etapas do trabalho.

Por fim, no capítulo 9, procurou-se apresentar algumas sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos no sentido de aumentar a produtividade e a qualidade do processo de fresamento de bordas de chapas, além da redução de seu custo.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – *Fresamento*

Segundo (**Sandvik, 2005**), o fresamento é basicamente o corte de metais com uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte que executa movimentos programados sobre uma peça em quase todos os sentidos de direção. Já segundo (**Diniz, 2006**), o fresamento é a operação de usinagem que tem as seguintes características:

- A ferramenta, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo.
- O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo.
- O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas.

Dessas definições, pode-se concluir que o movimento de avanço pode ser realizado tanto pela peça quanto pela fresa; o que irá definir é a construção da máquina-ferramenta que está sendo utilizada para o processo.

Segundo a disposição dos dentes ativos da fresa, pode-se classificar a operação em:

- Fresamento tangencial: os dentes ativos se encontram na superfície cilíndrica da ferramenta; o eixo da fresa fica paralelo à superfície usinada.
- Fresamento frontal ou de topo: os dentes ativos se encontram na superfície frontal da ferramenta; o eixo da fresa fica perpendicular à superfície usinada.

3.1.1 – Tipos de Fresamento

Segundo o sentido de fresamento, podemos classificar as operações em:

Fresamento concordante ou "para baixo" (down milling): o sentido de avanço da peça é o mesmo da rotação da fresa na área de corte; a espessura do cavado vai diminuindo desde o início do corte (Sandvik, 2005). Ainda segundo (Diniz, 2006), é aquele onde o ângulo entre a linha radial que passa pelo ponto de contato aresta-peça e uma outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco formado (h) é zero, ângulo ϕ , começa em um valor máximo e decresce até zero.

O **fresamento concordante** tem as seguintes vantagens:

- Força de corte força a peça contra a mesa (no fresamento discordante a força de corte tende a levantar a peça. Isto faz com que peças delgadas percam seu apoio na mesa ou vibrem).
- Vida mais longa da ferramenta (menor desgaste).
- Melhor acabamento superficial.
- Menor força e potência para o avanço.

Apesar destas vantagens, o **fresamento concordante** tem as seguintes desvantagens, ou situação onde não poderá ser usado:

- Quando ocorre folga entre o fuso e a castanha de comando do avanço da mesa da fresadora. No fresamento concordante a força de corte puxa a peça para baixo da fresa numa magnitude proporcional à folga, gerando um cavaco mais espesso do que o predito para o avanço programado. Esta força de corte excessiva pode provocar quebra dos dentes ou insertos (pastilhas). No caso do fresamento discordante, as forças de corte se opõem à força de avanço, eliminando a folga em sistemas de avanço menos rígidos.

- O fresamento concordante não deve ser usado quando a superfície da peça tiver resíduos de areia (desmoldados de fundição em molde de areia), escamas ou grandes irregularidades (carepa de laminação ou cascas ou droses de fundição). Nestes casos, o fresamento discordante é mais vantajoso, por permitir que a aresta de corte da fresa penetre abaixo desta camada superficial indesejável e evitar o seu efeito desfavorável sobre a vida da fresa.

Fresamento discordante ou "para cima" (up milling): o sentido de avanço da peça é oposto ao da rotação da fresa na área de corte; a espessura do cavaco começa em zero e vai aumentando até o final do corte (**Sandvik, 2005**). Só depois que a espessura de corte atinge certo valor e que se ultrapassa o limite de deformação elástica, entrando no domínio da deformação plástica por cisalhamento, é que se inicia efetivamente o processo de corte do cavaco. Como resultado, a aresta de corte da fresa escorrega sobre a peça, provocando um desgaste abrasivo. O material inicial é mais duro em função do encruamento produzido pelo dente (faca) precedente. Isto determina uma vida menor das arestas no fresamento discordante. Há tendência de caldeamento (solda fria ou desgaste por aderência) dos cavacos sobre a aresta e superfícies de saída (aresta postiça de corte). Ainda segundo (**Diniz, 2006**), é aquele onde o ângulo ϕ cresce de zero a um valor máximo.

No caso do eixo da fresa interceptar o material da peça, têm-se simultaneamente, fresamento concordante e discordante. Este fresamento combinado ocorre na maioria dos processos de fresamento de topo.

Em resumo, podemos fazer uma comparação entre os tipos de fresamento na tabela a seguir:

Tabela 3.1.1 – Comparação entre tipos de fresamento

<i>Característica</i>	<i>Fresamento Concordante</i>	<i>Fresamento Discordante</i>
Peças Delgadas (vibração)	Menos	mais
Espessura de corte	Positiva	negativa
Desgaste da ferramenta	Menor	maior
Potência de corte	Menor	maior

3.1.2 - Movimentos da peça e da ferramenta

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

- Movimento de corte: segundo (**Stemmer, 1989**), é 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. Segundo (**Diniz, 2006**), sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou curso da ferramenta.

Figura 3.1.2.1 – Movimento de corte – Adaptado de (Araújo e Silveira, 2001)

- Velocidade de corte (v_c): segundo (**Stemmer, 1989**), é a velocidade instantânea do movimento principal de um ponto selecionado no gume, em relação à peça. Segundo (**Diniz, 2006**), é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, em operações onde os movimentos de corte e avanço ocorrem concomitantemente, como é o caso do fresamento.

- Movimento de avanço: (Stemmer, 1989) e (Diniz, 2006), 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, geralmente consiste na movimentação da mesa da fresadora.
- Velocidade de avanço (v_f): segundo (Stemmer, 1989), é a velocidade instantânea do movimento de avanço num ponto selecionado no gume, em relação à peça. Ainda segundo (Diniz, 2006), é o produto do avanço (percurso de avanço em cada volta da ferramenta) pela rotação da ferramenta.
- Movimento efetivo de corte: segundo (Stemmer, 1989) e (Diniz, 2006), é a resultante entre os movimentos de corte e de avanço. É ainda o movimento entre a ferramenta e a peça a partir do qual resulta o processo de usinagem.
- Velocidade efetiva de corte (v_e): segundo (Stemmer, 1989) é a 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.

3.1.3 - Formação de Cavaco

Segundo (Stemmer, 1989), 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.

Segundo (**Diniz, 2006**), a formação do cavaco influencia diversos fatores ligados à usinagem, tais como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado, a penetração do fluido de corte, etc. Em geral, a formação do cavaco nas condições normais de usinagem, se processa da seguinte forma:

- Uma pequena porção do material (ainda solidária à peça) é recalcada (deformações elástica e plástica) contra a superfície de saída da ferramenta.
- Esta deformação plástica aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, a ponto de se iniciar um deslizamento (sem perda de coesão) entre o material recalcado e a peça.
- Continuando a penetração da ferramenta, haverá uma ruptura (cisalhamento) parcial ou completa do cavaco, acompanhando o plano de cisalhamento já citado anteriormente e dependendo da ductilidade do material e das condições de usinagem.
- Por fim, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Este fenômeno é contínuo, sendo que neste momento uma nova porção do material está se formando e cisalhando.

Os cavacos podem ser classificados de diversas maneiras. Abaixo segue uma das propostas existentes:

- Cavaco contínuo – segundo (**Stemmer, 1989**), 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 consome menos energia. Ainda segundo (**Diniz, 2006**), apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua, sendo que a distinção entre as lamelas não é nítida; forma-se na usinagem de materiais dúcteis, onde o ângulo de saída deve assumir valores elevados.

- Cavaco cisalhado – segundo **(Stemmer, 1989)**, enquanto o cavaco escorrega ao longo do plano de cisalhamento, esta 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 o mesmo rompe. Isso gera vibrações prejudiciais à máquina e que levam a um acabamento superficial pior.
- Cavaco arrancado – segundo **(Stemmer, 1989)**, é o que se produz na usinagem de materiais frágeis. São pequenos fragmentos gerados por ruptura. Frequentemente, o material é arrancado abaixo da superfície usinada, sendo que para evitar essa possibilidade devem-se usar ferramentas muito bem afiadas e avanços pequenos. Ainda segundo **(Diniz, 2006)**, apresenta-se constituído de fragmentos arrancados da peça usinada; a superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida, assim como a ação do atrito; o ângulo de saída deve assumir valores baixos, nulos ou negativos.

3.1.4 - Principais falhas e desgaste da ferramenta de corte

As principais formas de desgaste e avarias da ferramenta são:

- Desgaste de flanco – segundo **(Stemmer, 1989)**, é a faixa desgastada no flanco da ferramenta. Geralmente é usado como critério de fim de vida da ferramenta. Ainda segundo **(Diniz, 2006)**, ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte.
- Desgaste de Cratera ou Crateramento – segundo **(Stemmer, 1989)**, concavidade que se forma na superfície de saída da ferramenta, devido ao atrito do cavaco com a ferramenta. Pode levar à quebra da ferramenta. Ainda segundo **(Diniz, 2006)**, pode não ocorrer em alguns processos de usinagem, principalmente

quando se utiliza ferramentas de metal duro recobertas, ferramentas cerâmicas e quando o material da peça é frágil.

- Deformação plástica – segundo **(Diniz, 2006)**, é um tipo de avaria da ferramenta, na qual a pressão aplicada à ponta da ferramenta, somada à alta temperatura, gera deformação plástica da aresta de corte, que com o tempo pode levar à quebra da ferramenta. É evitada pelo emprego de uma ferramenta com maior dureza à quente e maior resistência à deformação plástica, ou pela mudança das condições de usinagem e/ou geometria da ferramenta, visando à diminuição dos esforços e temperatura de corte.
- Lascamento da aresta de corte – segundo **(Stemmer, 1989)**, é um tipo de avaria devido a solicitações mecânicas ou térmicas da aresta de corte que causam a quebra de pedaços da aresta. Produz superfícies ásperas e irregulares. Ainda segundo **(Diniz, 2006)**, ocorrem principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada.
- Trincas de origem térmica – segundo **(Diniz, 2006)**, é um tipo de avaria que surge devido ao grande gradiente de temperaturas existente na zona de corte (ocorrem perpendicularmente à aresta de corte) e/ou pela variação dos esforços mecânicos (ocorrem paralelamente à aresta de corte). Os fatores que geram estes gradientes são: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, variação da espessura de corte e solda da pastilha no porta-ferramentas. Podem ser evitadas escolhendo-se uma ferramenta mais tenaz, diminuindo o avanço por dente e posicionando a fresa corretamente em relação à peça.
- Aresta postiça de corte – segundo **(Stemmer, 1989)**, é 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.

Os mecanismos que levam a estes tipos de desgaste e avarias são os seguintes:

- 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.

3.2 – Mecânica do processo de Fresamento

Segundo (Altintas, 2000), no processo de fresamento, a espessura instantânea do cavaco h varia periodicamente como função da imersão da ferramenta variável com o tempo. A variação da espessura do cavaco pode ser aproximada por:

$$h(\phi) = f_z \sin \phi \quad (1)$$

Onde f_z é o avanço por dente (mm/volta-dente) e ϕ é o ângulo instantâneo de imersão. O ângulo de hélice será considerado igual a zero, que é o caso de operações de fresamento de topo com insertos. As forças de corte tangencial ($F_t(\phi)$), radial ($F_r(\phi)$) e axial ($F_a(\phi)$) são expressas como função da área variável do cavaco ($ah(\phi)$) e do comprimento da borda de contato (a):

$$\begin{cases} F_t(\phi) = K_{tc} ah(\phi) + K_{te} a \\ F_r(\phi) = K_{rc} ah(\phi) + K_{re} a \\ F_a(\phi) = K_{ac} ah(\phi) + K_{ae} a \end{cases} \quad (2)$$

Onde K_{tc} , K_{rc} e K_{ac} são os coeficientes de força de corte devido à ação de corte nas direções tangencial, radial e axial, respectivamente, e K_{te} , K_{re} e K_{ae} são as constantes de borda. Assumindo como zero o raio de ponta e o ângulo de aproximação nos insertos, as componentes axiais da força de corte se tornam zero ($F_a = 0$). Os coeficientes de corte são admitidos constantes para um par ferramenta – peça, e podem ser estimados tanto mecanisticamente a partir de

ensaios de fresamento quanto utilizando transformações de corte oblíquo clássicas, dadas pelas equações encontradas em **(Altintas, 2000)**.

A espessura média do cavaco por volta é calculada a partir da zona usinada como:

$$h_a = \frac{\int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} f_z \sin \phi \cdot d\phi}{\phi_{ex} - \phi_{st}} = -f_z \frac{\cos \phi_{ex} - \cos \phi_{st}}{\phi_{ex} - \phi_{st}} \quad (3)$$

O torque de corte instantâneo (T_c) no eixo-árvore é:

$$T_c = F_t \frac{D}{2} \quad (4)$$

Onde D é o diâmetro da fresa. As componentes da força de corte horizontal (isto é, de avanço), normal e axial atuantes na ferramenta são derivadas do diagrama de equilíbrio mostrado na figura a seguir:

Figura 3.2.1 – Geometria do Processo de Fresamento – adaptado de (Altintas, 2000)

$$\begin{cases} F_x(\phi) = -F_t \cos \phi - F_r \sin \phi \\ F_y(\phi) = +F_t \sin \phi - F_r \cos \phi \\ F_z(\phi) = F_a \end{cases} \quad (5)$$

Deve ser notado que as forças de corte somente são produzidas quando a ferramenta está na zona de corte, o que significa:

$$F_x(\phi), F_y(\phi), F_z(\phi) > 0 \xrightarrow{\text{quando}} \phi_{st} \leq \phi \leq \phi_{ex} \quad (6)$$

Onde ϕ_{st} e ϕ_{ex} são os ângulos de entrada e saída da ferramenta, respectivamente. Outro ponto importante é que pode existir mais de um dente cortando o material simultaneamente, dependendo do número de dentes da ferramenta e da profundidade radial do corte. O ângulo de espaçamento entre dentes ϕ_p (ou ângulo de passo da ferramenta), é dado por:

$$\phi_p = \frac{2\pi}{N} \quad (7)$$

Onde N é o número de dentes da ferramenta. Haverá mais de um dente cortando simultaneamente quando o ângulo de varredura ($\phi_s = \phi_{ex} - \phi_{st}$) é maior do que o ângulo de passo da ferramenta (isto é, $\phi_s > \phi_p$). Quando mais de um dente corta simultaneamente, a contribuição de cada dente para a força total de avanço e normal deve ser considerada. Deve ser notado também que desde que cada dente está afastado de seus vizinhos pelo ângulo de passo, a espessura do cavaco removido por cada aresta de corte será diferente dada uma posição instantânea da ferramenta. Podem-se formular as forças totais de avanço, normal e axial como:

$$F_x = \sum_{j=1}^N F_{xj}(\phi_j), F_y = \sum_{j=1}^N F_{yj}(\phi_j), F_z = \sum_{j=1}^N F_{zj}(\phi_j) \quad (8)$$

Sempre que $\phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex}$. Cada termo na somatória representa a contribuição de cada dente na força de corte. Se o dente j está fora da zona de imersão, não irá contribuir para a força total de corte. A força de corte resultante na ferramenta (ou na peça) é dada por:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (9)$$

O torque instantâneo de corte no eixo-árvore é:

$$T_c = \frac{D}{2} \sum_{j=1}^N F_{ij}(\phi_j) \longrightarrow \phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex} \quad (10)$$

Onde D é o diâmetro da ferramenta. A potência de corte (P_t) requerida do motor é:

$$P_t = V \sum_{j=1}^N F_{ij}(\phi_j) \longrightarrow \phi_{st} \leq \phi_j \leq \phi_{ex} \quad (11)$$

Onde $V = \pi Dn$ é a velocidade de corte e n é a rotação do eixo.

3.3 – Rugosidade

A medição da rugosidade merece um cuidado especial que muitas vezes não é despendido em detrimento de outras grandezas envolvidas (Teses.USP, 2005). Os parâmetros de rugosidade escolhidos muitas vezes são uma caracterização incompleta do perfil ou superfície que se deseja estudar. Por se tratarem de valores numéricos provenientes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais destas superfícies, estão sujeitos a diversos erros de medição e interpretação. No entanto, são valores extremamente úteis na comparação entre superfícies.

A rugosidade, ou o perfil linear de uma superfície que é designado por este nome, é normalmente representado em escalas (de ampliação ou redução) distintas para as direções vertical e horizontal. Isso para evidenciar a mudança de perfil de maior interesse para a análise de uma superfície, já que as escalas de variação para as direções perpendiculares a superfície analisada são, em geral, menores que as para direções paralelas à superfície.

Desta forma, como em grande parte das vezes deseja-se saber mais sobre a variação do perfil perpendicular à superfície, é comum ampliar as variações de um perfil de rugosidade nesta direção, e em uma escala menor de ampliação as variações na direção paralela à superfície.

Assim sendo, muitas das representações referentes à rugosidade de um perfil podem levar a uma interpretação incorreta, caso não se considere este fato ao analisá-las. Além deste possível erro de compreensão, outros erros de distorção da informação de rugosidade podem ocorrer, geralmente, ligados ao instrumento de medição. No caso dos apalpadores, podem ocorrer erros ligados à carga aplicada e ao raio de ponta do mesmo.

Para evitar este tipo de erro, podem ser utilizados equipamentos ópticos, sendo que estes não necessitam de contato com a superfície analisada. Porém, por sua vez, este tipo de equipamento tem praticidade reduzida, uma vez que geralmente devem ser

utilizados em laboratório, além de possuírem limitações ligadas à sua distância focal, principalmente no caso das superfícies mais irregulares.

3.3.1 – Definições de alguns parâmetros de rugosidade

A rugosidade média, denominada R_a , é possivelmente o conceito mais antigo de rugosidade ainda em uso. Sua disseminação pode ser atribuída à sua facilidade de cálculo, mesmo com aparelhos analógicos simples. Sua definição pode ser expressa como o desvio médio de um perfil de sua linha média. Outra boa definição seria a distância média de um perfil desde sua linha média, sobre um comprimento medido. Matematicamente, a expressão é a seguinte:

$$R_a = \frac{l}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (12)$$

Um exemplo gráfico deste parâmetro pode ser visto na figura a seguir:

Figura 3.3.1.1 – Ilustração do parâmetro R_a

Este parâmetro de rugosidade tem a desvantagem de não esclarecer ou caracterizar a variabilidade dos diferentes valores locais da rugosidade sobre o perfil analisado.

Outro conceito amplamente difundido é o espaçamento médio entre picos (S_m). Sua definição é aceita como o comprimento medido sobre a quantidade de picos contados (D). A definição de pico é como o maior ponto registrado entre dois cruzamentos da linha média do perfil. Pode ser definido matematicamente da seguinte maneira:

$$S_m = \frac{l_m}{D} \quad (13)$$

Este parâmetro é utilizado amplamente em indústrias de chapas metálicas, por designar uma condição que afeta diretamente a aparência, a função e a conformabilidade deste produto acabado.

Já o parâmetro R_y , ou profundidade de polimento, é definido como sendo a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo, dentro de um comprimento medido de um perfil de rugosidade. A figura a seguir ilustra um exemplo deste parâmetro:

Figura 3.3.1.2 – Ilustração do parâmetro R_y

O parâmetro R_y tem vantagens e desvantagens: é um verdadeiro indicador da distância máxima de picos e vales de um comprimento medido. Contudo, o pico mais alto pode estar no início do perfil analisado, enquanto o vale mais profundo pode estar no final deste perfil. Assim, estas duas ocorrências estão muito pouco correlacionadas, e o parâmetro R_y registrado pode transmitir uma idéia incorreta sobre a superfície. Para evitar tais situações, há outro parâmetro de rugosidade semelhante ao R_y , o R_z . De acordo com a norma ISO 4287, o parâmetro R_z é a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos, dentro de um comprimento medido, ou:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i \right) \quad (14)$$

Graficamente, o R_z pode ser representado como a seguir:

Figura 3.3.1.3 – Ilustração do parâmetro R_z

Juntos, os parâmetros R_y e R_z fornecem uma idéia mais clara para a monitoração da variação do acabamento superficial em um processo de fabricação. Valores similares de R_y e R_z indicam um acabamento superficial consistente de um processo de fabricação, enquanto que diferenças significativas destes dois indicam defeitos superficiais quando se deseja uma superfície consistente.

R_z isoladamente pode ser considerado mais sensível a mudanças no acabamento superficial que R_a , por exemplo. Isso porque somente alturas máximas de perfis, e não suas médias, são comparadas e analisadas.

3.3.2 – Rugosidade no Processo de Fresamento

Segundo (Diniz, 2006), o fresamento tangencial produz uma superfície ondulada, sendo que a desta ondulação define a rugosidade máxima teórica. Esta rugosidade é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$R_{\max teor} = \frac{f_z^2}{4D} \quad (15)$$

onde:

f_z = avanço por dente (mm)

D = diâmetro da fresa (mm)

No entanto, a rugosidade real é sempre maior ou igual à teórica, devido aos seguintes fatores:

- Posicionamento irregular das pastilhas no sentido radial (deformação no encosto das pastilhas, tolerância dimensional das pastilhas).
- Desgaste não-uniforme das arestas de corte.
- Fluxo de saída de cavacos irregular.
- Excentricidade do eixo-árvore.
- Vibrações geradas pela falta de fixação e/ou rigidez da peça.

Pode-se comparar este valor de rugosidade máxima com o valor de R_y , que é a distância entre o pico mais alto e o vale mais baixo de um perfil, conforme visto anteriormente nesta seção.

3.4 – Extensômetros (*Strain Gages*)

Na sua forma mais completa, extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor, depositado então sobre uma base isolante. Este é então colado sobre a estrutura em teste com auxílio de adesivos como epóxi ou cianoacrilatos. Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao *strain gage*, que transforma essas variações em outras equivalentes de sua resistência elétrica (por esta razão, os *strain gages* são definidos como transdutores).

Segundo (Dally, 1978), algumas das características comumente usadas para julgar a adequação de um *strain gage* para uma aplicação em particular são as seguintes:

- A constante de calibração para o extensômetro deve ser estável; não deve variar com o tempo ou temperatura.
- O extensômetro deve ser capaz de medir deformações com uma precisão de $\pm 1 \mu\text{m/m}$ em um range de deformação de 10%.
- O tamanho do extensômetro (comprimento e largura) deve ser pequeno para que se possa fazer uma aproximação adequada da deformação em um ponto.
- A resposta do extensômetro, controlada principalmente por sua inércia, deve ser suficiente para permitir a gravação de deformações dinâmicas.
- O sistema do extensômetro deve permitir leitura de dados local ou remota.
- A saída do extensômetro durante a leitura de dados deve ser independente da temperatura ou outros parâmetros ambientais.
- A aquisição do extensômetro e de seus equipamentos auxiliares deve ser economicamente viável.

- O sistema do extensômetro não deve envolver instalações e técnicas operacionais muito complexas.
- O extensômetro deve exibir uma resposta linear com a deformação.
- O extensômetro deve servir como elemento sensor primário em outros transdutores onde grandezas desconhecidas, assim como a pressão, são medidas em função da deformação.

Os extensômetros elétricos apresentam algumas características que o diferenciam no momento da escolha, sendo que as que mais se destacam são: a boa precisão e linearidade, fácil instalação, ampla faixa de temperatura, pequeno, leve, barato, possibilita realizar medidas à distância, excelente resposta estática e dinâmica além de ser aplicável mesmo sob condições severas.

A seleção do *strain gage* apropriado para determinada aplicação é influenciada pelas seguintes características: objetivo (tipo) da medição, o material aonde será colado, dimensões do *strain gage*, precisão, potência que o *strain gage* pode dissipar, material da grade metálica e sua construção, material do suporte isolante, material do adesivo, tratamento e proteção do medidor e configuração.

Os extensômetros possuem um baixo e previsível efeito térmico, onde uma simples compensação e métodos de correção permitem uma operação de precisão em altas taxas de temperatura.

3.4.1 - Princípios da extensometria elétrica

Ao analisar o comportamento elétrico dos fios metálicos energizados, submetidos a esforços mecânicos de tração, Kelvin, em 1856, obteve as seguintes conclusões (Almeida, 1996):

A resistência elétrica do fio muda em função da deformação (alongamento ou encurtamento):

Figura 3.4.1.1 - Deformação específica

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (16)$$

e

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{\Delta L}{L} \quad (17)$$

ou seja,

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (18)$$

ou

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon \quad (19)$$

Os materiais têm sensibilidades diferentes (K)

- Níquel/Cobre $K \approx 2,1$
- Tungstênio/Platina $K \approx 4,0$

É necessário utilizar um circuito elétrico com boa amplificação para determinar a variação de resistência elétrica do fio. Neste caso foi recomendado o circuito da ponte de Wheatstone. Este circuito foi publicado em 1848, por Charles Wheatstone.

3.4.2 - Análise da resistência do condutor

- Resistência do condutor (Kelvin)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (20)$$

ou

$$R = \rho \left(\frac{4}{\pi D^2} \right) L \quad (21)$$

onde:

R= resistência elétrica do condutor (Ω);

ρ = resistividade, em $\Omega \cdot m$;

A= área, em m^2 ;

L= comprimento, em m.

A mudança de resistência é encontrada pela diferencial da função R, considerando ρ , L e D como variáveis. Além disso, todas as variáveis são consideradas lineares:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial D} dD + \frac{\partial R}{\partial L} dL \quad (22)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \rho} = \left(\frac{4}{\pi D^2} \right) L \quad (23)$$

$$\frac{\partial R}{\partial L} = \rho \left(\frac{4}{\pi D^2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{\partial R}{\partial D} = \frac{4}{\pi} \rho L \frac{\partial}{\partial D} \left(\frac{1}{D^2} \right) = \rho L \frac{4}{\pi} \frac{-2D}{D^4} = -\rho L \frac{8}{\pi} \frac{1}{D^3} \quad (25)$$

Desse modo:

$$dR = \left(\frac{4}{\pi D^2} \right) L d\rho - \rho L \frac{8}{\pi} \frac{1}{D^3} dD + \rho \left(\frac{4}{\pi D^2} \right) dL \quad (26)$$

e dividindo-se por R, resulta em:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} - \frac{2dD}{D} + \frac{dL}{L} \quad (27)$$

Considerando-se que:

$$\frac{dD}{D} = -\nu \frac{dL}{L} \quad (28)$$

Por definição:

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (29)$$

Então:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \left(1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} \right) \quad (30)$$

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon K \quad (31)$$

$$K = 1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} \quad (32)$$

No caso da deformação do extensômetro não afetar a resistividade, o valor de K para $\nu=0,3$ será, aplicando a equação 18:

$$K = 1 + 2(0,3) = 1,6 + \frac{d\rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon} \quad (33)$$

Pela Equação de Bridgman, obtida através de ensaios com diversos tipos de materiais:

$$\frac{d\rho}{\rho} = c \frac{d\nu}{\nu} \quad (34)$$

onde c = constante.

$$\frac{d\nu}{\nu} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (35)$$

$$\frac{d\nu}{\nu} = \varepsilon_x - 2\nu\varepsilon_x \quad (36)$$

$$\frac{d\nu}{\nu} = \varepsilon(1 - 2\nu) \quad (37)$$

Assim, substituindo, considerando $c=1$ como uma média geral de diversos materiais ensaiados:

$$k = 1 + 2\nu + \frac{c\varepsilon(1 - 2\nu)}{\varepsilon} \quad (38)$$

$$k = 1 + 2\nu + c(1 - 2\nu) \quad (39)$$

$$c = 1 \Rightarrow k = 2 \quad (40)$$

Os valores de K para as aplicações usuais variam de 1,70 a 2,20.

3.4.3 - Características dos extensômetros elétricos

Partindo da relação fundamental da extensometria (equação 19), para a medida das deformações na superfície da maioria dos materiais estruturais, normalmente, são utilizados extensômetros elétricos de resistência com as seguintes características:

- Resistência elétrica: 60 Ω a 1000 Ω . Geralmente utilizam-se extensômetros de 120 Ω e 350 Ω ;
- Constante do extensômetro (*gage factor*) K. Neste caso utiliza-se um valor em torno de 2;
- O comprimento da grade de medida, normalmente, corresponde a 3, 5, 10, 15 e 20 milímetros.

Os extensômetros elétricos têm uma forma específica para cada aplicação. No caso de medidas de deformação, **considerando um estado plano de tensões**, na superfície de peças tem-se:

- Uniaxial;
- Bi-axial - rosetas de duas direções;
- Tri-axial - rosetas de três direções, conhecidas como rosetas delta.

Figura 3.4.3.1 – Formas dos Strain Gages: Uniaxial (a); Bi-axial (b); Tri-axial (c) – Adaptado de (Dally, 1978)

3.5 – Instrumentação

O método experimental requer uso intensivo de instrumentos. Assim, é necessário que se conheçam as técnicas de medição, os instrumentos, a forma adequada de aplicá-los em seus aparatos experimentais e técnicas de processamento dos dados obtidos. Para entender o funcionamento de instrumentos de medição, ou mesmo projetar um instrumento, é necessário saber como eles são configurados a partir de elementos funcionais.

O diagrama abaixo mostra as funções básicas necessárias para a constituição de qualquer instrumento (FEM.UNICAMP, 2005):

Figura 3.5.1 - Configuração de um instrumento

- Elemento sensor primário - aquele que primeiro recebe a informação do meio físico medido e gera um sinal de saída que depende de algum modo da quantidade medida.
- Elemento conversor de variável - aquele que converte o sinal de saída do elemento sensor primário em um outro sinal mais apropriado para a medição, sem, entretanto, alterar a informação contida no sinal original.
- Elemento manipulador de variável - aquele que opera uma mudança no valor numérico associado ao sinal de saída do elemento conversor de variável segundo uma regra precisamente definida, mantendo, entretanto, a natureza física do sinal.

- Elemento transmissor de dados - aquele que transmite dados entre os elementos funcionais do sistema de medição quando estes se encontram fisicamente separados.
- Elemento apresentador de dados - aquele que coloca os dados em uma forma reconhecida por um dos sentidos humanos (pelo observador) para efeito de monitoramento, controle ou análise.
- Elemento armazenador/reprodutor de dados - aquele que armazena os dados de maneira não necessariamente reconhecida pelos sentidos humanos e que os apresenta (reproduz) a partir de um comando qualquer.

A Figura 3.5.1 apresenta os elementos funcionais de um sistema de medição, isto é, do instrumento, e não seus elementos físicos. Um instrumento específico pode apresentar várias combinações das funções básicas, em seqüências distintas daquela da Figura 3.5.1, sendo que um mesmo componente físico pode desempenhar várias destas funções. Uma outra configuração menos detalhada considera os sistemas de medição como contendo três partes:

- Estágio sensor/transdutor - realiza a detecção da variável física e a converte em um sinal mais apropriado para medição, normalmente mecânico ou elétrico. O sensor deveria ser, idealmente, insensível a cada uma das outras possíveis entradas interferentes não desejadas: 1) ruído, por definição um sinal não-desejável que varia (flutua) muito rapidamente; 2) deslocamento (drift), um sinal não-desejável que varia lentamente.
- Estágio intermediário - realiza uma modificação do sinal oriundo do estágio anterior através de amplificação, filtragem, etc. Isto é, o estágio intermediário deve realizar a transdução da informação para torná-la aceitável: realiza a 1) filtragem do sinal para remover ruídos, e 2) amplifica o sinal, isto é aumenta sua potência.
- Estágio final - realiza a apresentação final dos dados, o seu armazenamento e, se necessário, o controle da variável medida. Isto é, no estágio final está o

mostrador (ou display), o banco de memória onde dados são armazenados, o computador que fará o controle do processo, etc.

Podemos descrever o esquema de um medidor eletrônico de deformação da seguinte maneira:

Figura 3.5.2 - Esquema de um medidor eletrônico de deformação

3.5.1 - Desempenho estático e dinâmico de instrumentos

O estudo das características de desempenho de um instrumento de medida e de sistemas de medição em geral é normalmente feito em termos da análise de suas características estáticas e características dinâmicas. As razões que explicam são:

- Algumas aplicações envolvem a medida de quantidades que permanecem constantes ou que variam apenas muito lentamente (grandezas estáticas ou semi-estáticas, como, por exemplo, a pressão e a temperatura ambientes).
- Outras aplicações requerem a medida de quantidades que variam rapidamente, sendo, portanto, necessário examinar-se as relações dinâmicas entre a entrada e a saída do instrumento de medida (por exemplo, a flutuação de velocidade típica da turbulência de um escoamento de fluido).

As características estáticas de um instrumento influenciam a qualidade das medidas realizadas em condições dinâmicas, mas o tratamento simultâneo de ambas é inviável matematicamente.

Percebe-se, portanto, que embora a separação do comportamento de um instrumento em características estáticas e dinâmicas seja muitas vezes acadêmica, trata-se de uma abordagem aproximada necessária para a solução de problemas práticos.

Todas as características de desempenho estático de um instrumento são obtidas através de um procedimento denominado calibração estática. Este termo refere-se a uma situação onde todas as entradas (desejadas, interferentes e modificadoras) são mantidas constantes durante certo intervalo de tempo, exceto uma. Ou seja, a entrada sendo investigada é variada dentro de uma faixa de valores constantes, o que faz com que a saída varie dentro de uma outra faixa de valores constantes. A relação entrada-saída obtida representa uma calibração estática do instrumento válida para as condições de valores constantes de todas as outras entradas.

Normalmente, há muitas entradas interferentes e/ou modificadoras para um dado instrumento, cada qual causando apenas um efeito muito pequeno sobre a entrada desejada. Dada a inviabilidade prática de controlá-las todas, a afirmação “todas as entradas exceto uma são mantidas constantes” refere-se a uma situação ideal que pode ser aproximada, mas nunca atingida na prática. O termo “método de medida” descreve esta situação ideal enquanto o termo “processo de medida” descreve a realização prática (imperfeita) do método de medida.

As entradas mantidas constantes requerem a sua medida independentemente do instrumento sendo calibrado. Para entradas interferentes ou modificadoras (cujos efeitos sobre a saída devem ser relativamente pequenos em um instrumento de boa qualidade), não é necessária uma grande precisão nas medidas. Entretanto, ao se calibrar a resposta do instrumento às entradas desejadas, estas devem ser medidas com uma precisão maior do que aquela do instrumento sendo calibrado. Como regra geral, o padrão de

calibração (entrada desejada) deve ser no mínimo dez vezes mais preciso do que o instrumento sendo calibrado.

Em geral, o procedimento de calibração estática pode ser realizado seguindo-se as etapas abaixo:

- Identificar e relacionar todas as possíveis entradas para um dado instrumento.
- Decidir, com base na aplicação em questão, quais entradas são relevantes.
- Obter os equipamentos que possibilitarão a variação das entradas relevantes em todas as faixas consideradas necessárias.
- Obter as relações entrada-saída variando alternadamente cada entrada considerada relevante e mantendo todas as outras constantes.
- Realizar uma superposição adequada das várias relações entrada-saída de forma a descrever o comportamento global estático do instrumento.

Ao medirmos uma quantidade física qualquer com um dado instrumento, perguntamo-nos o quão próximo o valor numérico obtido está do valor “verdadeiro”.

Obviamente, o assim chamado valor verdadeiro geralmente não é conhecido já que medidas perfeitas ou mesmo definições exatas das quantidades físicas são impossíveis. Portanto, o termo valor “verdadeiro” refere-se ao valor que seria obtido se a quantidade física em questão fosse medida por um método exemplar de medição, isto é, um método suficientemente preciso em vista da utilização final dos dados.

3.6 – Dinamometria

Para que se possa realizar uma análise quantitativa dos processos de corte de metais, algumas observações devem ser realizadas antes, durante e depois do corte. O número de observações que podem ser feitas durante o corte são limitadas; uma das medições mais importantes deste tipo tem sido a determinação das componentes das forças de corte. Esta seção irá discutir os aspectos mais importantes no projeto dos dinamômetros para a medição destas forças.

Os requerimentos mais importantes no projeto de dinamômetros são:

Rigidez: um dinamômetro deve ser rígido o suficiente para que a operação de corte não seja influenciada por suas deflexões. Para tanto, a frequência natural do dinamômetro deve ser pelo menos 4 vezes maior que a frequência do sinal de excitação. Para fins de análise, qualquer dinamômetro pode ser modelado como uma massa apoiada por uma mola (Shaw, 2005). Assim, a frequência natural de um sistema como este é igual a:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (41)$$

Em geral, a rigidez estática de um dinamômetro deve estar em torno de 10^8 N/m.

Sensibilidade: um dinamômetro deve ser capaz de ler medições de pelo menos 1% de seu fundo de escala facilmente. Por exemplo, um extensômetro é capaz de ler deformações de $1\mu\text{m/m}$ (Dally, 1978).

Precisão: um dinamômetro deve realizar medições com precisão de pelo menos $\pm 1\%$.

Frequentemente, existem vários outros requerimentos especiais que devem ser atingidos, tais como tamanho, acabamento superficial e aplicabilidade a diversos

trabalhos. Cada um destes requerimentos especiais assume diferente grau de importância em diferentes aplicações.

Abaixo, alguns dos dispositivos que vêm sendo utilizados para medir pequenas deflexões nos dinamômetros são (**Shaw, 2005**):

- Células de pressão hidráulica;
- Dispositivos pneumáticos;
- Dispositivos ópticos de diversos tipos - métodos de interferometria podem ser utilizados para medições muito precisas usando o comprimento de onda da luz como unidade de medida. Deflexões angulares muito pequenas podem ser medidas através da reflexão de um feixe de luz da superfície móvel;
- Cristais piezelétricos – são amplamente utilizados como unidade de medida em dinamômetros de corte de metais. Os mesmos podem ser projetados para ter maiores frequências naturais de vibração do que outros tipos de dinamômetros.

3.7 - Método da 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 ou a força de corte em cada rotação via variáveis independentes tais como a velocidade de avanço, largura de corte e avanço por dente.

É desejável que um modelo forneça uma equação matemática 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 conter 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 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.

Delineamentos fatoriais são freqüentemente usados em experimentos envolvendo muitos fatores onde é necessário estudar o efeito dos fatores sobre uma resposta (**Montgomery, 2001**). 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 2^3 fatorial, uma combinação com A e C no nível alto e B 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.

Geometricamente, essa modelagem é um cubo como o da figura 3.7.1, com as oito combinações formando os seus cantos. Com este, é possível estimar 3 efeitos principais (a, b, c), considerando como fatores o avanço, a velocidade de corte e a profundidade de corte, respectivamente, três efeitos de interação de fatores dois a dois e um efeito da interação dos três fatores juntos.

Figura 3.7.1 – Modelagem dos Experimentos

Utilizando-se a figura 3.7.1, os efeitos podem ser facilmente estimados. Considerando as seguintes relações:

- $a = f_z$
- $b = v_f$
- $c = a_e$

O efeito principal f_z pode ser estimado somando-se os valores obtidos das quatro combinações do lado direito do cubo, onde f_z está no nível mais alto, subtraindo deste total a soma dos valores obtidos das quatro combinações do lado esquerdo do cubo, onde f_z está no nível mais baixo, e dividindo-se este total por $4 \times n$, onde $n = 4$ replicações. Isto resulta em:

$$Efeito_{f_z} = \frac{1}{4n} [f_z + f_z.v_f + f_z.a_e + f_z.v_f.a_e - (1) - v_f - a_e - v_f.a_e] \quad (42)$$

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

$$Efeito_{v_f} = \frac{1}{4n} [v_f + f_z.v_f + v_f.a_e + f_z.v_f.a_e - (1) - f_z - a_e - f_z.a_e] \quad (43)$$

$$Efeito_{a_e} = \frac{1}{4n} [a_e + f_z.a_e + v_f.a_e + f_z.v_f.a_e - (1) - f_z - v_f - f_z.v_f] \quad (44)$$

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

$$Efeito_{f_z - v_f} = \frac{1}{4n} \cdot [f_z \cdot v_f \cdot a_e - v_f \cdot a_e + f_z \cdot v_f - v_f - f_z \cdot a_e + a_e - f_z + (1)] \quad (45)$$

$$Efeito_{f_z - a_e} = \frac{1}{4n} \cdot [(1) - f_z + v_f - f_z \cdot v_f - a_e + f_z \cdot a_e - v_f \cdot a_e + f_z \cdot v_f \cdot a_e] \quad (46)$$

$$Efeito_{v_f - a_e} = \frac{1}{4n} \cdot [(1) + f_z - v_f - f_z \cdot v_f - a_e - f_z \cdot a_e + v_f \cdot a_e + f_z \cdot v_f \cdot a_e] \quad (47)$$

A interação $f_z - v_f - a_e$ é definida como a soma das diferenças entre a interação $f_z - v_f$ para os dois diferentes níveis de a_e , sendo assim:

$$Efeito_{f_z - v_f - a_e} = \frac{1}{4n} \cdot [f_z \cdot v_f \cdot a_e - v_f \cdot a_e - f_z \cdot a_e + a_e - f_z \cdot v_f + v_f + f_z - (1)] \quad (48)$$

4 – PROJETO DO DINAMÔMETRO

O projeto do dinamômetro em questão, baseou-se no trabalho de **(Saglam e Unuvar, 2001)**. Este é constituído basicamente de uma mesa, instrumentada com 4 células de carga, distribuídas duas a duas em duas direções ortogonais, sendo que cada uma das células de carga está instrumentada para medir deformações nas direções axial e transversal, fazendo assim com que o dinamômetro seja capaz de medir forças nas três direções ortogonais.

A medição de força é expressa através da deformação do material submetido à mesma, por meio de elementos de calibração (células de carga), sendo estes feitos de materiais elásticos. Quando o material e a geometria são selecionados corretamente de acordo com a força a ser medida, a deformação permanece na região elástica, e a variação desta com a força é linear. Esta deformação pode ser captada por meio de transdutores mecânicos, pneumáticos, ópticos, elétricos, etc. Neste trabalho foram utilizados *strain gages*, que convertem a deformação em sinais elétricos, devido às vantagens já descritas anteriormente neste trabalho.

Os dois critérios mais importantes no projeto de um dinamômetro são a rigidez e a sensibilidade. O critério de rigidez é a frequência natural do dinamômetro. Todas as máquinas-ferramenta estão submetidas a vibrações, forçadas e auto-excitadas. Para que os dados de medição de força não sejam influenciados por alguma vibração do dinamômetro durante o corte, a sua frequência natural deve ser maior que a frequência de vibração (4 vezes ou mais).

Nos dinamômetros, para correta distribuição de tensões na área dos *strain gages*, estes são posicionados na região de máxima deformação da célula de carga. A célula de carga é projetada e posicionada de forma que seja deformada pela componente a ser medida da força. Assim, os efeitos das outras componentes serão reduzidos.

As células de carga devem ser usinadas idêntica e simetricamente para evitar efeitos cruzados de uma componente de força sobre as outras. A simetria da célula de

carga gera caminhos paralelos para a transferência de calor, o que, teoricamente, faz com que dois pontos em lados opostos da célula estejam sempre à mesma temperatura.

O comportamento elástico do material deve ser coerente com a frequência e intensidade do carregamento. Para aumentar a vida à fadiga em casos de cargas vibratórias e/ou variáveis, materiais com alta tenacidade devem ser selecionados. Para reduzir os efeitos da temperatura na medição, o material da célula de carga deve ter baixo coeficiente de expansão e alta condutibilidade térmica.

A célula de carga foi dimensionada como um anel. Considerando uma das metades do anel, como mostrado na figura 4.1, e considerando o caso em que as partes superior e inferior não possuem o grau de liberdade de rotação. M_0 é o momento requerido para satisfazer esta condição.

Figura 4.1 – (a) Anel para medição de forças; (b) Elemento anel para análise elástica – adaptado de (Cook e Rabinowicz, 1963)

O momento fletor M_θ em qualquer ponto do anel é:

$$M_\theta = M_0 + \frac{F.r}{2} \sin \theta + \frac{P.r}{2} (1 - \cos \theta) \quad (49)$$

A energia elástica total no anel é:

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^\pi M_\theta^2 r d\theta \quad (50)$$

A rotação angular θ do anel em $\theta=0$ é 0, então:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial M_0} \right)_{\theta=0} = 0 = \frac{1}{EI} \int_0^\pi M_\theta \frac{\partial M_\theta}{\partial M_0} r d\theta \quad (51)$$

Ou

$$0 = \int_0^\pi \left[M_0 + \frac{F.r \sin \theta}{2} + \frac{P.r}{2} (1 - \cos \theta) \right] d\theta \quad (52)$$

Integrando, temos:

$$M_0 \pi + F.r + \frac{P.r.\pi}{2} = 0 \quad (53)$$

Substituindo na equação 49, temos:

$$M_\theta = \frac{F.r}{2} \left(\sin \theta - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{P.r}{2} \cos \theta \quad (54)$$

Pode-se notar que o momento devido a $F/2$ é zero quando:

$$\operatorname{sen} \theta = \frac{2}{\pi} \longrightarrow \theta = 39,6^\circ \quad (55)$$

E o momento devido a P/2 é zero quando:

$$\cos \theta = 0 \longrightarrow \theta = 90^\circ \quad (56)$$

As duas posições, $\theta = 39,6^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ são cada uma um nó de deformação para uma das forças. Assim, pode-se escrever:

$$M_{39,6^\circ} = -\frac{P.r}{2} \cos 39,6^\circ = -0,385 P.r \quad (57)$$

$$M_{90^\circ} = \frac{F.r}{2} \left(\operatorname{sen} 90^\circ - \frac{2}{\pi} \right) = 0,181 F.r \quad (58)$$

A deformação ε em um anel estreito é:

$$\varepsilon = \frac{6M}{Ebt^2} \quad (59)$$

Assim:

$$\varepsilon_{39,6^\circ} = 2,31 \frac{P.r}{Ebt^2} \quad (60)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = 1,09 \frac{F \cdot r}{E b t^2} \quad (61)$$

Podem-se mostrar por simetria que as equações 60 e 61 se mantêm suficientemente constantes para todo o anel da figura 4.1, desde que suas partes superior e inferior estejam com os graus de liberdade de rotação restringidos.

Desta maneira surge então uma unidade capaz de medir independentemente duas componentes de força F e P. Vide anexo o memorial de cálculo das células de carga.

O esquema de montagem do mesmo pode ser visto na figura abaixo:

Figura 4.2 – Esquema de Montagem das Células de Carga no Dinamômetro

5 – CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO

O dinamômetro foi projetado para ter a rigidez necessária para que as vibrações do processo não influenciem as leituras de força (frequência natural do dinamômetro igual a 4 vezes ou mais a frequência do sinal de força). O material selecionado, tanto para as células de carga (conforme memorial de cálculo, Anexo 1) quanto para a base e mesa foi o aço ABNT 4340, sendo que a fixação das células de carga à base foi feita por meio de parafusos M10x20 mm, DIN 912 – Classe 12,9.

O desenho de conjunto do dinamômetro pode ser visto na figura abaixo:

Figura 5.1 – Desenho de Conjunto do Dinamômetro

Os desenhos de fabricação dos componentes estão no Anexo 2.

As células de carga foram fabricadas num centro de usinagem CNC, de maneira a tentar minimizar as diferenças entre elas. O ângulo real de colagem dos *strain gages* é de 45°, pois embora as células de carga tenham sido dimensionadas como anéis, as mesmas foram fabricadas como octógonos. Isso porque existe um problema prático na fixação e restrição do grau de liberdade de rotação das superfícies superior e inferior de um anel. Além disso, esta é uma boa aproximação de um anel no que diz respeito à distribuição de tensões.

O procedimento de colagem dos *strain gages* nas células de carga, seguiu o procedimento padrão, sendo que o mesmo está descrito a seguir:

5.1 - Análise Prévia

A análise prévia consistiu em determinar em quais seriam as superfícies nas quais os *strain-gages* deveriam ser instalados primeiro, devido às limitações de tamanho da própria célula de carga. Os procedimentos para as outras superfícies são semelhantes. Dois grupos de células de carga foram criados para a primeira colagem, devido ao tamanho e quantidade de pinças disponíveis, figuras 5.1.1 e 5.1.2.

Figura 5.1.1 - Superfícies Seleccionadas para a Primeira Etapa

Figura 5.1.2 - Superfícies Seleccionadas para Primeira Etapa

5.2 - Preparação das Superfícies

A superfície da célula de carga precisou ser preparada adequadamente antes de proceder à colagem do *strain-gage*. Inicialmente foi utilizada uma lixa fina nº 200 e 300 no local de instalação para criar uma rugosidade superficial adequada, permitindo a melhor aderência da cola. Gazes umedecidas foram utilizadas para limpar a superfície da célula de carga.

Figura 5.2.1 - Conjunto de Células de Carga com Superfícies Preparadas

5.3 - Marcação das Linhas de Orientação

Os *strain-gages* apresentam linhas de orientação perpendiculares entre si para correta instalação e mensuração. A marcação se deu com estilete, régua e esquadro, nas superfícies anteriormente escolhidas, sendo que as mesmas não atingiram as áreas de colagem dos *strain gages*. Novamente gazes umedecidas com Acetona foram utilizadas para limpar as superfícies das células de carga.

5.4 - Colagem

Para esta aplicação, foi selecionado o adesivo tipo Epóxi M-610 da Micro Measurement Group, por apresentar grande estabilidade ao longo de sua vida útil, além de sua facilidade de uso. O adesivo foi passado na superfície da célula de carga e o *strain-gage*, segundo as linhas de orientação marcadas anteriormente. Uma nova camada de cola é então aplicada em cima do *strain-gage* para aumentar a aderência e protegê-lo do ambiente. O *strain-gage* foi mantido em sua posição por fita adesiva resistente ao calor da etapa de cura seguinte.

O ciclo de cura é feito a uma temperatura entre 120 e 175 ° C, por duas horas, com o extensômetro sob pressão de grampos de 1 a 5 kg/mm². Após a colagem, o adesivo resiste a temperaturas ambientes entre -200 ° C a + 300 ° C.

Depois de colados, os *strain-gages* devem sofrer um tratamento térmico de pós-cura, com temperatura de pelo menos 10°C acima da de cura por duas horas, para relaxamento das tensões introduzidas devido à ação das pinças e dos gradientes térmicos sobre a sua grade.

Os extensômetros utilizados são do fabricante Excelsensor, sendo que o extensômetro é um modelo unidirecional simples (**Excelsensor, 2005**).

5.5 - Ida ao Forno

Uma película de Teflon, colocada sobre o extensômetro no processo de colagem, serve para isolar o contato do adesivo com o que não deve ser colado, no momento em que o adesivo se espalhar pela pressão exercida. Suporta, sem alteração, as temperaturas de cura dos adesivos.

Almofadas de silicones foram postas sobre a película de Teflon para distribuir melhor a pressão aplicada pela pinça sem danificar o extensômetro. Por último, uma placa de alumínio também foi colocada para distribuir melhor as pressões.

Figura 5.5.1 - Célula de Carga Pronta para Ir ao Forno

6 – CALIBRAÇÃO DO DINAMÔMETRO

A calibração do dinamômetro foi feita estaticamente, sendo que foram aplicadas cargas conhecidas em diversos pontos e em diversas direções sobre o mesmo. Foram aplicados carregamentos axiais numerados de 1 a 4 e carregamentos laterais, numerados de 1 a 6. Convencionou-se que os carregamentos axiais serão A1, A2, A3 e A4 e os carregamentos laterais são L1, L2, L3, L4, L5 e L6.

Na figura abaixo, são mostrados os pontos de aplicação da cada um dos carregamentos:

Figura 6.1 – Posição de aplicação das cargas de calibração

Foram então aplicadas cargas que variaram de 500 a 2000 N, com intervalo de 500 N. Para cada uma das cargas, foram anotados os valores indicados por todas as células de carga em todas as direções. Para comparação dos valores, foi utilizada uma célula de carga comercial tipo “S”.

Para os carregamentos axiais, os dados obtidos foram os seguintes:

Tabela 6.1 – Dados de calibração carregamento A1

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	80	160	230	310
B	230	460	700	930
C	120	240	350	460
D	70	140	200	270
E	-20	-50	-70	-100
F	40	80	130	180
G	60	110	170	230
H	-30	-60	-90	-110

Tabela 6.2 – Dados de calibração carregamento A2

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	210	420	640	860
B	130	240	340	450
C	30	50	80	100
D	140	290	440	590
E	-50	-110	-170	-230
F	60	100	140	180
G	50	60	80	90
H	-50	-80	-120	-140

Tabela 6.3 – Dados de calibração carregamento A3

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	70	150	230	310
B	30	40	50	70
C	110	220	330	450
D	300	600	890	1180
E	-30	-50	-60	-70
F	50	60	80	110
G	70	110	160	210
H	-60	-120	-160	-200

Tabela 6.4 – Dados de calibração carregamento A4

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	-20	-40	-50	-70
B	110	220	330	440
C	260	520	770	1020
D	140	290	450	600
E	10	10	10	10
F	50	100	140	190
G	120	230	350	500
H	-20	-50	-80	-110

Estes dados foram plotados, dando origem às seguintes curvas:

Figura 6.2 – Curvas de Calibração para Carregamento A1

Figura 6.3 – Curvas de Calibração para Carregamento A2

Figura 6.4 – Curvas de Calibração para Carregamento A3

Figura 6.5 – Curvas de Calibração para Carregamento A4

A partir destes gráficos, é possível visualizar as influências cruzadas de um canal sobre os outros.

Para os carregamentos laterais, o procedimento foi repetido, sendo que as tabelas e os gráficos obtidos podem ser vistos a seguir:

Tabela 6.5 – Dados de calibração carregamento L1

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	-60	-110	-160	-200
B	60	130	180	240
C	70	130	190	260
D	-70	-140	-210	-280
E	70	170	290	400
F	280	580	890	1210
G	80	150	200	260
H	180	360	540	730

Tabela 6.6 – Dados de calibração carregamento L2

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	-60	-110	-160	-200
B	60	120	180	230
C	70	140	210	280
D	-90	-170	-250	-320
E	30	70	110	150
F	230	470	700	950
G	160	300	420	530
H	230	460	700	940

Tabela 6.7 – Dados de calibração carregamento L3

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	-60	-110	-160	-190
B	60	130	190	250
C	70	120	170	230
D	-70	-130	-180	-250
E	140	310	490	670
F	340	710	1080	1470
G	0	-10	-20	-40
H	120	250	390	520

Tabela 6.8 – Dados de calibração carregamento L4

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	100	190	290	390
B	20	30	50	60
C	-40	-80	-120	-150
D	-90	-170	-250	-340
E	270	540	820	1110
F	-20	-30	-50	-60
G	210	410	610	800
H	-50	-100	-150	-200

Tabela 6.9 – Dados de calibração carregamento L5

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	100	200	300	410
B	10	20	30	10
C	-30	-70	-100	-130
D	-80	-170	-250	-340
E	200	410	630	850
F	-80	-160	-230	-300
G	270	540	800	1050
H	-20	-30	-30	-20

Tabela 6.10 – Dados de calibração carregamento L6

<i>Direção</i>	<i>Carga Aplicada (N)</i>			
	500	1000	1500	2000
A	100	200	300	390
B	20	50	70	100
C	-40	-80	-130	-170
D	-100	-180	-270	-350
E	320	660	1020	1370
F	30	80	120	160
G	150	280	410	530
H	-100	-190	-290	-400

Figura 6.6 – Curvas de Calibração para Carregamento L1

Figura 6.7 – Curvas de Calibração para Carregamento L2

Figura 6.8 – Curvas de Calibração para Carregamento L3

Figura 6.9 – Curvas de Calibração para Carregamento L4

Figura 6.10 – Curvas de Calibração para Carregamento L5

Figura 6.11 – Curvas de Calibração para Carregamento L6

Novamente é possível visualizar os efeitos cruzados entre os canais. Estes efeitos podem ser atribuídos às diferenças dimensionais entre as células de carga e às diferenças nas posições onde foram colados os *strain gages*, que embora pequenas, acabam sendo amplificadas pelo sistema de medição.

Para análise final dos dados de calibração, foram montados os gráficos abaixo, com a somatória das cargas axiais e laterais:

Figura 6.12 – Curvas de Calibração para Carregamento Axial

Figura 6.13 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (Y)

Figura 6.14 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (X)

Para a disponibilização final dos dados, é necessário eliminar estes efeitos cruzados. Assim, foi desenvolvido uma rotina que implementa equações obtidas através do método da regressão linear múltipla, que agem como filtros para os dados do dinamômetro.

As equações obtidas foram as seguintes:

$$\begin{cases} X = E + G \\ Y = F + H \\ Z = A + B + C + D \end{cases} \quad (62)$$

$$\begin{cases} F_x = 1,05X - 0,3291Y - 0,1Z - 1 \\ F_y = 0,1338X + 1,0395Y - 0,042Z \\ F_z = 0,0228X - 0,04Y + 0,9524Z \end{cases} \quad (63)$$

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,05 & -0,3291 & -0,1 \\ 0,1338 & 1,0395 & -0,042 \\ 0,0228 & -0,04 & 0,9524 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (64)$$

7 – ESTUDO DE CASO

Com o auxílio do Dinamômetro construído, conforme a primeira parte deste trabalho, foi realizado um estudo de caso na TenarisConfab, fabricante de tubos de aço com costura para exploração e transporte de óleo e gás, dentre outros, situada na cidade de Pindamonhangaba, São Paulo, SP.

Em uma das fábricas da TenarisConfab são fabricados tubos pelo processo UO – SAW, ou seja, a conformação é realizada em duas etapas, a partir da chapa plana; a primeira etapa faz com que a chapa assuma o formato “U”, e a segunda etapa completa a conformação, fechando o tubo no formato “O”. O processo de soldagem utilizado é o de Solda por Arco Submerso (SAW) (Tenaris, 2007).

As chapas, que servem de matéria-prima para fabricação dos tubos nesta fábrica, têm suas bordas fresadas no início do processo para a correta definição da largura da chapa e para a criação dos chanfros, que serão preenchidos com o material de adição no processo de soldagem.

O objetivo deste estudo é a redução do tempo de ciclo do equipamento denominado Fresadora de Bordas, através da otimização dos parâmetros de corte: velocidade de avanço (v_f), avanço por dente (f_z) e largura de corte (a_e).

Segundo (Diniz, 2006), para se obter a maior produtividade num processo de corte, deve-se utilizar a velocidade de corte de máxima produção (v_{cmaxp}), na qual o tempo total de confecção de uma peça (t_t) é mínimo. Porém, segundo o mesmo, esta velocidade é dependente da velocidade de troca de ferramental (t_{ft}). Assim, é importante não deixarmos de nos preocupar com a vida da ferramenta, pois a mesma influencia não somente os custos de produção, mas também a produtividade em si.

Desta forma, o processo de corte foi analisado para que fossem identificadas as variáveis que, quando alteradas para ganho de produtividade, aumentam menos as forças de corte, e que indiretamente estarão impactando menos a vida da ferramenta.

7.1 - Delineamento Experimental

Basicamente, foi feito um estudo estatístico do processo, sendo realizado um delineamento fatorial de ensaios, utilizando a ferramenta do Método da Regressão Linear Múltipla para o estudo dos resultados. Os parâmetros de corte são as variáveis de entrada do processo, enquanto as forças resultantes de corte, daqui em diante referenciadas apenas como forças de corte, e as rugosidades média e profundidade de polimento da superfície são as variáveis de saída.

Figura 7.1.1 – Diagrama das Variáveis de Entrada e Saída do Processo de Fresamento

As variáveis de entrada foram alteradas durante os ensaios, sendo que as variáveis de saída foram medidas e relacionadas às primeiras. Os parâmetros de corte foram variados através dos comandos da própria máquina. A rugosidade da superfície usinada foi medida na superfície usinada, sendo que para isso foi utilizado um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 3+. Já as forças de corte foram medidas utilizando o dinamômetro projetado e construído na primeira parte do trabalho. O desgaste da ferramenta não foi analisado neste trabalho.

Foi realizado um delineamento 2^k fatorial do experimento, com 2 replicações para cada combinação, que está descrito em (Montgomery, 2001).

Para este experimento, foi usado um delineamento fatorial 2^3 , que possui 8 combinações possíveis de níveis de fatores. Porém, foram feitas duas replicações para cada combinação, resultando em um total de 16 ensaios. Em cada um deles foi medida a rugosidade e as forças de corte.

Para a definição dos níveis altos e baixos de cada um dos parâmetros, foram utilizados os seguintes critérios:

- v_f – limitação da fresadora utilizada para a realização dos ensaios
- f_z – recomendação do fabricante das pastilhas
- a_e – teste do limite do conjunto máquina – peça – ferramenta.

7.2 - Corpos-de-Prova e Ferramentas

Para a realização dos ensaios, foram fabricados corpos-de-prova a partir de uma chapa fornecida pela TenarisConfab, de aço API 5L X80, utilizado na fabricação de tubos de aço. Os corpos-de-prova foram cortados na medida de 100 x 200 mm, sendo que as superfícies de 200 mm foram as utilizadas nos ensaios, e estavam no sentido de laminação da chapa, para garantir as mesmas condições do processo.

A máquina utilizada foi uma fresadora com rotação máxima do eixo árvore de 5000 rpm e velocidade máxima de avanço de 1250 mm/min.

A ferramenta utilizada foi um cabeçote fresador Coromil 290, R290-080027-12M 268539, com ângulo de posição de 90° e diâmetro de 80mm, com 6 pastilhas de metal duro da Sanvik Coromant R290-12T308M-PM.

Figura 7.2.1 – Porta-ferramentas e pastilhas

Figura 7.2.2 – Matéria-prima dos corpos-de-prova – Aço API 5L X80

7.3 - Ensaios

Em conjunto com o Dinamômetro projetado e construído, foi utilizado um sistema de aquisição de dados Spider8 da Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM), com Catman HBM Software (catman V4.0). A frequência de amostragem utilizada foi de 600Hz.

De acordo com o delineamento experimental exposto no item 7.1, foram realizados 16 ensaios, 2 replicações de cada uma das 8 combinações a seguir (seguindo a notação do Método da Regressão Linear Múltipla abordado anteriormente):

Tabela 7.3.1 – Ensaios Realizados

Combinação / Parâmetros	v_f	$a_e \cdot v_f$	$f_z \cdot v_f$	$f_z \cdot a_e \cdot v_f$	1	a_e	f_z	$f_z \cdot a_e$
f_z (mm)	0,05	0,05	0,17	0,17	0,05	0,05	0,17	0,17
a_e (mm)	1	3	1	3	1	3	1	3
v_f (mm/min)	1250	1250	1250	1250	400	400	400	400
n (rpm)	4167	4167	1225	1225	1333	1333	392	392
v_c (m/min)	1047	1047	308	308	335	335	99	99

A seguir, pode-se observar o gráfico de força de corte e o espectro de frequências para cada um dos ensaios:

Figura 7.3.1 – Forças de Corte Ensaio v_f Replicação 1

Figura 7.3.2 – Espectro de frequências ensaio v_f Replicação 1

Figura 7.3.3 – Forças de Corte Ensaio vf Replicação 2

Figura 7.3.4 - Espectro de frequências ensaio vf Replicação 2

Figura 7.3.5 – Forças de Corte Ensaio ae.vf Replicação 1

Figura 7.3.6 - Espectro de frequências ensaio ae.vf Replicação 1

Figura 7.3.7 – Forças de Corte Ensaio ae.vf Replicação 2

Figura 7.3.8 - Espectro de frequências ensaio ae.vf Replicação 2

Figura 7.3.9 – Forças de Corte Ensaio fz.vf Replicação1

Figura 7.3.10 - Espectro de frequências ensaio fz.vf Replicação 1

Figura 7.3.11 – Forças de Corte Ensaio fz.vf Replicação 2

Figura 7.3.12 - Espectro de frequências ensaio fz.vf Replicação 2

Figura 7.3.13 – Forças de Corte Ensaio fz.ae.vf Replicação 1

Figura 7.3.14 - Espectro de frequências ensaio fz.ae.vf Replicação 1

Figura 7.3.15 – Forças de Corte Ensaio fz.ae.vf Replicação 2

Figura 7.3.16 - Espectro de freqüências ensaio fz.ae.vf Replicação 2

Figura 7.3.17 – Forças de Corte Ensaio (1) Replicação 1

Figura 7.3.18 - Espectro de frequências ensaio (1) Replicação 1

Figura 7.3.19 – Forças de Corte Ensaio (1) Replicação 2

Figura 7.3.20 - Espectro de frequências ensaio (1) Replicação 2

Figura 7.3.21 – Forças de Corte Ensaio ae Replicação 1

Figura 7.3.22 - Espectro de freqüências ensaio ae Replicação 1

Figura 7.3.23 – Forças de Corte Ensaio ae Replicação 2

Figura 7.3.24 - Espectro de frequências ensaio ae Replicação 2

Figura 7.3.25 – Forças de Corte Ensaio fz Replicação 1

Figura 7.3.26 - Espectro de freqüências ensaio fz Replicação 1

Figura 7.3.27 – Forças de Corte Ensaio fz Replicação 2

Figura 7.3.28 - Espectro de frequências ensaio fz Replicação 2

Figura 7.3.29 – Forças de Corte Ensaio fz.ae Replicação 1

Figura 7.3.30 - Espectro de frequências ensaio fz.ae Replicação 1

Figura 7.3.31 – Forças de Corte Ensaio fz.ae Replicação 2

Figura 7.3.32 - Espectro de frequências ensaio fz.ae Replicação 2

Para que se pudesse analisar a resposta dinâmica do dinamômetro, foi feita uma análise de um período de 0,3 segundos do ensaio f_z replicação 2. Este período corresponde a 2 rotações da ferramenta, já que nele a rotação do eixo-árvore é igual a 392 rpm, o que corresponde a 6,5 rps. Sendo 6 o número de arestas de corte da ferramenta, a frequência do sinal de corte é igual a $6 \times 6,5$, ou seja, 39 Hz. Assim, a figura 7.3.33, representa um intervalo de 0,3 segundos de corte, o que corresponde a 2 rotações da ferramenta. Nela, deve-se observar um número de picos de força igual a 12.

Figura 7.3.33 – Detalhe de 2 rotações da ferramenta no Ensaio f_z Replicação 1

Analisando a figura, observa-se um número de picos igual a 14. Isso se deve à imprecisão do CNC da máquina que estava sendo utilizada, já que a menor escala de ajuste da rotação do fuso é de 50 rpm.

Para cada um destes ensaios, foram medidas as forças de corte nas três direções cartesianas e a rugosidade da superfície usinada. Foi então calculada a força resultante de corte, através da equação 9, sendo que os resultados podem ser observados nas tabelas a seguir:

Tabela 7.3.2 – Forças de Corte

<i>Ensaio</i>	<i>vf</i>	<i>ae.vf</i>	<i>fz.vf</i>	<i>fz.ae.vf</i>	<i>(1)</i>	<i>Ae</i>	<i>fz</i>	<i>fz.ae</i>
Replicação 1 (N)	183	350	785	1251	318	396	472	810
Replicação 2 (N)	121	413	1090	1468	315	459	690	898
Média (N)	152	381	938	1359	317	428	581	854
Desvio Padrão (N)	44	45	216	153	2	44	154	62
t-Student (2 caudas, 20%) (N)*	84	85	408	289	4	84	291	118

* (Blank, 1980)

Tabela 7.3.3 – Rugosidade da Superfície Usinada (R_a)

<i>Ensaio</i>	<i>vf</i>	<i>ae.vf</i>	<i>fz.vf</i>	<i>fz.ae.vf</i>	<i>(1)</i>	<i>Ae</i>	<i>fz</i>	<i>fz.ae</i>
Replicação 1 (μm)	1,96	2,88	4,16	8,38	1,26	1,80	4,06	3,98
Replicação 2 (μm)	1,82	2,70	3,82	4,96	2,30	2,20	5,16	5,06
Média (μm)	1,89	2,79	3,99	6,67	1,78	2,00	4,61	4,52
Desvio Padrão (μm)	0,10	0,13	0,24	2,42	0,74	0,28	0,78	0,76
t-Student (2 caudas, 20%) (μm)	0,19	0,24	0,45	4,56	1,39	0,53	1,47	1,44

Tabela 7.3.4 – Rugosidade da Superfície Usinada (R_y)

<i>Ensaio</i>	<i>vf</i>	<i>ae.vf</i>	<i>fz.vf</i>	<i>fz.ae.vf</i>	<i>(1)</i>	<i>ae</i>	<i>Fz</i>	<i>fz.ae</i>
Replicação 1 (μm)	9,90	16,80	18,30	34,00	9,20	13,10	23,20	29,60
Replicação 2 (μm)	12,40	17,60	20,20	31,60	17,90	17,20	34,00	37,00
Média (μm)	11,15	17,20	19,25	32,80	13,55	15,15	28,60	33,30
Desvio Padrão (μm)	1,77	0,57	1,34	1,70	6,15	2,90	7,64	5,23
t-Student (2 caudas, 20%) (μm)	3,33	1,07	2,53	3,20	11,60	5,47	14,40	9,87

7.4 - Análise dos Dados

A partir dos resultados obtidos e expostos no item anterior, foi aplicado o Método da Regressão Linear Múltipla, tanto para os dados de força (resultante) quanto para os dados de rugosidade. Assim, foi possível estimar os efeitos de cada um dos 3 parâmetros de corte sobre as duas variáveis de saída analisadas. Os efeitos foram normalizados numa escala de 0 a 100% para facilitar a compreensão. Os resultados podem ser observados abaixo:

Figura 7.4.1 – Efeito dos Parâmetros sobre a Força de Corte

Figura 7.4.2 – Efeito dos Parâmetros sobre a rugosidade (R_a)

Figura 7.4.3 – Efeito dos Parâmetros sobre a rugosidade (R_y)

Para determinar quais as variáveis significativas no modelo de forças e de rugosidade, foi aplicado para os dois casos a ANOVA (teste de hipóteses), com o auxílio do software Minitab®. Os dados obtidos podem ser observados abaixo:

Figura 7.4.4 – ANOVA da Força x avanço por dente

Figura 7.4.5 – Plotagem dos pontos de Força x avanço por dente

Figura 7.4.6 – ANOVA da Força x largura de corte

Figura 7.4.7 – Plotagem dos pontos de Força x largura de corte

Figura 7.4.8 – ANOVA da Força x velocidade de avanço

Figura 7.4.9 – Plotagem dos pontos de Força x velocidade de avanço

Figura 7.4.10 – ANOVA de Ra x avanço por dente

Figura 7.4.11 – Plotagem dos pontos de Ra x avanço por dente

Figura 7.4.12 – ANOVA de Ra x largura de corte

Figura 7.4.13 – Plotagem dos pontos de Ra x largura de corte

Figura 7.4.14 – ANOVA de Ra x velocidade de avanço

Figura 7.4.15 – Plotagem dos pontos de Ra x velocidade de avanço

Figura 7.4.16 – ANOVA de Ry x avanço por dente

Figura 7.4.17 – Plotagem dos pontos de Ry x avanço por dente

Figura 7.4.18 – ANOVA de Ry x largura de corte

Figura 7.4.19 – Plotagem dos pontos de Ry x largura de corte

Figura 7.4.20 – ANOVA de Ry x velocidade de avanço

Figura 7.4.5 – Plotagem dos pontos de Ry x velocidade de avanço

7.5 - Discussão dos Resultados

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios, é possível verificar que a variável que menos influencia na força de corte e na rugosidade da superfície usinada é v_f .

Mesmo sendo a variável de menor influencia, no caso da força de corte, esta variável não deixa de ser significativa, como mostra a ANOVA (95% de confiabilidade). Já no caso da rugosidade, tanto para o parâmetro R_a quanto para o R_y , podemos verificar que v_f não é significativa, e não há necessidade de levá-la em consideração no caso de uma estimativa da rugosidade em função dos parâmetros de corte.

Para cada um dos ensaios realizados, foi levantado o espectro de frequência das forças na direção x, através da aplicação da Rápida Transformada de Fourier (FFT). No caso, era de se esperar que a frequência com maior amplitude fosse a frequência de entrada de cada um dos dentes da fresa na peça. Esta frequência pode ser calculada dividindo-se a rotação do cabeçote fresador (em rpm) por 60, e multiplicando-se o resultado pelo número total de dentes da fresa.

Pode-se observar que para todos os ensaios, exceto para as duas replicações dos ensaios 1 e 2, as frequências obtidas coincidem com as frequências esperadas. No caso dos ensaios 1 e 2, o que ocorreu foi uma falha na seleção da frequência de amostragem (de aquisição do sinal).

Esta falha ocorreu, pois havia sido criado um primeiro planejamento experimental, com valores diferentes dos parâmetros de corte, mas que não pôde ser utilizado devido às limitações do conjunto máquina-peça-ferramenta. No primeiro planejamento experimental, não havia nenhuma frequência de sinal que ultrapassasse os 300 Hz, sendo que foi selecionada então uma frequência de amostragem de 600 Hz, (de acordo com a teoria de amostragem, que diz que para que se consiga reconstruir o sinal original, a frequência de amostragem deve ser de pelo menos 2 vezes a frequência do sinal). O problema é que quando o planejamento experimental foi alterado, os dois

primeiros ensaios passaram a ter uma frequência de 416 Hz, devido ao aumento da velocidade de corte, sendo que assim a teoria da amostragem passou a não ser mais obedecida.

Comparando-se os dados de rugosidade R_y obtidos com a fórmula teórica da equação 15, podemos observar que para os ensaios nos quais o f_z estava em seu nível mais baixo, 0,05mm, a teoria se aplica bem, sendo que os resultados obtidos ficaram em média 50% maiores do que os teóricos. Isso se deve às interferências do processo, tais como diferença no posicionamento das arestas de corte e excentricidade do eixo árvore.

Porém, para os ensaios em que o f_z estava em seu nível mais alto, 0,17mm, pôde-se observar que o valor obtido foi de aproximadamente 1/3 do valor teórico, o que pode ter sido causado por alguma interação entre os fatores de interferência.

Pôde-se observar também, que a tendência de variação das forças de corte em relação à variação dos parâmetros de corte é acompanhada pela rugosidade, sendo que assim podemos concluir que estas duas grandezas são diretamente proporcionais, dentro do intervalo do estudo realizado.

7.6 - Aplicação Prática dos Resultados

Para que se fosse possível comprovar na prática os resultados obtidos nos ensaios em laboratório, e confirmar realmente que v_f é a variável que menos influencia na força de corte, foi desenvolvido um arranjo experimental para a Fresadora de Bordas da TenarisConfab, no qual v_f foi alterado, mantendo os outros parâmetros constantes, sendo que foram realizadas medidas indiretas da força de corte através da corrente consumida pelos motores dos eixos-árvore. Isso porque não é possível extrapolar os resultados obtidos em laboratório para o caso prático, sem a realização de ensaios nas condições reais. Além disso, foi medida a vibração dos cabeçotes, para identificação de qualquer limitação estrutural do equipamento e seu estado operativo (**Montenegro, 2007**), e foi realizada inspeção do dimensional e da qualidade dos chanfros, para garantir que não haveria impacto na qualidade do produto.

A proposta foi aumentar a velocidade de avanço da mesa (reduzir o tempo de ciclo) sem aumentar significativamente a força de corte. Para isso, manteve-se o avanço por dente (f_z) constante. Para que o aumento de v_f não gerasse um aumento de f_z , foi também aumentada a rotação dos cabeçotes proporcionalmente à equação abaixo:

$$v_f = n \cdot Z \cdot f_z \quad (65)$$

onde:

n = rotação dos cabeçotes (RPM)

Z = número de dentes do cabeçote

Para manter a largura de corte (a_e) constante, a largura real de cada chapa foi medida antes do processo, sendo que a largura de corte foi configurada para que a sobre-largura fosse de 2mm de cada lado em todos os ensaios.

Assim, foram realizados 12 ensaios, com chapas para a fabricação de tubos de 38” x 0,875” grau X70, os quais podem ser observados na tabela abaixo:

Tabela 7.6.1 – Arranjo Experimental

<i>Ensaio</i>	<i>Tubo</i>	v_c (m/min)	n (rpm)	f_z (mm/dente*rotação)	v_f (mm/min)	a_e (mm)
1 (Controle)	97107	290	92	5,2	12500	2
2	97112	295	94	5,2	12700	2
3	97106	299	95	5,2	12900	2
4	97102	304	97	5,2	13100	2
5	97103	309	98	5,2	13300	2
6	97099	313	100	5,2	13500	2
7	97098	313	100	5,2	13500	2
8	97105	309	98	5,2	13300	2
9	97113	304	97	5,2	13100	2
10	97101	299	95	5,2	12900	2
11	97108	295	94	5,2	12700	2
12 (Controle)	97104	290	92	5,2	12500	2

As medições de corrente dos motores foram feitas através de um registrador gráfico HIOKI 8835, enquanto as medições de vibração foram realizadas por uma empresa terceirizada especializada em Manutenção Preditiva.

Os resultados de cada ensaio podem ser visualizados abaixo:

Figura 7.6.1 – Ensaio 1

Figura 7.6.2 – Ensaio 2

Figura 7.6.3 – Ensaio 3

Figura 7.6.4 – Ensaio 4

Figura 7.6.5 – Ensaio 5

Figura 7.6.6 – Ensaio 6

Figura 7.6.7 – Ensaio 7

Figura 7.6.8 – Ensaio 8

Figura 7.6.9 – Ensaio 9

Figura 7.6.10 – Ensaio 10

Figura 7.6.11 – Ensaio 11

Figura 7.6.12 – Ensaio 12

Para a análise de vibração, foram levantados os valores globais (aceleração) para cada ensaio, sendo que os resultados encontrados se encontram no gráfico abaixo:

Figura 7.6.13 – Resultados da Análise de Vibração

Abaixo se encontra uma tabela com o resumo dos resultados dos ensaios:

Tabela 7.6.2 - Resultados dos ensaios de comprovação

Ensaio	v_c (m/min)	v_f (mm/min)	a_e (mm)	% Carga	Vibração (m/s²)
1 (Controle)	290	12500	2	34	9,178
2	295	12700	2	33	10,322
3	299	12900	2	37	10,456
4	304	13100	2	37	8,555
5	309	13300	2	37	9,012
6	313	13500	2	36	9,132
7	313	13500	2	37	9,907
8	309	13300	2	37	10,483
9	304	13100	2	35	10,246
10	299	12900	2	35	8,226
11	295	12700	2	34	8,424
12 (Controle)	290	12500	2	35	7,750

Tabela 7.6.3 - % Carga dos Motores dos Cabeçotes

v_f (mm/min)	Replicação 1	Replicação 2	Média	Desvio Padrão	T-student (20%, 2 caudas)
12500	34	35	34,5	0,7	1,3
12700	33	34	33,5	0,7	1,3
12900	37	35	36	1,4	2,6
13100	37	35	36	1,4	2,6
13300	37	37	37	0,0	0,0
13500	36	37	36,5	0,7	1,3

Tabela 7.6.4 – Vibração dos Cabeçotes

v_f (mm/min)	Replicação 1	Replicação 2	Média	Desvio Padrão	T-student (20%, 2 caudas)
12500	9,178	7,75	8,464	1,0	1,9
12700	10,322	8,424	9,373	1,3	2,5
12900	10,456	8,226	9,341	1,6	2,9
13100	8,555	10,246	9,4005	1,2	2,2
13300	9,012	10,483	9,7475	1,0	1,9
13500	9,132	9,907	9,5195	0,5	1,0

Foi realizada uma análise da variação percentual da porcentagem de carga nos motores dos cabeçotes e dos valores globais de vibração, entre os ensaios com $v_f = 12500$ e $v_f = 13500$ mm/min (os dois extremos), sendo que os resultados podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 7.6.5 – Variabilidade dos resultados

Parâmetro	<i>Min</i>	Med	<i>Max</i>
% Carga	0%	6%	14%
Vibração	0%	12%	60%

No caso da porcentagem de carga dos motores, podemos perceber que a variação média é bem pequena, e considerando o desvio padrão dos ensaios, pode ser até nula.

No caso da análise de vibração, que foi obtida no ponto de acoplamento do motor com o redutor do cabeçote fresador, segundo laudo fornecido para empresa especializada em Manutenção Preditiva, *“o mesmo não apresentou níveis considerados de grande incremento ou fora da faixa admissível de seu funcionamento. De acordo com os resultados obtidos durante as medições ficou confirmado que o projeto de aumento da produção não oferecerá influência negativa nas condições de trabalho do equipamento.”*

8 - CONCLUSÕES

O dinamômetro foi projetado utilizando-se as restrições impostas pela sua aplicação, sendo que desta forma foram encontradas as dimensões ideais para as células de carga. A construção do dinamômetro seguiu as recomendações dos procedimentos de instrumentação das células de carga para que se pudesse garantir a sua precisão. Os resultados obtidos nos ensaios demonstraram que o dinamômetro possui precisão suficiente para que estudos sobre as forças de corte envolvidas no processo de fresamento sejam realizados.

Os ensaios foram realizados, sendo que, com os mesmos foi possível determinar que o parâmetro que mais influencia, tanto na força de corte quanto na rugosidade da superfície usinada é o avanço por dente, seguido pela largura de corte, sendo que a velocidade de avanço é o parâmetro que menos influencia estas duas grandezas.

O método de regressão linear múltipla se mostrou uma ferramenta muito útil na análise dos dados obtidos, aliando simplicidade de aplicação e coerência com os dados reais, o que pôde ser observado através da aplicação dos resultados obtidos no processo real, sendo que o comportamento previsto pelo modelo foi reproduzido.

A partir dos resultados dos ensaios no equipamento real, conclui-se que o aumento da velocidade de avanço da mesa não influencia significativamente a força de corte exigida dos cabeçotes fresadores.

Além disso, a condição de trabalho do equipamento com velocidades mais altas se encontra dentro de padrões aceitáveis de vibração, o que pode ser confirmado pelos dados de vibração coletados durante os ensaios.

Assim, conclui-se que é possível trabalhar com uma velocidade de avanço de 13.500 mm/min, sendo que desta forma o tempo de ciclo é diminuído em 4 segundos.

Portanto, conclui-se que o trabalho obteve êxito no propósito de aumentar a produtividade da Fresadora de Bordas através da otimização dos parâmetros de corte.

9 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Correlacionar o desgaste da ferramenta com as forças de corte e com a rugosidade da superfície usinada;
- Otimização dos parâmetros de corte objetivando o aumento da vida da ferramenta, sem comprometer a produtividade;
- Determinar parâmetros objetivos como critério de fim de vida da ferramenta, a ser utilizado pelos operadores no ambiente fabril;
- Medir as tensões residuais da superfície usinada e correlacioná-la com os parâmetros de corte;
- Comparar as respostas dinâmicas do dinamômetro construído com um dinamômetro comercial.

10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Almeida, 1996) – ALMEIDA, P. A. O – **Extensometria Elétrica 1 – Notas de Aula** – EPUSP – São Paulo, 1996

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

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

(Blank, 1980) – Blank, L. – **Statistical Procedures for Engineering, Management and Science**, McGraw-Hill Book Company, New York, 1980.

(Cook e Rabinowicz, 1963) – Cook, N. H., Rabinowicz, E. – **PHYSICAL MEASUREMENT AND ANALYSIS** – Addison-Wesley, Chapter Five, 1963.

(Dally, 1978) – Dally, J. W. – **Experimental Stress Analysis** – McGraw-Hill, 1978.

(Diniz, 2006) - DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. - **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, Artliber editora, São Paulo, Brasil, 2006.

(Excelsensor, 2005) – www.excelsensor.com.br

(FEM.UNICAMP, 2005) - <http://www.fem.unicamp.br/instmedCGI.htm>

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

(Montenegro, 2007) – Montenegro, L. – **Manutenção e Análise Vibratória**, Centro de Capacitação e Investigación em Vibraciones, segunda edição, La Plata, 2007.

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

(Saglam e Unuvar, 2001) – Saglam, H., Unuvar, A. – **THREE-COMPONENT, STRAIN GAGE BASED MILLING DYNAMOMETER DESIGN AND MANUFACTURING** – Journal of Integrated Design and Process Science, Vol. 5, N° 2, pp 95-109, 2001.

(Sandvik, 2005) – Sandvik Coromant – **Manual Técnico de Usinagem**, Elanders, Suécia, 2005.

(Shaw, 2005) – Shaw, M. C. – **Metal Cutting Principles** – Oxford University Press, Inc., 2nd ed., 2005.

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

(Tenaris, 2007) - <http://www.tenaris.com/TenarisConfab/pt>

(Teses.USP, 2005) - http://www.teses.usp.br/tesesdisponiveis/33132_tde_23072003_135507publico09_Capitulo_3___Rugosidade

11 - ANEXOS

Anexo 1 – Memorial de Cálculo Células de Carga

As células de carga foram dimensionadas de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4. Os dados de partida para o dimensionamento foram os seguintes:

- Tensão de fundo de escala: 2mV/V
- Força axial máxima: 3000 N

O esquema de instrumentação dos *strain gages* de medição das forças axiais está mostrado na figura a seguir:

Figura 11.1.1 – Esquema Célula de Carga

Os sinais destes *strain gages* estão ligados em Ponte de Wheatstone, sendo que este esquema pode ser visto na figura abaixo:

Figura 11.1.2 – Ligação em Ponte

Assim, utilizando a equação da Ponte de Wheatstone, temos que:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{K}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4]$$

Assumindo que o K do strain gage utilizado é igual a 2, e que $\Delta V/V$ é igual a 2 mV/V, temos que:

$$2 \times 10^{-3} = \frac{2}{4} 4\varepsilon \longrightarrow \varepsilon = 1000 \times 10^{-6} \mu d \text{ (micro-deformações)}$$

Como pela equação 53 temos que:

$$\varepsilon_{90^\circ} = 1,09 \frac{Fr}{Ebt^2}$$

E para o aço utilizado na fabricação das células de carga $E = 210 \text{ GPa}$, então:

$$1000 \times 10^{-6} = 1,09 \cdot \frac{3000 \cdot r}{210000 \cdot b \cdot t^2}$$

Assim, foram selecionados valores que satisfizessem à equação acima, que com seus devidos arredondamentos, foram:

- Raio (r) = 40 mm
- Largura (b) = 25 mm
- Espessura (t) = 5 mm

Anexo 2 – Desenhos de Fabricação do Dinamômetro

Figura 11.2.1 – Desenho de Fabricação da Base de Apoio

Figura 11.2.2 – Desenho de Fabricação da Mesa de Trabalho

Figura 11.2.3 – Desenho de Fabricação das Células de Carga