

# **MODELAMENTO E SIMULAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO GERADA NO ARCO DE CONTATO NA LAMINAÇÃO A FRIO DE CHAPAS DE ALUMÍNIO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

**Cheong Fai Tong**

EEIMVR-UFF, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores nº 420, cep 27.255-125, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, cheong@metal.eeimvr.uff.br

**Jayme Pereira de Gouvêa**

EEIMVR-UFF, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores nº 420, cep 27.255-125, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, jpg@metal.eeimvr.uff.br

**Resumo:** O presente trabalho trata do modelamento matemático e simulação numérica do processo de laminação a frio de uma chapa de alumínio. É empregado o método dos elementos finitos através do programa ANSYS®. O problema é equacionado como quase-estático e é utilizado o método de Newton-Raphson para sua solução. São estudados diversos parâmetros que influenciam o comportamento no arco de contato tais como: pressão do cilindro de laminação; força de laminação; torque; tensões residuais; tensões oriundas ao processo e entre outros, que em um processo normal o emprego dos seus ferramentais tornam-se dispendiosos e caros, como por exemplo nos ajustes por tentativas (try-out). Com a metodologia adotada neste trabalho, pode-se determinar faixas de deslizamento e aderência ao longo do arco de contato entre a chapa e os cilindros. Esta abordagem não é apresentada nas referências citadas, e os resultados obtidos são importantes no estudo do desgaste dos cilindros e do acabamento superficial da chapa. O modelo é desenvolvido através de elementos de estado plano de deformações em 2D e parametrizado de modo a permitir modificações, novos dados de entrada e simulações com outros materiais, facilitando assim, futuras utilizações, análises técnicas ou aplicação direta nas áreas afins das empresas que almejam economia.

**Palavras-chaves:** arco de contato, curva pressão, laminação a frio, elementos finitos

## **1. INTRODUÇÃO**

Na laminação, a deformação da seção é obtida mediante a pressão entre cilindros giratórios, para se ter a redução da área ou conformação da peça ao perfil desejado, e ao mesmo tempo, modificar profundamente a estrutura interna do lingote, destruindo a estrutura dentrítica do lingotamento e, por outro lado, caldear as bolhas. A entrada da peça entre estes cilindros, depende do ângulo de contato e do atrito entre o material e os cilindros do laminador. O processo de laminação a frio é realizado a conformação em temperatura ambiente, não chegando à temperatura de recristalização do material laminado.

O presente trabalho tem como objetivo a criação de um modelo em 2D parametrizado para simular e analisar pelo método dos elementos finitos (MEF), com o aplicativo ANSYS® o processo de laminação a frio no arco de contato, a curva de pressão e as tensões oriundas ao processo.

A validação do modelo é baseada no grau de encruamento adquirido pelo material após o processo de laminação a frio, analisando-se os métodos e resultados dos experimentos obtidos por

pesquisadores como Roberts (1978); Lenard (1991); Reddy e Suryanarayana (2001); Fleck e Johnson (1987) e entre outros.

## 2. METODOLOGIA

O processo de laminação é contínuo e os esforços sofridos no material empregado pelo cilindro são considerados constantes ou quase constantes ao longo do seu percurso laminado, pode-se considerar o problema da laminação como sendo uma análise quase-estática, onde são desprezados os efeitos de inércia e de amortecimento por não ser relevantes neste tipo de análise, por isso não são cometidos grandes erros ao não se considerar uma análise dinâmica. São consideradas ainda, características não lineares tais como: grandes deformações, plasticidade, atrito e contato entre material laminado e cilindro.

O principal objetivo do estudo é analisar a simulação do processo de laminação por intermédio da utilização do programa ANSYS®. Isto é realizado principalmente através da distribuição da pressão no arco de contato, determinando-se as forças que interagem nas superfícies do cilindro e do material a ser laminado. Os resultados obtidos na utilização do programa de elementos finitos ANSYS®, para os modelos com as mesmas características do material utilizados por Hum et al (1996), apud Malinowski e Lenard (1992), alumínio puro comercial (Al1100-H14), Tab. (1), E=68.200 N/mm<sup>2</sup>, coeficiente de Poisson = 1/3, espessura inicial de 3,17mm e final de 2,48 mm, redução de 21,77%, raio do cilindro = 127,09 mm, fator de atrito = 0,35 e a curva de tensão-deformação do material encruado pela equação fornecida experimentalmente independentemente utilizada por Karagiozis e Lenard (1985) apud Malinowski e Lenard (1992):

$$\sigma = 36,75 (1+726,7 \cdot \epsilon)^{0,2099} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Tabela 1 – Composição química do material (peso %).

Mn	Si	Zn	Cu	Al
0,05	1,0	0,1	0,05	restante

O modelo simulado é executado admitindo-se no regime de estado plano de deformação, chapa com encruamento multilinear isotrópico conforme a curva tensão-deformação, Eq. (1). Para que a simulação no ANSYS® possa reconhecer a existência de uma deformação plástica e elástica, é necessária a introdução de parâmetros de tensão e deformação da curva no estado de tração-compressão pura (uniaxial), na qual a curva da Eq. (1) não fornece. Sendo assim, necessita-se de efetuar um ajuste da curva para ser utilizada como um dado de entrada obrigatório.

Primeiramente, conforme mostra o esquema na Fig. (1.a), a Curva Experimental de Eq. (1) projetada nos devidos eixos. Figura (1.b) tem-se a curva denominada de Curva Acoplada na qual é incorporada a reta elástica do material até atingir a curva. Em seguida, Fig. (1.c), a curva denominada de Curva Transladada, na qual efetua-se a translação da curva experimental para a reta elástica. E finalmente tem-se a Fig. (1.d), a curva denominada de Curva Ajustada, onde os valores das tensões de escoamento são ajustadas pelo fator de  $\sqrt{3}/2$ , conforme o critério de escoamento de von Mises para ajustar do estado plano de deformação para a compressão pura. Na Figura (1.e), tem-se o gráfico das tensões e deformações em escala.

Outro item muito importante a ser utilizado na entrada de dados obrigatório está relacionado ao coeficiente de atrito, pois resulta no aparecimento de uma superfície cisalhante e, portanto afetam diretamente somente a posição dos planos de tensões principais. Os efeitos de superfícies não são limitados aos planos externos, podendo afetar o material na sua profundidade e diretamente o nível de tensão de escoamento. Sendo assim, Malinowski e Lenard (1992) tomado como base em análise, o fator de atrito ( $m=0,35$ ) é convertido para coeficiente de atrito ( $\mu = 0,2021$ ), segundo os critérios de escoamento de von Mises e atrito de Coulomb conforme Schaffer (1995), e considera-se também constante ao longo do arco de contato e o raio do cilindro de laminação rígido (aço).

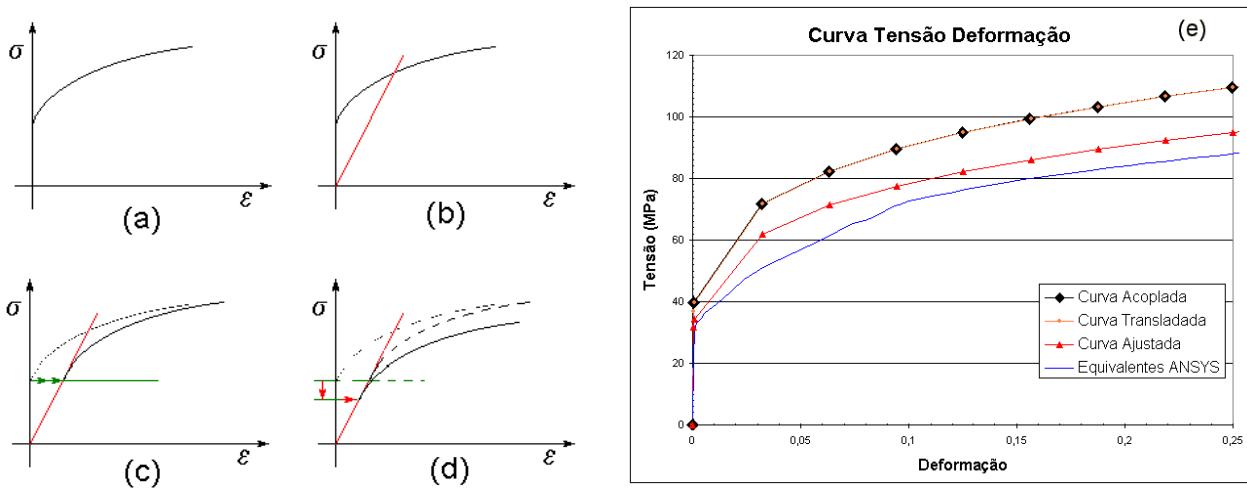


Figura 1 – Esquemas das curvas: (a) Curva Experimental , (b) Curva Acoplada , (c) Curva Transladada , (d) Curva Ajustada , (e) Curva Tensão x Deformação em escala.

## 2.1. Modelo Desenvolvido

O modelo apresentado é criado diretamente por intermédio da interface gráfica para usuário do próprio ANSYS®, Swanson (1992). Utiliza-se eixo de simetria que passa ao longo do centro da chapa a ser laminada, para simplificar e reduzir consideravelmente elementos e gerações de equações desnecessárias para convergir à solução do problema e consequentemente uma economia marcante de memórias do equipamento computacional. Utilizam-se 2.380 nós, 2.464 elementos, cilindro de laminação com setor de 45° e rotação imposta de 20°. Os elementos utilizados tanto para os cilindro quanto para a chapa, é o elemento *Plane42*. É um elemento de modelo 2D que possibilita o uso de estado plano de deformações, de tensões ou pode ser usado ainda como um elemento axisimétrico. Este elemento é definido por quatro nós e tendo dois graus de liberdade (deslocamentos em relação ao eixo X e Y) em cada nó. Permite o uso de simetria e translação na direção de seus eixos, além de poder possuir capacidade de plasticidade, fluênciça, enrijecimento por tensão, grande rotação e grande deformação. Os principais dados de entrada para este elemento referem-se principalmente, às propriedades do material utilizado segundo os seus eixos, tais como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de atrito, etc. Os principais dados de saídas são: deslocamentos nodais dos elementos, segundo o seu sistema de coordenadas adotadas, tensões e esforços paralelos e perpendiculares (normais) em quaisquer faces do elemento, deformações, deformações equivalentes, tensões principais, tensões equivalentes, etc.

Os problemas de contatos apresentam duas grandes dificuldades. A primeira é o desconhecimento da região de contato que irá atuar no modelo, que depende do carregamento, material, condição de contorno e outros fatores que podem influenciar na superfície de entrada e/ou saída de contato de maneira abrupta ou imprevisível. A segunda diz respeito à existência de fricção e existem diversas teorias e leis que governam na escolha de seus modelos. A própria determinação do coeficiente de atrito a ser utilizado é um problema importante a ser solucionado. O elemento de contato é subdividido em duas parcelas: A primeira é a superfície alvo e a segunda a superfície de contato (superfície a ser deformada) propriamente dita. Os elementos de contatos escolhidos na biblioteca do ANSYS® foram: *TARGE169* e *CONTA171*, por permitir contatos de 2D entre superfícies e superfícies curvas, que é o caso da laminação a frio e que cuja saída fornece: pressão de contato normal, força de contato tangencial, região de contato ou região de deslizamento, tensão de fricção e outros. Na Figura (2.a), tem-se uma ampliação do setor do cilindro de

laminação, a localização dos elementos de contato e a posição do eixo de simetria e na Fig. (2.b), o ponto de aplicação de rotação do cilindro (Ponto4) e o de restrição no centro do cilindro.

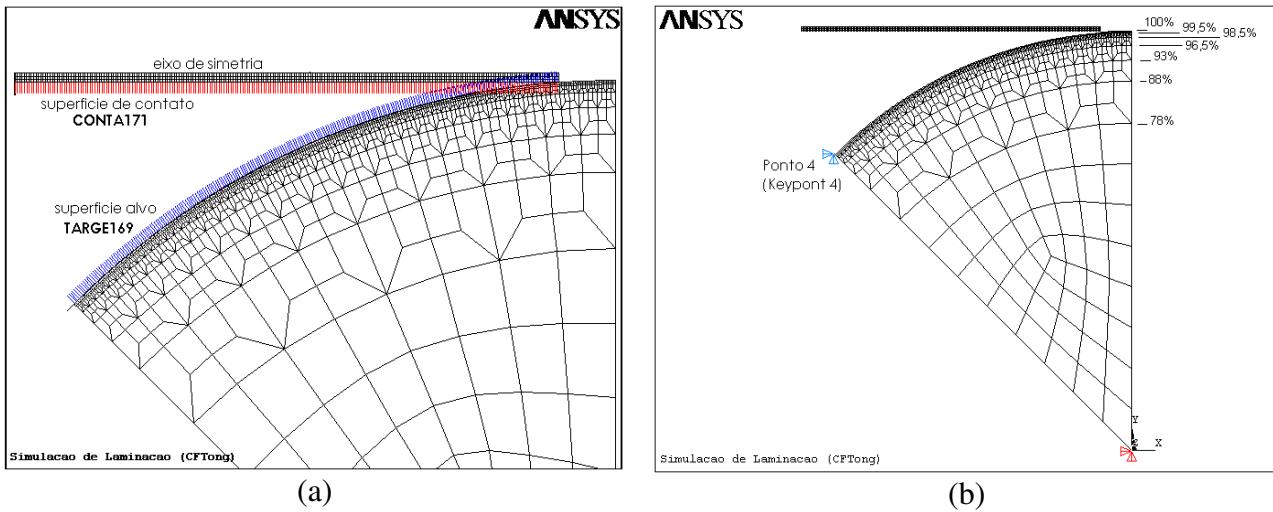


Figura 2 – (a) Elementos de contatos e eixo de simetria, (b) Ponto de imposição de rotação, de restrição de movimento e de proporcionalidade do cilindro.

## 2.2. Considerações e Simplificações

Para que se possa satisfazer a teoria do estado plano de deformação, a condição de deformação da chapa de laminação na direção do eixo Z é considerada nula ( $\varepsilon_z = 0$ ). Pois, o atrito impede o movimento relativo da chapa e do cilindro, implicando-se em uma deformação próxima de zero, principalmente na região central da direção transversal de laminação. Em condições reais de laminação, a chapa é contida também por guias laterais fixas para garantir o processo.

Todos os dados da geometria do modelo são parametrizados para possibilitar quaisquer mudanças futuras caso houver. Como o cilindro de laminação é considerado uma peça rígida e indeformável no presente trabalho, optou-se uma proporcionalidade entre suas dimensões da geometria para permitir que seus elementos periféricos se assemelhassem o mais próximo possível uns dos outros. A parte central com elementos maiores e diminuindo até alcançar a mesa do cilindro de trabalho que é a superfície de contato com a chapa. A proporcionalidade mantida que inicia do centro do cilindro até a superfície é composta por sete faixas de elementos que variam de: 78%; 88%; 93%; 96,5%; 98,5%; 99,5% e 100% do raio. A Figura (2.b), denota-se esta proporcionalidade.

## 2.3. Restrições e Carregamento

O modelo criado em 2D para o presente trabalho, considerou-se uma largura unitária para todo o conjunto cilindro e chapa, sendo o raio do cilindro de laminação RAIO=127,09mm , a espessura inicial da chapa HiChapa=3,17mm e a espessura final HfChapa=2,48mm. Os planejamentos das restrições e carregamentos impostos são mostrados a seguir no sistema de coordenadas.

No cilindro, para representar o movimento de rotação e reproduzindo assim a condição real até atingir a estabilização do processo, é aplicada uma restrição de deslocamento do seu centro, localizado nas coordenadas de origens nos eixos X e Y , ficando livre somente no eixo Z. A rotação do setor rígido do cilindro de laminação de 45° é executada no sentido horário, e imposta no ponto de aplicação “Ponto4” (Keypoint 4) , conforme Fig. (2.b).

A restrição da chapa é efetuada ao longo do eixo de simetria em relação ao deslocamento no eixo Y. Para que chapa possa ser arrastar a para dentro do cilindro de laminação, é necessário impor na chapa, um deslocamento inicial de pelo menos 2° juntamente com o cilindro.

Após este instante inicial, é retirada o deslocamento imposto na chapa e o processo continuará rotacionando até o seu término desejado. No presente estudo, verifica-se que uma rotação de 20° é o suficiente para a análise dos resultados, pois se obtém uma estabilização da pressão e esforços internos.

A etapa inicial da validação do modelo consiste na determinação da melhor maneira de se descrever o comportamento do material. Através da comparação dos resultados obtidos por Malinowski e Lenard (1992) tanto numéricos quanto experimentais, com os obtidos. Utilizando-se as curvas de encruamento modificados, conforme apresentados no item 2, Fig. (1): acoplada, transladada e ajustadas. Os resultados obtidos pela força de laminação, torque e pressão máxima estão resumidos na Tab. (2 e 3) por diferentes coeficientes de atrito.

Tabela 2 – Parâmetros previstos, medidos e ANSYS (coeficiente de atrito  $\mu = 0,35$ ).

Fator de atrito $m=0,35$ : Redução percentual = 21,77%	Z. Malinowski e J.G. Lenard (1992)		ANSYS curva acoplada	ANSYS curva transladada	ANSYS curva ajustada
	Numérico previsto	Experimentais medidos			
Força de laminação (N/mm)	1485	1633	1774	1595	1423
Torque (Nm/mm)	6425	6990	7789	5934	6398
Pressão máxima (MPa)	178	189	278	251	227

Pode-se verificar que a curva denominada “Curva Ajustada” é realmente a de melhor resultado mediante os valores apresentados (força de laminação, torque e pressão máxima) estarem mais próximos e inclusive o material laminado com os experimentos ensaiados por Malinowski e Lenard (1992), sendo assim, será a curva de tensão-deformação a ser utilizada para prover dados de entradas no ANSYS® com a finalidade de obter os valores finais de comparação e de análises deste trabalho.

O fator de atrito  $m = 0,35$  utilizado como coeficiente de atrito na introdução de dado no ANSYS® é empregado inadequadamente, pois segundo os critérios de escoamento de von Mises e atrito de Coulomb, Schaffer (1995), necessita-se de ser recalculado e modificado para o valor real do coeficiente de atrito que é  $\mu = 0,2021$ . Obtendo-se na Tab. 3 os novos valores de comparação corretos.

Tabela 3 – Parâmetros previstos, medidos e ANSYS (coeficiente de atrito  $\mu = 0,2021$ ).

Fator de atrito $m=0,35$ : Coeficiente de atrito $\mu = 0,2021$	Z. Malinowski e J.G. Lenard (1992)		ANSYS curva ajustada
	Numérico previsto	Experimentais medidos	
Força de laminação (N/mm)	1485	1633	1156
Torque (Nm/mm)	6425	6990	4515
Pressão máxima (MPa)	178	189	170
Fricção (MPa)	Máxima	22,9	30,5
	Mínima	-23,5	-13,7
			-29,6

A rotação final para o Keypoint 4 (ponto de aplicação do deslocamento no cilindro) foi de 20°, observa-se uma estabilização das tensões de saídas logo após a laminação da chapa, apresentado na Fig. (3.a). Além disso, após a simulação ter sido finalizada, pode-se verificar que no sétimo grau de laminação inicia-se a estabilização das tensões, porém só não foi utilizado por motivo de não apresentar uma visualização gráfica adequada ao processo. Verifica-se também que a distância dos nós: inicial (1818) e final (1843) de laminação no arco de contato é de 9,747mm. Na Fig. (3.b), tem-

se uma comparação das curvas de pressões obtidas por Malinowski e Lenad (1992) e o presente trabalho, utilizando coeficiente de atrito  $\mu = 0,2021$  ( $m = 0,35$ ).

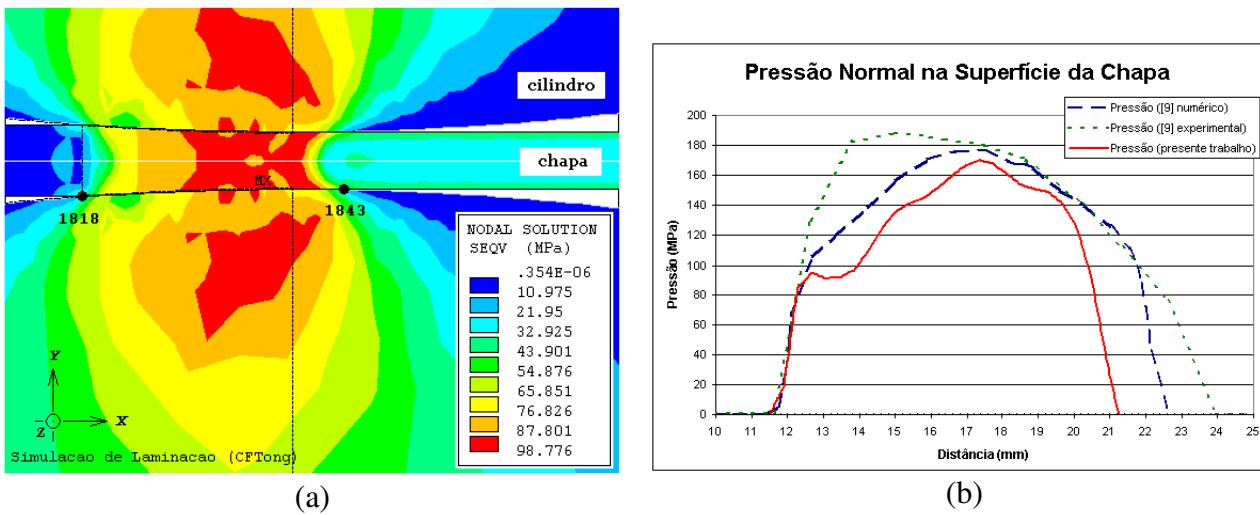


Figura 3 – (a) Diagrama de níveis de tensões equivalentes de von Mises após rotação de 20° no cilindro de laminação; (b) Gráfico de curvas de pressões geradas no arco de contato.

De acordo com Dieter (1981), a pressão atinge um máximo no ponto neutro e então cai a partir daí. O fato de que a distribuição de pressão não forma um pico aguçado no ponto neutro, como pressuposto no tratamento teórico da laminação, indica que o ponto neutro não é realmente uma linha na superfície do rolo, mas sim, uma área (também denominada de zona). A área sobre a curva é proporcional à carga de laminação que, para fins de cálculo, atua no centro de gravidade da distribuição de pressão. Por isso, a forma da distribuição de pressão é importante porque a localização da carga de laminação resultante, com respeito ao centro dos rolos, determina o torque e a potência requerida para produzir a redução.

A força de laminação pode ser obter por três maneiras. A primeira por intermédio do relatório ANSYS® fornecendo as forças de reações  $F_x$  e  $F_y$  no nó 1 que é denominado de Keypoint1 os seguintes valores:  $F_x=59,4$  N/mm e  $F_y=1.145,8$  N/mm. A sua resultante  $F_R = 1.144$  N/mm é a força de laminação aplicada no centro do cilindro e com direção e sentido ao arco de contato. As outras duas maneiras, são pelas integrações das curvas de pressão e de tensões  $\sigma_y$  oriundas do processo de laminação ao longo do arco de contato. Na Tab. (4), tem-se os valores aproximados de 1.156N e de 1.147N respectivamente por largura do cilindro de laminação (mm). No estado plano de deformação, a largura em questão é considerada unitária.

Para obter o torque que possa laminar a chapa, é necessária uma imposição de rotação de 20° exatamente no ponto de aplicação 4. Obtém-se uma listagem de saída pelo aplicativo ANSYS® com as forças de reação no nó 961,  $F_x = -59,4$ N e  $F_y = 210,2$ N, veja Tab. (4). Projetando-se essas forças resultantes em um segmento tangente ao arco do cilindro no ponto de aplicação de rotação, onde,  $\alpha = 65^\circ$  e  $\beta = 25^\circ$ , obtém-se uma força resultante  $F_T$  aproximadamente de 35N, que ao ser aplicado no braço de alavanca, que é exatamente o raio do cilindro de laminação igual a 127,09 mm, logo, obtém-se o torque do processo de aproximadamente 4.448 Nmm (por largura do cilindro de laminação).

### 3. Resultados e Discussões

Na Figura (4.a), tem-se o gráfico SX com as curvas de tensões  $\sigma_x$  na direção do deslocamento da laminação, pertinentes a um trecho na superfície contendo o arco de contato e na linha de centro da chapa em análise. Neste trecho, pode-se visualizar que a tensão na sua superfície, passa de trativa para compressiva, pois o cilindro na posição da entrada do arco de contato possui uma velocidade

maior do que a da chapa, causando assim um deslizamento para dentro do arco de contato. Após o seu ponto máximo de compressão, inicia-se o seu declínio, tornado-se as suas tensões em trativas, causado assim um novo deslizamento, só que desta vez para fora do arco de contato, gerando-se um deslocamento de sua superfície com uma velocidade maior do que a do cilindro. Após a saída do contato, as suas tensões tende a se estabilizar (tensões residuais) devido ao material ter sido laminado.

O gráfico SY da Fig. (4.b), visualiza-se o desenvolvimento das tensões  $\sigma_y$  ao longo do processo de laminação, verifica-se que no arco de contato as tensões tanto na superfície quanto no centro não teve muita variação após o ponto neutro, devido ao alívio da carga de laminação e o retorno elástico do material.

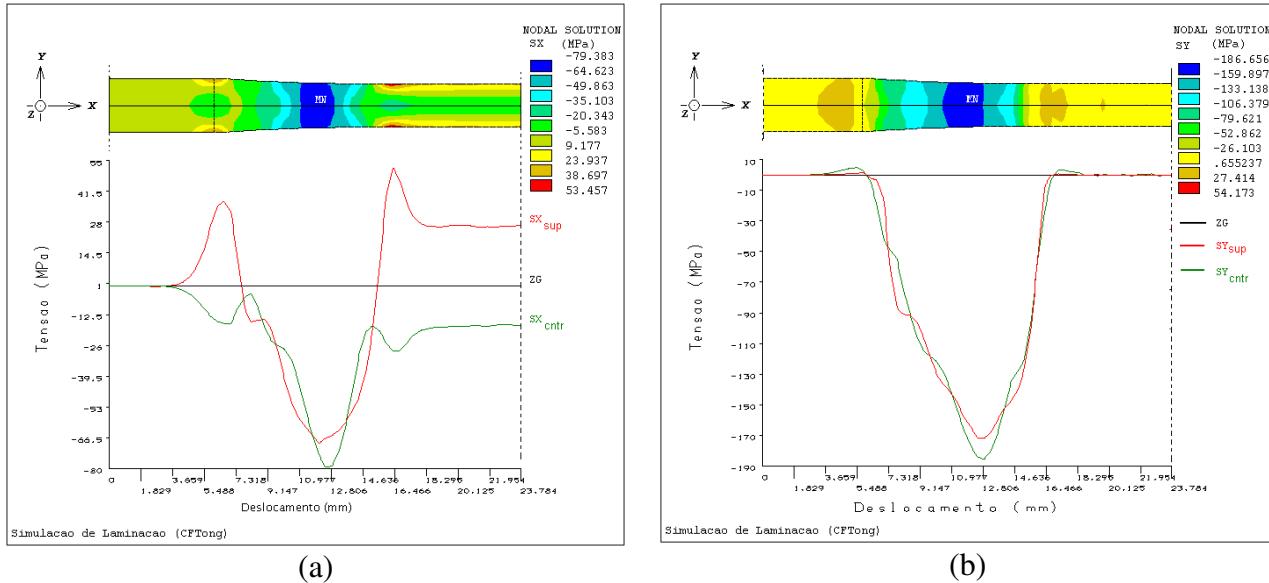


Figura 4 – (a) Desenvolvimento das tensões na direção X ao longo do processo da laminação;  
(b) Desenvolvimento das tensões na direção Y ao longo do processo da laminação.

Na Figura (5.a), tem-se o gráfico SZ do desenvolvimento das tensões  $\sigma_z$  ao longo do deslocamento da laminação. Verifica-se uma leve tensão trativa na superfície da chapa no início da laminação, devido a chapa estar sendo puxado pelo cilindro para dentro do arco de contato. E na saída, somente tensões compressivas na largura, tanto na superfície quanto no centro da chapa.

Na Figura (5.b), tem-se o gráfico SEQV do desenvolvimento das tensões equivalentes de von Mises ao longo do processo da laminação, na qual pode-se visualizar que após a saída da chapa do arco de contato, predomina tensões residuais de aproximadamente de 38,0 MPa de caráter trativa. No trecho interno do arco de contato, pode-se verificar que a aparência desta curva se assemelha com a da curva tensão deformação do material utilizado, apresentado em comparação com a curva adotada na Fig. (1.e), e que realmente o programa utilizou-se da curva de escoamento do material em ensaio de tração uniaxial fornecido como dado de entrada, como uma curva de tensão equivalente ou efetiva, o que realmente pode ser utilizado com boa aproximação.

Após a chapa ter sido deformada no arco de contato, apresenta diferentes deformações plásticas ocorridas em regiões distintas, e com isso, surgem tensões residuais ao longo de sua espessura, conforme se pode visualizar na Fig. (6.a). As tensões residuais afetam intimamente na qualidade do material, pois acarreta uma mudança de propriedade mecânica as quais nem sempre desejáveis, dependendo de como foi trabalhado posteriormente este material, poderá levá-lo a fratura.

Pode-se visualizar na Fig. (6.b), as zonas livres de contato, zonas de deslizamentos e zona aderida graficamente por intermédio de uma sobreposição dos gráficos da curva de fricção a curva de pressão modificada. Neste tipo de contato a força de fricção  $F_{fr}$ , é proporcional a força normal  $P$ , que atua nos sólidos em contato:  $F_{fr} = \mu \times P$ , onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito atuando em todo o

arco de contato. Dependendo da magnitude de  $P$  e do valor limite de fricção, poderá então ocorrer um deslizamento ou aderência entre estas duas superfícies. Sendo assim, necessita-se primeiramente criar um outro gráfico de fricção (CONTFRI) invertendo a sua sinalização (NEGFRIC), para que se possa mostrar o ramo de saída do arco de contato. Logo após, cria-se um novo gráfico de pressão auxiliar modificado (PRES2021), multiplicando-se o coeficiente de atrito  $\mu$  pela curva de pressão original. Sobrepondo-se as três curvas: curva de fricção, fricção invertida e pressão auxiliar modificada, teremos o gráfico mostrado na Fig. (6.b).

Pode-se visualizar facilmente a existência de três zonas, sendo que a mais central (trecho C a D) é a zona aderida, na qual é a zona que contém o ponto neutro e atuação da maior tensão compressiva, acarretando o cilindro a um desgaste maior nesta região, e praticamente tem-se a mesma velocidade da chapa e a mesa do cilindro. Duas zonas intermediárias de deslizamentos, uma na entrada do cilindro (trecho B a C) na qual a velocidade da chapa é inferior a da mesa, e uma na saída (trecho D a E), cuja velocidade é superior a da mesa do cilindro. E por último, zonas livres de contato, as duas zonas mais afastadas que não possuem contato algum (trecho A até B e E até F). O arco de contato é compreendido entre o trecho de B a E.

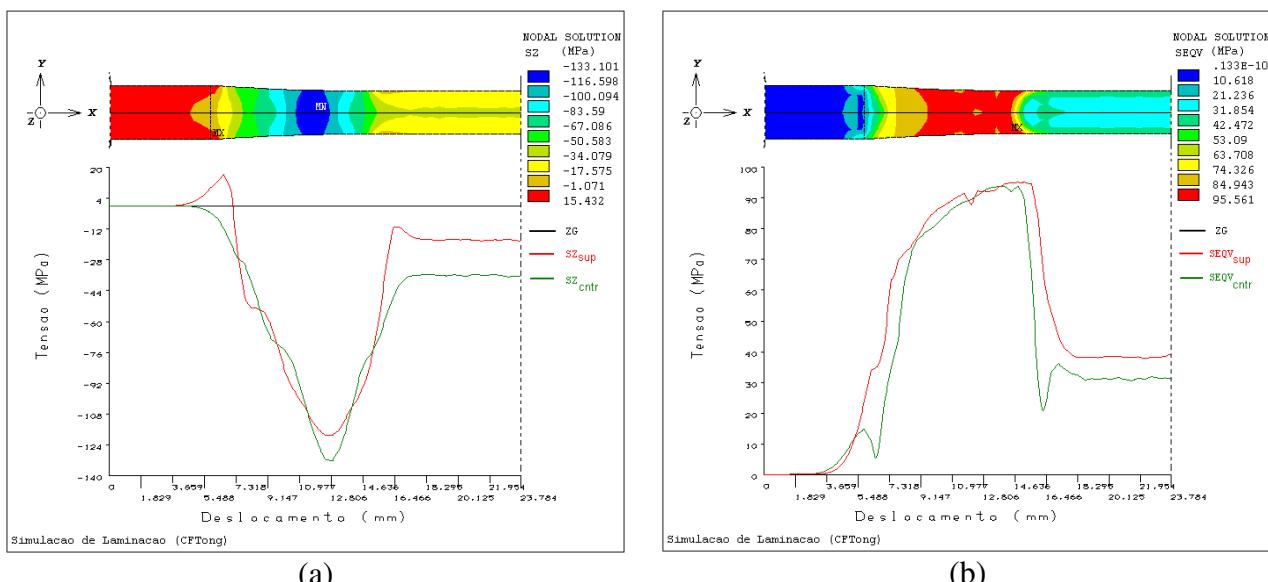


Figura 5 – (a) Desenvolvimento das tensões na direção Z ao longo do processo da lamination; (b) Desenvolvimento das tensões equivalentes de von Mises ao longo do processo da lamination.

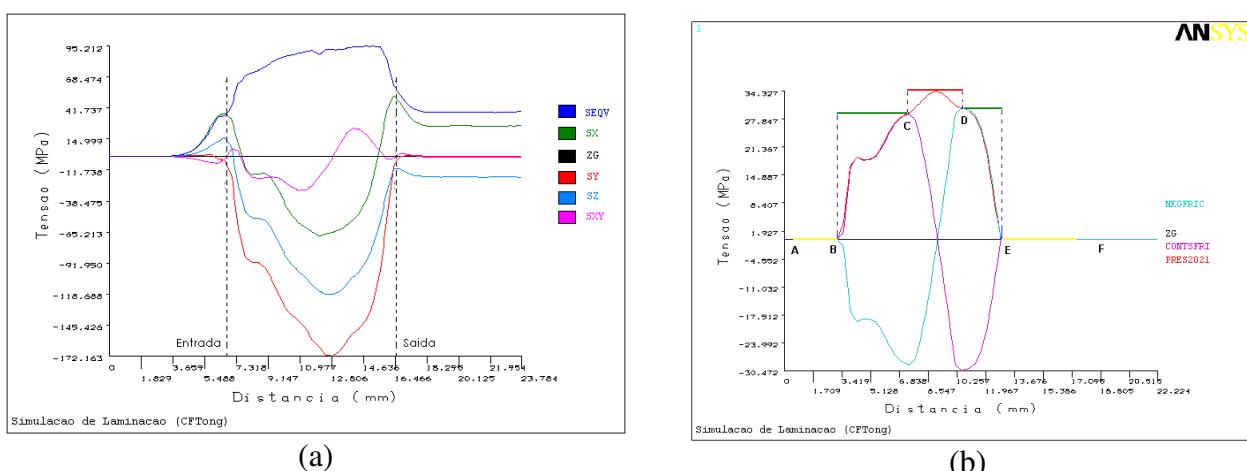


Figura 6 – (a) Desenvolvimento das tensões na superfície da chapa ao longo da lamination ; (b) Gráfico de localização das zonas de deslizamentos e de aderência .

Tabela 4 – Tabela geral dos resultados obtidos para redução de 21,77%

		Malinowski e Lenard (1992)		Resultados 1		Resultados 2		Resultados 3	
		Numérico	Experimental						
Força de Laminação (N/mm)		1.485	1.633	1.100	1.091	1.156	1.147	1.194	1.181
Torque (Nmm/mm)		6.425	6.990	4.749	4.268	4.515	4.448	4.518	4.708
Deslizamento avante		0,053	0,044	0,059		0,077		0,084	
Pmax (MPa)		178	189	156		170		174	
Fricção (MPa)	Máx	22,9	30,5	21,22		29,19		30,12	
	Min	-23,5	-13,7	-21,22		-30,51		-31,31	
Arco de Contato (mm)		11,39	15,35	9,75		9,75		9,75	
Ponto Neutro (mm)		6,8		5,8		5,8		5,8	
Superfície da Chapa (Mpa)	Sx	-55		-51		-76		-72	
	Sy	-180		-157		-173		-177	
	Sz			-104		-120		-123	
	Sxy max	18,1		16,6		24,6		24,8	
	Sxy min	-23,5		-21,6		-29,6		-31,3	
	Seqv			95		96		97	
Centro da Chapa (Mpa)	Sx			-58		-83		-85	
	Sy			-166		-187		-193	
	Sz			-112		-133		-134	
	Seqv			94		94		95	
Centro do cilindro (nó 1)	Fx (N)			56,3		59,4		60,5	
	Fy (N)			1.089,3		1.145,8		1.179,6	
Pt. Aplicação de Rotação (nó 961)	Fx (N)			-56,3		-59,4		-60,5	
	Fy (N)			200,2		210,2		217,4	

#### 4. CONCLUSÕES

Algumas conclusões comumente tiradas de uma simulação de um processo de laminação por elementos finitos também se aplicam neste trabalho:

- as tensões oriundas a laminação começam a se estabilizar a partir do 7º de laminação, não sendo necessário executar passos maiores que 15º para obter resultados satisfatórios;
- a superfície se deforma mais que o interior, o que leva às tensões residuais na direção de laminação, sendo trativas nas fibras externas compressivas nas internas e
- as tensões residuais nas direções XY não tiveram grandes significados marcantes perante as outras tensões.

Porém, a maior contribuição deste trabalho é a determinação de zonas de deslizamento-aderência-deslizamento ao longo da região de contato entre os cilindros e a chapa, na direção da laminação. Estes resultados normalmente não são explorados nas simulações numéricas por elementos finitos, mas são de grande importância na avaliação do desgaste produzido nos cilindros e do acabamento superficial das chapas. Estes parâmetros são fundamentais na avaliação do desempenho da laminação como um processo industrial.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense – EEIMVR/UFF pela utilização dos equipamentos e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro.

## **6. REFERENCIAS**

- Dieter, G.E., 1981, “Metalurgia Mecânica”, 2<sup>a</sup> Edição, Editora Guanabara, pp.518-543  
Fleck, N.A. and Johnson, K.L., 1987, “Towards a new theory of cold rolling thin foil”, Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, n° 7 , pp. 507-524  
Hum, B. et al , 1996, “Measurements of friction during hot rolling of aluminum strip”, Journal of Materials Processing Technology, 60 , pp. 332  
Karagiozis, A.N. and Lenard, J.G., 1985, Proc. Eurotrib 85, Lyon, paper n° 2.13, pp. 1-7.  
Lenard, J.G., 1991, “Measurements of friction in cold flat rolling”, J. Materials Shaping Technology, Vol. 9, n° 3, pp. 171-180  
Malinowski, Z. and Lenard, J.G., 1992, “A study of the state of stress during cold strip-rolling”, Journal of Materials Processing Technology, 33 , pp. 273-288  
Reddy, N.V. and Suryanarayana, G., 2001, “A set-up model for tandem cold rolling mills”, Journal of Materials Processing Technology, 166, pp. 269-277  
Roberts, W. L., 1978, “Cold rolling of steel”, Marcel Dekker Inc, NY,  
Schaffer, L., 1995, “Conformação dos Metais – Metalurgia e Mecânica”, Editora Rigel, pp. 68.  
Swanson Analysis System, 1992, “Ansys User’s Manual for revision 5.0” ,Procedures., Vol.I , Houston

## **MODELLING AND SIMULATION OF THE PRESSURE CURVE GENERATED INTO CONTACT ARC IN COLD ROLLING OF ALUMINUM SHEET BY FINITE ELEMENTS METHOD**

### **Cheong Fai Tong**

EEIMVR-UFF, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores nº 420, cep 27.255-125, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, cheong@metal.eeimvr.uff.br

### **Jayne Pereira de Gouvêa**

EEIMVR-UFF, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda da Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores nº 420, cep 27.255-125, Vila Santa Cecília, Volta Redonda, RJ, jpg@metal.eeimvr.uff.br

**Abstract:** The cold rolling has been researched by analytical, experimental, and computer methods. This work shows the mathematical modeling and numerical simulation of an aluminum sheet cold rolling. The finite elements method and the ANSYS® program are used. A quase-estatic model and Newton-Raphson method are used too. To obtain several parameters could influence in the process, such as: rolling pressure; rolling force; torque; residual stress and others, which should have expensive experimental obtaining by try-out process. With the obtained results, it is verified the existence of a sticking and sliding zone between sheet and roll. Those of parametric 2D model to allow modifications, new input data and simulations with other materials. Easing future application of this for obtaining of the rolling parameters, for technical analyses or direct application in the sectors of the companies that wish economy.

**Keywords:** contact arc, pressure curve, cold rolling, finite elements