

ANÁLISE DA LAMINAÇÃO A QUENTE DE PLANOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS¹

Fernando Araújo Laudares⁽²⁾

Everaldo Antônio Caldeira⁽³⁾

Antônio Eustáquio de Melo Pertence⁽⁴⁾

Maria Teresa Paulino Aguiar⁽⁵⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽⁶⁾

RESUMO:

A laminação é um dos mais importantes processos de conformação utilizado na indústria. Apesar de sua importância, a previsão de valores de tensão e deformação envolvidos ainda não está completamente dominada. O método dos elementos finitos pode permitir tal previsão. Neste trabalho, o processo de laminação a quente foi simulado isotermicamente, através do método dos elementos finitos. Foi abordada uma operação de desbaste de placas de aço AISI 1015 e obtidos o perfil de deformação no produto, a distribuição de tensão nos cilindros ao longo do processo, a distribuição de deformação ao longo da chapa e a posição do plano neutro em relação ao arco de contato.

PALAVRAS-CHAVE: LAMINAÇÃO A QUENTE, ELEMENTOS FINITOS

¹ *Contribuição técnica a ser apresentada no 41º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 28 de outubro de 2004, Joinville - SC.*

² *Estudante de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. fal@campus.cce.ufmg.br*

³ *Engenheiro Metalúrgico, Especialista de Desenvolvimento de Produto – Divisão de Metalurgia - CST, Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. caldeira@tubarao.com.br*

⁴ *Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. pertence@demec.ufmg.br*

⁵ *Dr., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. teresa@demc.ufmg.br*

⁶ *Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte - MG. psetlin@demet.ufmg.br*

1 – INTRODUÇÃO

A laminação de chapas consiste na deformação plástica de metais através de sua passagem entre dois cilindros que giram a velocidade constante. O processo tem por fim produzir uma redução uniforme de espessura do aço e ao mesmo tempo melhorar as propriedades mecânicas do produto. É muito utilizado na prática por proporcionar alta produtividade e um controle dimensional bastante preciso. Na laminação, o material está sujeito a altas tensões compressivas, resultantes da ação dos cilindros, e a tensões cisalhantes superficiais provenientes do atrito entre o material e os cilindros de laminação.

Apesar de ser um dos mais importantes processos de conformação utilizados pela indústria, a previsão de valores de deformação e de tensões no material sob processo e nos cilindros, assim como dos valores de carga envolvidos ainda não está completamente dominada ⁽¹⁾.

Na laminação de placas, o fluxo de metal se dá em três dimensões. O material sendo laminado é alongado na direção de laminação e lateralmente na direção da largura. O alargamento aumenta com a redução de espessura, com o atrito na interface, com a diminuição da razão largura-espessura e com o aumento da razão diâmetro do cilindro-espessura da placa. As arestas livres tendem a tornar-se mais convexas com o aumento da redução e com o atrito na interface ⁽²⁾. O efeito de alargamento pode ser evitado através do uso de cilindros laterais que impeçam esse fluxo. Neste trabalho, a laminação será tratada em duas dimensões e, portanto, o alargamento será ignorado.

Estimativas de cargas de laminação podem ser obtidas através de análises que consideram compressão homogênea no estado plano, obtendo-se equações que possibilitam o cálculo das cargas envolvidas no processo ⁽¹⁾. Equações empíricas são também utilizadas, como, por exemplo, as equações de Ekelund e Orowan-Pascoe. Os valores obtidos pelas diversas abordagens freqüentemente não coincidem, e devem ser calibrados frente a resultados experimentais ⁽³⁾.

O atrito entre a superfície do metal e os cilindros de laminação têm grande influência sobre o processo, e é necessário para que os cilindros consigam laminar a placa. Uma fração das cargas de laminação vem desse mesmo atrito. Os valores do coeficiente de atrito podem variar de ponto a ponto ao longo do arco de contato nos cilindros. É difícil avaliar esta variação, e todas as teorias admitem um coeficiente constante. Para a laminação a quente é comum o coeficiente variar de 0,2 à condição de agarramento ⁽¹⁾.

A velocidade da chapa varia ao longo do processo. Sabe-se que a velocidade à entrada do cilindro é menor que a velocidade periférica dos cilindros, que por sua vez, é menor que a velocidade de saída do produto. A partir destes dados, conclui-se que existe uma região da zona de deformação, onde a velocidade da chapa se iguala à velocidade periférica dos cilindros. Esta zona é comumente denominada

de plano neutro, e o ângulo correspondente a este plano, de ângulo-neutro (α_N). Comumente calcula-se este ângulo através da seguinte equação ⁽³⁾:

$$\alpha_N = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

onde μ é o valor do coeficiente de atrito entre a placa e os cilindros e α é o ângulo do arco de contato.

Como visto, apenas na região do plano neutro a velocidade periférica do cilindro coincide com a do metal sendo laminado. Conclui-se, portanto, que existe na região de deformação, movimento relativo entre a peça e o cilindro, o que leva a tensões de atrito e à formação de regiões e fluxo restringido, que provocam uma heterogeneidade de deformação. Além disso, a distribuição de deformações ao longo da espessura da placa, depende da relação entre a espessura inicial da placa (h_i) e o comprimento da zona de deformação (L). A deformação no centro da espessura da chapa será maior que nas regiões mais próximas às bordas se essa relação for menor ou igual que 0,60, ocorrendo o inverso se esse valor for maior ou igual a 0,65 ⁽³⁾.

O método de elementos finitos é uma técnica poderosa, utilizada para a determinação de tensões e deformações em estruturas complexas demais para serem analisadas por métodos estritamente analíticos. As primeiras investigações em problemas de conformação mecânica são do final da década de 60/início da década de 70, conduzidas por Zienkiewicz et al ⁽⁴⁾ e Lee & Kobayashi ⁽⁵⁾. O método consiste na divisão da estrutura (domínio) em uma rede de pequenos elementos (subdomínios), conectados uns com os outros em nós, com graus finitos de liberdade, permitindo a elaboração de equações que associam os esforços aplicados à mudança de posição dos mesmos ⁽¹⁾. A solução do problema envolve a utilização/cálculo de matrizes de rigidez para cada elemento da peça em estudo que, por sua vez, são unidos em uma matriz de rigidez geral da estrutura.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Material – Para a chapa a ser laminada, foi utilizada a curva tensão-deformação do aço carbono AISI 1015, a uma temperatura de 1200 °C, proveniente da biblioteca de materiais do programa utilizado. A figura 1 mostra esta curva. Sabe-se que na temperatura de laminação o material está completamente austenítico, e desta forma, sua curva tensão-deformação deveria exibir um pico característico da recristalização dinâmica, que é mostrado de forma muito suave na figura 1. Por outro lado, tais curvas são usualmente obtidas por compressão ou torção a quente, que correspondem a situações muito diferentes dos estados complexos de tensão e deformação existentes na laminação. Além disso, ignora-se o efeito do caminho de deformação (strain-path) sobras as curvas em discussão ⁽⁶⁾. Face a esta complexa situação, optou-se, neste trabalho, pela adoção preliminar da curva mostrada na figura 1.

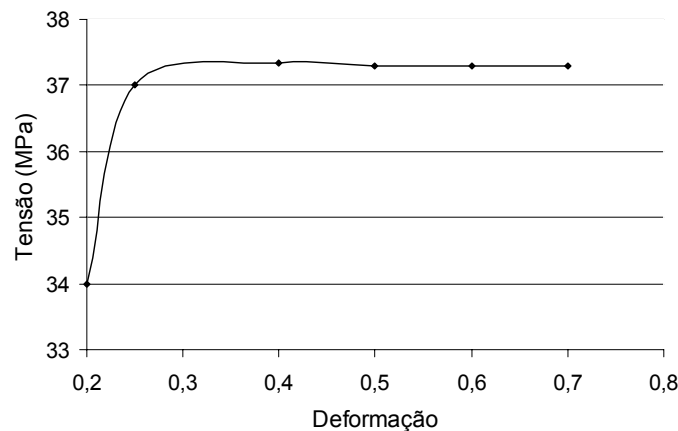


Figura 1 – Curva do aço AISI 1015 a 1200 °C, utilizada durante as simulações.

Para a análise de tensões geradas nos cilindros durante o processo, os mesmos foram considerados em regime elástico, com Módulo de Young de 210GPa e Coeficiente de Poisson de 0,3.

Geometrias – Foi simulado o primeiro passe da laminação de desbaste de placas. As geometrias da chapa e dos cilindros seguem as dimensões aproximadas fornecidas pela Companhia Siderúrgica Tubarão (CST). A espessura inicial das placas é de 225mm com um comprimento de 2000mm. Os cilindros possuem diâmetro de 1200mm. A redução de espessura foi de 25%.

Simulação Numérica – As simulações numéricas foram realizadas considerando condições isotérmicas em estado plano de deformações através do software comercial DEFORM 2D (Scientific Forming Technology Corporation). O número de passos das simulações foi de 1000, sendo o tempo por passo de 1s. As placas a serem laminadas foram consideradas no estado plástico enquanto os cilindros foram inicialmente considerados rígidos. A malha foi gerada automaticamente com

1000 elementos de quatro nós, pelo pré-processador do programa. A velocidade de rotação dos cilindros foi 50 rpm. Utilizaram-se valores de coeficiente de atrito μ , entre os cilindros e as placas, de 0.3. Outros valores de números de elementos e coeficientes de atrito foram testados, não havendo grandes diferenças nos resultados encontrados. A figura 2 mostra exemplos de geometria inicial e durante a simulação.

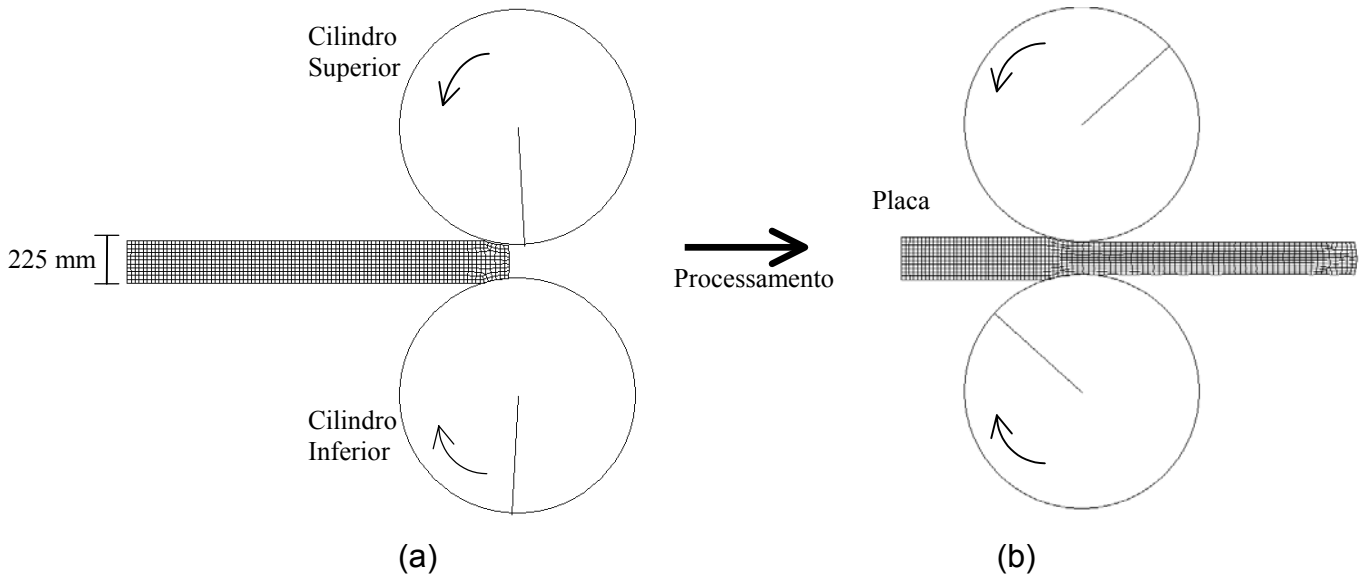


Figura 2 – Exemplos de geometria (a) inicial e (b) durante o processamento

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se através das simulações a deformação efetiva resultante no produto da laminação. Podem-se perceber três diferentes regiões, a de entrada, a de saída e a central, onde há uma maior uniformidade da deformação. A figura 3 mostra estas diferentes regiões.

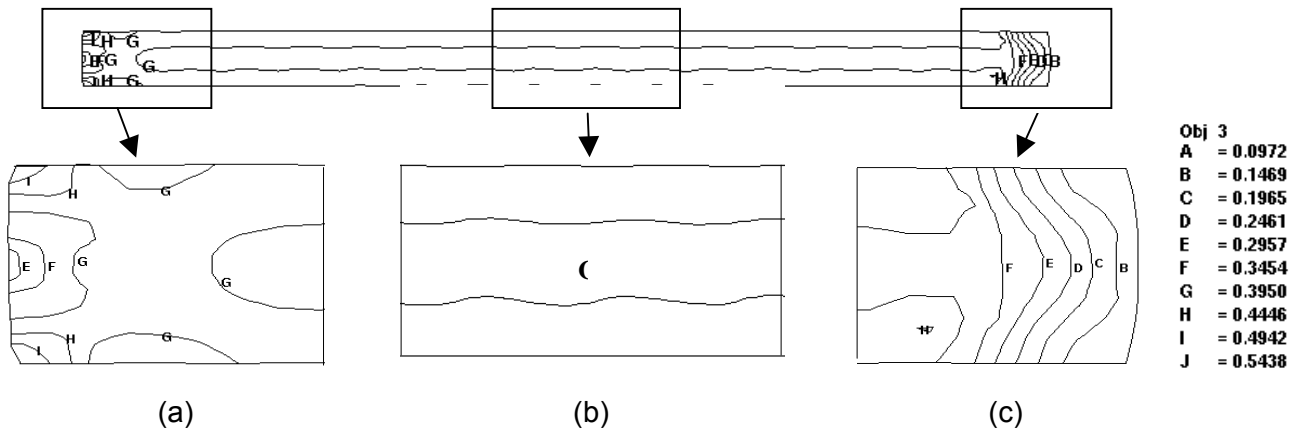


Figura 3 – Diferentes regiões de deformação no produto da laminação, (a) saída, (b) região central e (c) entrada.

Na figura 4 é mostrado o perfil de deformação efetiva obtido em simulação numérica, para a região central ao longo do comprimento da placa onde o processo é mais uniforme. Para a geometria utilizada, a relação entre a espessura inicial da placa (h_i) e o comprimento da zona de deformação (L) é de aproximadamente 1,2. Pode-se perceber que a região próxima à superfície sofreu uma deformação aproximadamente 5% maior que a da região central. Observa-se que a superfície do material deformou-se menos que a camada um pouco abaixo da superfície. Atribui-se este efeito à presença de regiões de fluxo restringido causadas pelo atrito entre o cilindro e o material.

Seção analisada

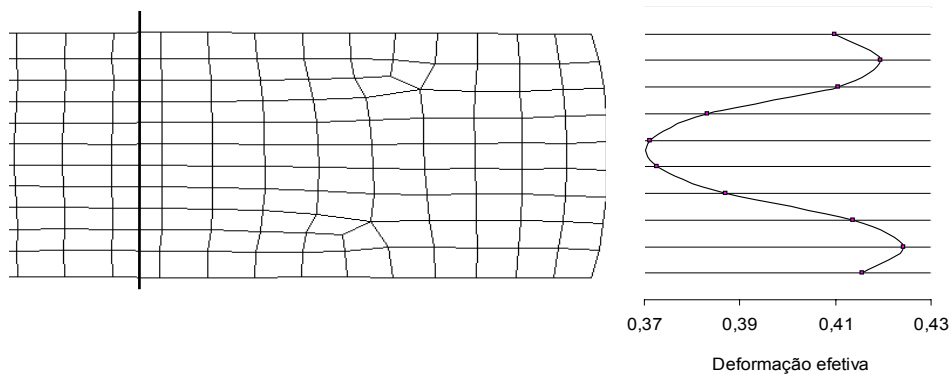


Figura 4 – Perfil de deformação efetiva do produto de laminação

Também foram analisadas as tensões sobre os cilindros de laminação durante o processo. Para tal análise, considerou-se que a fixação dos cilindros se dava através de seus centros e que os cilindros comportam-se elasticamente. A figura 5 mostra, através de curvas de contorno, as tensões na direção Y agindo sobre o cilindro. Os valores na região da área de contato podem ser vistos em detalhe.

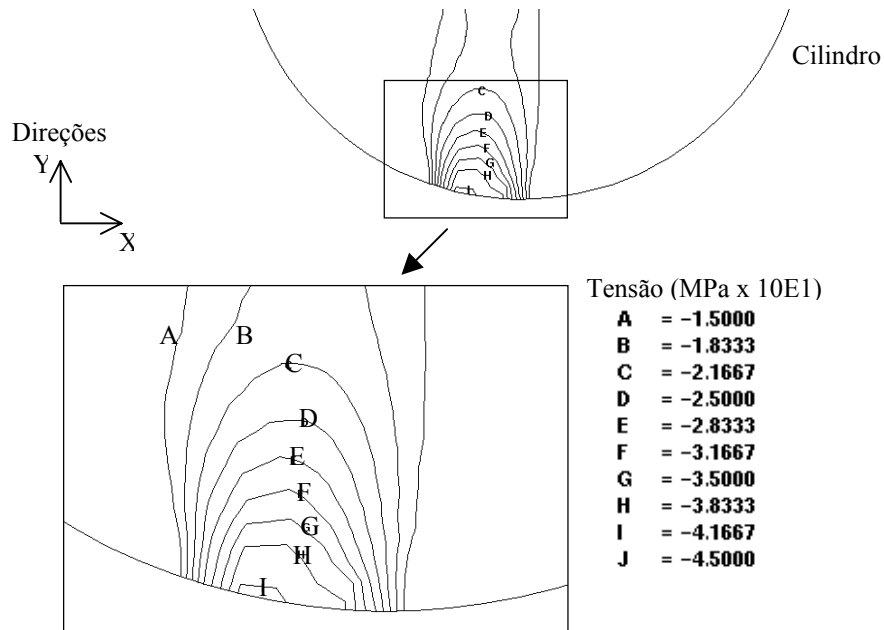


Figura 5 – Distribuição de tensões na direção Y ao longo do cilindro de laminação, durante o processo

As tensões na área de contato foram analisadas com maior detalhe. O gráfico mostrado na figura 6 relaciona o ângulo do arco de contato entre os cilindros e a chapa em processo com as tensões efetivas e na direção Y, para o cilindro superior. O maior valor de tensão na direção Y se dá em um ângulo de aproximadamente 15°.

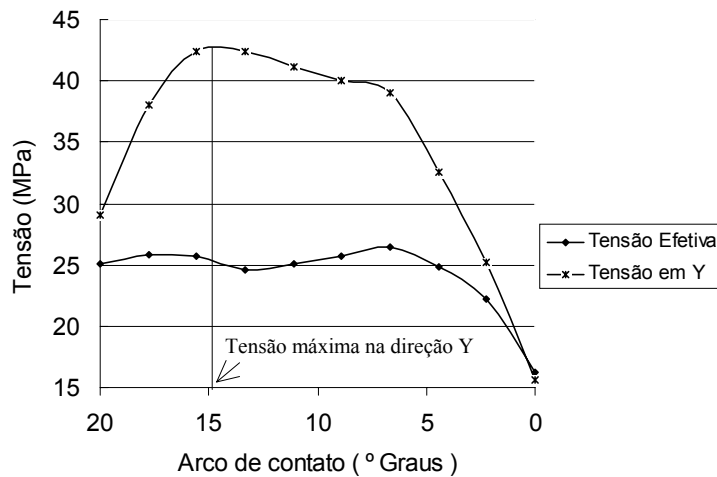


Figura 6 – Tensões Efetiva e na direção Y, na região de contato entre a chapa e o cilindro

O valor de carga nos cilindros na direção Y foi de 8000 N e o torque de 0,76 M Nmm, para cada mm de largura da placa, o que leva a uma carga de 8,7 MN e a

uma potência de aproximadamente 5800 cv para laminar uma placa com 1083mm de largura.

Na figura 7, pode-se ver a relação entre as velocidades da chapa e do cilindro na direção X e o ângulo do arco de contato entre o cilindro e a chapa. O ângulo em que ocorre o cruzamento entre as curvas de velocidade da superfície do cilindro e as regiões da placa, indica a posição do plano neutro. Para a condição simulada, o plano situa-se a aproximadamente 13° (α_N) do início do arco de contato.

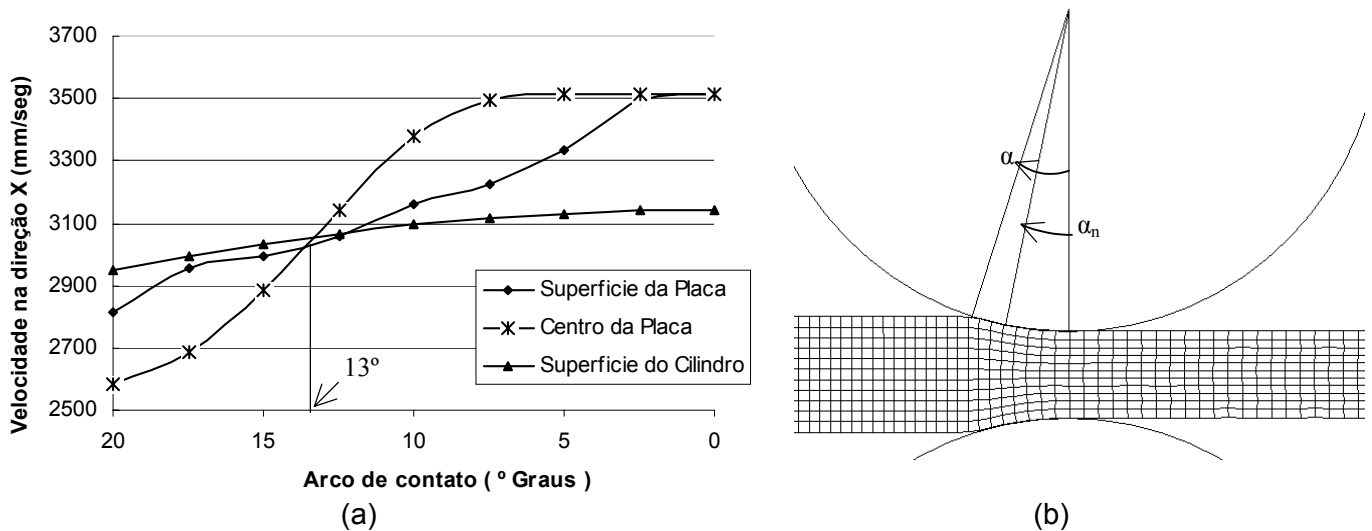


Figura 7 – (a) Variação da velocidade na direção X em relação ao ângulo do arco de contato entre chapa e cilindro e (b) ângulo do arco de contato (α) e ângulo do plano neutro (α_n)

O valor de α_N também pode ser calculado analiticamente através da equação que é apresentada na revisão bibliográfica. O ângulo calculado usando-se esta equação é de $4,2^\circ$, resultado que difere do encontrado através do gráfico da figura 7.

4 – CONCLUSÕES

- O perfil de deformação varia ao longo do comprimento da chapa laminada, apresentando regiões de transição no início e final do processo. Na região de regime uniforme, a maior deformação encontra-se abaixo da superfície, o que para a relação $(h_i)/(L)$ apresentada, está em conformidade com a teoria.
- A localização da região do plano neutro e da região de maior sollicitação na direção Y, encontrada através de simulação, são aproximadamente coincidentes. Ambas situando-se em ângulos próximos de 15° .

- Os valores do ângulo neutro, encontrados de forma analítica e através das simulações não são coincidentes. O primeiro tem um valor de 4,2° e o segundo de 15°.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, à CAPES e ao PRONEX/MCT pelo apoio financeiro. Os autores são gratos também à Companhia Siderúrgica Tubarão pelos dados relativos às geometrias do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - DIETER, G.E. *Mechanical Metallurgy*. 2 ed. London: McGraw-Hill, 1988. 751p.
- 2 - ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H. *Conformação de Metais – Fundamentos e Aplicações*. 1 ed. São Carlos: EESC-USP, 1999. 366p.
- 3 - HELMAN, H., CETLIN, P.R. *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2 ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993. 170p.
- 4 - ZIENKIEWICZ, O.C., VALLIAPPAN S., KING I.P. Elasto Plastic Solutions of Engineering Problems Initial Stress Finite Element Approach. *International Journal of Numerical Methods for Engineering*, v. 1, p. 75-100, 1969
- 5 - LEE C., KOBAYASHI S. Elasto Plastic Analysis of Plane-Strain and Axisymmetric Flat Punch Indentation by the Finite Element Method, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 12, p. 349-370, 1970.
- 6 - PINHEIRO, I. P., BARBOSA, R.A.N.M., CETLIN, P.R. The Effect of Cyclic Torsion on the Hot Dynamic Restoration of Interstitial Free Steel in The Austenitic Range. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 125-126, p.125-129, 2002.

THE ANALYSIS OF FLAT HOT ROLLING THROUGH THE FINITE ELEMENTS METHOD¹

Fernando Araújo Laudares⁽²⁾

Everaldo Antônio Caldeira⁽³⁾

Antônio Eustáquio de Melo Pertence⁽⁴⁾

Maria Teresa Paulino Aguiar⁽⁵⁾

Paulo Roberto Cetlin⁽⁶⁾

Abstract:

Rolling is one of the most important forming processes used in the industry. Despite its importance, the prediction of the values of stresses and deformation is still not completely dominated. The finite element method can allow such predictions. In this work, the rolling process was simulated isothermally, through the finite element method. The simulation of roughing rolling pass of an AISI 1015 steel slab was completed. The profile of deformation in the product, the distribution of stresses in the cylinders, the distribution of deformation along of the plate and the position of the neutral plan in relation to the contact arc were determined.

Key words: Hot Rolling, Finite Elements

¹ *Technical contribution to be presented in the 41st Seminar on Rolling: Processes and Products, 26 to 28 October 2004, Joinville, SC*

² *Mechanical Eng. Student, School of Engineering - UFMG, Belo Horizonte - MG. fal@campus.cce.ufmg.br*

³ *Metallurgical Eng., Product Development Specialist Metallurgy Division, CST, Master's Student, Pos-Graduate Course on Metallurgical Engineering, School of Engineering – UFMG, Belo Horizonte - MG. caldeira@tubarao.com.br*

⁴ *Dr., Associate Prof, Dept. of Mechanical Eng., School of Engineering - UFMG, Belo Horizonte - MG. pertence@demec.ufmg.br*

⁵ *Dr., Associate Prof., Dept. of Materials and Construction, School of Engineering - UFMG, Belo Horizonte - MG. teresa@demc.ufmg.br*

⁶ *Dr., Professor, Dept. of Metallurgical and Material Eng., School of Engineering - UFMG, Belo Horizonte - MG. pcetlin@demet.ufmg.br*