

ESTUDO DAS FORÇAS DE CORTE NO PROCESSO DE CORTE DE BORDAS DE CHAPAS UTILIZADAS PARA FABRICAÇÃO DE TUBOS DE AÇO COM COSTURA

Guilherme Cruz Rossi

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – guilherme.rossi@poli.usp.br

Sérgio Delijaicov

Centro Universitário da Faculdade de Engenharia Industrial – sergiode@fei.edu.br

Éd Cláudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – ecb@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – gilmar.batalha@poli.usp.br

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 está é fundamental para a qualidade final da solda do tubo. Para isso, será construído um dinamômetro de mesa para medição das forças, e os dados serão analisados através do Método da Regressão Linear Múltipla.*

Palavras-chave: *fresamento, regressão linear múltipla, extensômetro, tubo.*

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.

Neste trabalho será estudado o processo de corte de bordas, através de uma operação de Fresamento, de chapas utilizadas para fabricação de tubos de aço com costura pelo processo ERW (Solda por Resistência Elétrica), e como os parâmetros de corte tais como avanço, velocidade e profundidade de corte podem influenciar no acabamento superficial destas bordas, que é fundamental para a qualidade final da solda Warren⁽¹⁾ e Barnes⁽²⁾.

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 ortonormais Cook⁽³⁾.

Após a construção do dinamômetro, serão feitos ensaios para correlacionar as forças de corte, os parâmetros de corte e a rugosidade da borda da chapa usinada, através de técnicas de Regressão Linear Múltipla.

3. PROJETO DO DINAMÔMETRO

O projeto do dinamômetro em questão, baseou-se no trabalho de Saglam⁽⁴⁾. Este é constituído basicamente de uma mesa, instrumentada com quatro 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 ortonormais.

A medição de força é expressa através da deformação de um material submetido a uma força, por meio de elementos de calibração (células de carga), sendo estes geralmente feitos de materiais elásticos. Quando o material é selecionado 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.

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 a 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 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 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.

O momento fletor M_θ em qualquer ponto do anel é:

$$M_\theta = M_0 + \frac{Fr}{2} \sin \theta + \frac{Pr}{2} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

A energia elástica total no anel é:

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

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

$$\left(\frac{\partial U}{\partial M_0} \right)_{\theta=0} = 0 = \frac{1}{EI} \int_0^\pi M_\theta \frac{\partial M_\theta}{\partial M_0} r \cdot d\theta \quad (3)$$

Ou

$$0 = \int_0^\pi \left[M_0 + \frac{Fr \sin \theta}{2} + \frac{Pr}{2}(1 - \cos \theta) \right] d\theta \quad (4)$$

Integrando, temos:

$$M_0 \pi + Fr + \frac{Pr \pi}{2} = 0 \quad (5)$$

$$M_0 = \frac{Fr}{2} \left(\sin \theta - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{Pr}{2} \cos \theta \quad (6)$$

Reescrevendo a Equação 1 como:

$$M_\theta = \frac{Fr}{2} \left(\sin \theta - \frac{2}{\pi} \right) - \frac{Pr}{2} \cos \theta \quad (7)$$

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

$$\sin \theta = \frac{2}{\pi} \longrightarrow \theta = 39,6^\circ \quad (8)$$

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

$$\cos \theta = 0 \longrightarrow \theta = 90^\circ \quad (9)$$

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:

$$M_{39,6^\circ} = -\frac{Pr}{2} \cos 39,6^\circ = -0,385 Pr \quad (10)$$

$$M_{90^\circ} = \frac{Fr}{2} \left(\sin 90^\circ - \frac{2}{\pi} \right) = 0,181 Fr \quad (11)$$

A deformação ε em um anel estreito é:

$$\varepsilon = \frac{6M}{Ebt^2} \quad (12)$$

Assim:

$$\varepsilon_{39,6^\circ} = 2,31 \frac{Pr}{Ebt^2} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = 1,09 \frac{Fr}{Ebt^2} \quad (14)$$

Podem-se mostrar por simetria que as Equações 5 e 6 se mantêm suficientemente constantes para todo o anel, 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.

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:

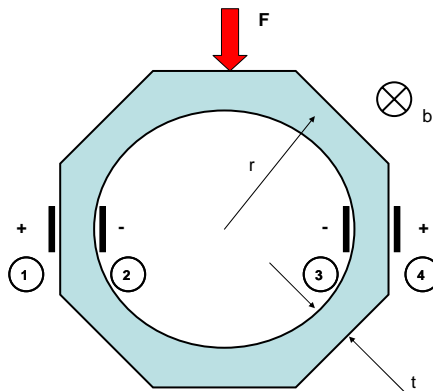


Figura 1 – Esquema Célula de Carga

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

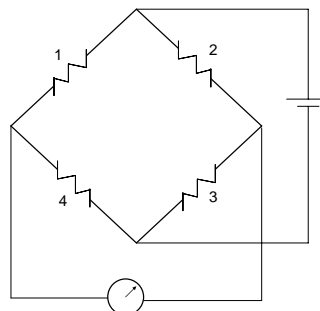


Figura 2 – Ligação em Ponte

Assim, 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 14 temos que:

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

E para o aço utilizado na fabricação das células de carga $E = 210000$ MPa, então:

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

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

4. CONSTRUÇÃO DO DINAMÔMETRO

O dinamômetro foi projetado para ter a rigidez necessária para que as vibrações do processo não influenciem as leituras de força. O material selecionado, tanto para as células de carga quanto para a base e mesa foi o aço ABNT 4340, sendo que a fixação das células de carga à base é feita por meio de parafusos M10x20 mm, DIN 912 – Classe 12,9.

Uma foto do dinamômetro pode ser vista na figura abaixo:



Figura 3 – Foto do Dinamômetro

5. 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:

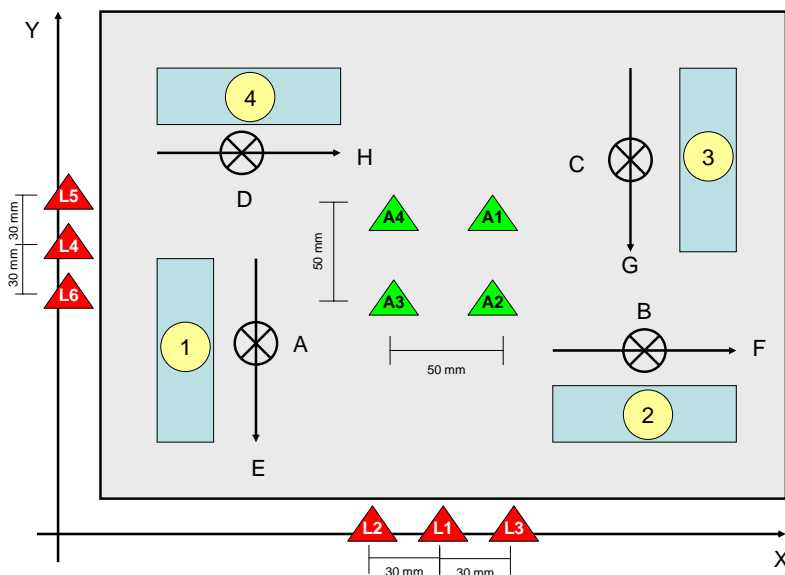


Figura 4 – Posição de aplicação das cargas de calibração

Foram então aplicadas cargas que variaram de 50 a 200 kgf, com intervalo de 50 kgf. Para cada uma das cargas, foram anotados os valores indicados por todas as células de carga em todas as direções. Para os carregamentos axiais, os dados obtidos foram os seguintes, lembrando que:

$$\left. \begin{array}{l} X = E + G \\ Y = F + H \\ Z = A + B + C + D \end{array} \right\} \quad (15)$$

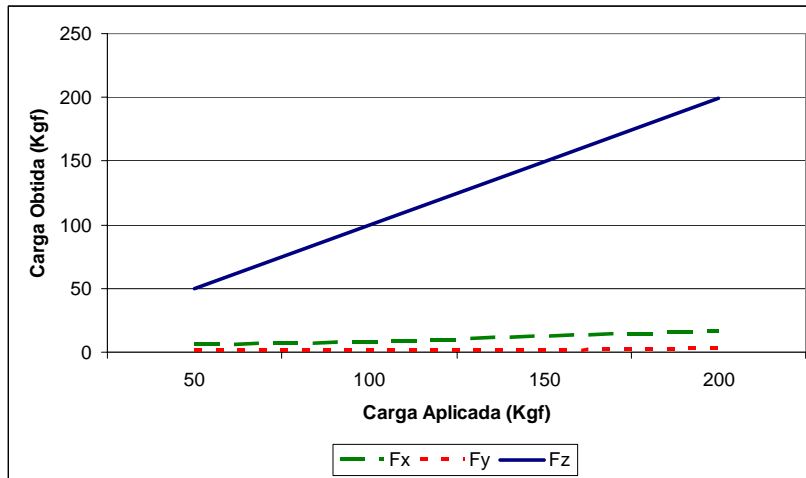


Figura 5 – Curvas de Calibração para Carregamento Axial

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

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

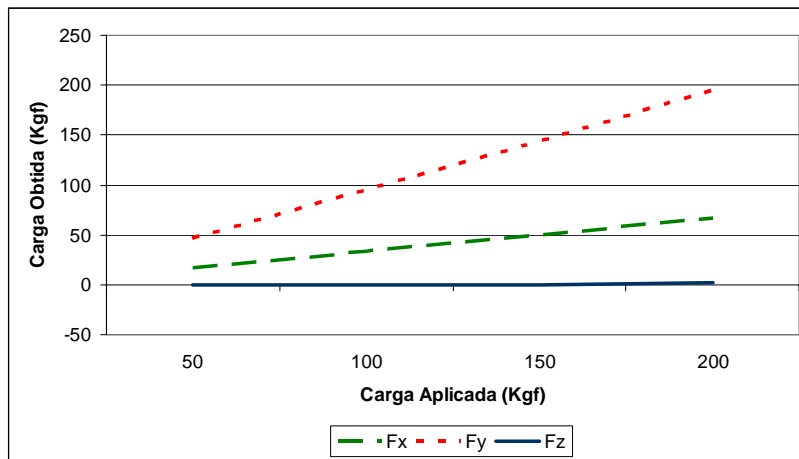


Figura 6 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (Y)

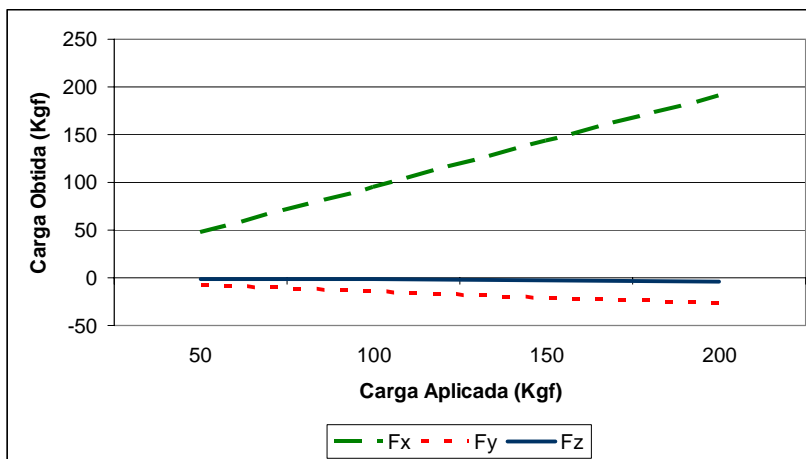


Figura 7 – Curvas de Calibração para Carregamento Lateral (X)

Novamente é possível visualizar os efeitos cruzados entre os canais. No caso, pode-se notar que a influência entre os canais laterais (F_x e F_y) é maior entre si do que entre o canal axial (F_z). 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 a disponibilização final dos dados, é necessário eliminar estes efeitos cruzados. Assim, foi desenvolvida 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:

$$\begin{cases} F_x = 1,05X - 0,3291Y - 0,1Z - 1 \\ F_y = 0,1338X + 1,0395Y - 0,042Z \\ F_z = 0,0228X - 0,04Y + 0,9524Z \end{cases} \quad (16)$$

6. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

Após a construção do dinamômetro, serão realizados vários ensaios para que se possa estudar a relação entre as forças de corte, os parâmetros de corte (rotação do fuso, avanço e profundidade de corte) e a qualidade de acabamento da borda usinada da chapa.

Basicamente, será feito um estudo estatístico do processo, sendo realizado um delineamento de ensaios fatorial, sendo utilizada 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 de corte e qualidade de acabamento da borda são as variáveis de saída.

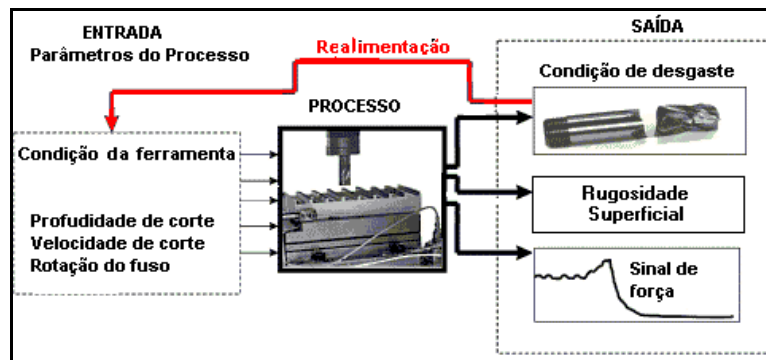


Figura 8 – Diagrama das Variáveis de Entrada e Saída do Processo de Fresamento

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

7. DADOS DA APLICAÇÃO

Será realizado um delineamento 2^k fatorial do experimento, com 3 replicações para cada combinação, que está descrito em Montgomery⁽⁵⁾.

Os três fatores a serem estudados são os seguintes:

- Avanço (f)
- Velocidade de Corte (v_c)
- Profundidade de Corte (a_p)

Para este experimento, será usado um delineamento fatorial 2^3 , que possui 8 combinações possíveis de níveis de fatores. Porém, serão feitas três replicações para cada combinação, resultando em um total de 24 ensaios. Em cada um deles será medida a rugosidade e as forças de corte.

A operação estudada será o fresamento das bordas de chapas utilizadas na fabricação de tubos de aço com costura. As bordas usinadas são as regiões que serão posteriormente soldadas, daí a importância da precisão dimensional e do acabamento superficial.

A seguir, estão listados alguns valores típicos utilizados neste processo:

- Velocidade de corte: de 250 a 300 m/min
- Avanço: de 8000 a 9000 mm/min
- Profundidade de corte: de 1 a 10 mm

A partir destes valores, serão definidos os níveis altos e baixos de cada um dos fatores, sendo então montada a tabela com as 8 combinações possíveis entre os mesmos.

8. RESULTADOS PRELIMINARES

Para validação dos dados fornecidos pelo dinamômetro, foram realizados alguns ensaios preliminares com o mesmo, nos quais foram levantadas as curvas de força nas direções X e Y. A seguir, é mostrado um trecho de um ensaio, sendo que os dados do mesmo encontram-se abaixo:

- Rotação: 1000 rpm
- Diâmetro da Ferramenta: 10 mm
- Número de Arestas de Corte: 2
- Profundidade de Corte: 3 mm
- Avanço: 90 mm/min
- Material do corpo-de-prova: SAE 1045
- Frequência de Aquisição do Sinal: 600 Hz

O esquema de posicionamento do dinamômetro em relação ao corte é o seguinte:

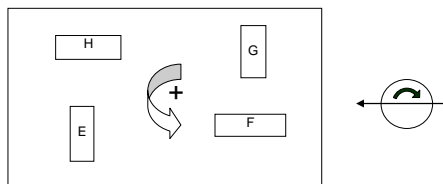


Figura 9 – Esquema de posicionamento do dinamômetro

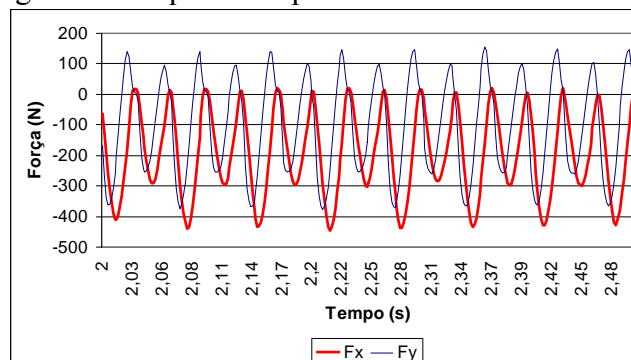


Figura 10 – Força de Corte em Função do Tempo

9. CONCLUSÃO

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.

A partir da construção do dinamômetro e da realização dos primeiros ensaios para medição de forças, pode-se concluir que será possível atingir os resultados esperados para este trabalho, que são as correlações das forças de corte e do acabamento superficial com os parâmetros de corte.

10. REFERÊNCIAS

1. Warren, L. **Skelp edge preparation for manufacturing ERW pipe**. The Tube & Pipe Journal, **2001**.
2. Barnes, A. B. **Skiving strip edges for tube and pipe producing**. The Tube & Pipe Journal, **2001**.
3. Cook, N. H., Rabinowicz, E. **Physical Measurement and Analysis**. Addison-Wesley, Chapter Five, **1963**.
4. Saglam, H., Unuvar, A. **Three-Component, Strian Gage Based Milling Dynamometer Desing and Manufacturing**. Journal of Integrated Design and Process Science, Vol. 5, Nº 2, pp 95-109, **2001**.
5. Montgomery, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. New York: Wiley, Fourth Edition, p. 572-615, 2001.

STUDY OF THE CUTTING FORCES IN THE EDGE MILLING PROCESS FOR WELDED PIPES MANUFACTURING

Guilherme Cruz Rossi

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – guilherme.rossi@poli.usp.br

Sérgio Delijaicov

Centro Universitário da Faculdade de Engenharia Industrial – sergiode@fei.edu.br

Éd Cláudio Bordinassi

Instituto Mauá de Tecnologia – ecb@maua.br

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – gilmar.batalha@poli.usp.br

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 will be fabricated a dynamometer, and the data will be analyzed by the Multiply Linear Regression Method.*

Key-words: *milling, multiply linear regression, strain gage, pipe.*