

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE PROCESSOS DE LAMINAÇÃO EM MÚLTIPLOS PASSES – ANÁLISE TERMO-MECÂNICA¹

Eleir Mundim Bortoleto²
Celso Noronha Neto³
Anselmo Fioranelli Junior⁴
Alexandra Alvim Arbex⁵
Roberto Martins de Souza⁶

Resumo

O objetivo deste trabalho é analisar o processo de laminação de chapas e perfis metálicos para o estudo das tensões e deformações geradas nos múltiplos passes do material pelas diferentes cadeiras de laminação, examinando as interações do contato chapa-cilindro, avaliando valores dos esforços na laminação e relacionando-os às diferentes combinações na seqüência de deformação do perfil laminado. Para a construção do modelo computacional termo-mecânico acoplado foi utilizado o programa Abaqus® v. 6.7, admitindo-se um estado de tensões tridimensional para o material laminado e considerando o cilindro como uma superfície rígida. As condições de processo foram baseadas numa configuração típica da laminação de chapas metálicas, com cilindros de diâmetros entre 600 e 750 mm e as chapas laminadas com espessuras iniciais de 130 mm reduzidas pela laminação em passes múltiplos e sucessivos até 40 mm. O campo de tensões e deformações gerado em um passe é utilizado como condição inicial do passe seguinte. Diferentes combinações para a seqüência de redução de espessura da chapa laminada foram analisadas a fim de relacionar a quantidade de passes e a variação de espessura da chapa em cada passe às tensões e deformações geradas no processo. Maiores taxas de deformação geram maiores tensões residuais e para uma mesma redução percentual na espessura da chapa observa-se maior concentração de tensões residuais quanto menor for o número de passes utilizados. Os resultados obtidos são concordantes com a literatura técnica sobre o tema.

Palavras-chave: Laminação; Método dos elementos finitos; Tensões residuais; Passes múltiplos.

FINITE ELEMENT MODELING AND SIMULATION OF ROLL FORMING PROCESS WITH MULTIPLE PASSES – THERMO-MECHANICAL ANALYSIS

Abstract

The objective of this study is to analyze the roll forming process regarding to the study of residual stresses and deformations generated in multiple passes of the steel plate through the rollers in order to understand the mechanical and thermal interactions in plate-cylinder contact pair, calculating the forces involved in the process and the relationship between the different combinations of the sequence of deformation. A 3D thermo-mechanical model was developed using the Finite Element program Abaqus® 6.7; the rollers were considered rigid surfaces and the conditions for the process simulation were based on a typical configuration of the roll forming process (cylinders with diameters between 600 and 750 mm and plates with initial thickness of 130 mm reduced to 40 mm by rolling in successive and multiple passes). The stress and deformation fields created in a previous pass through the rollers were used as initial condition of the subsequent pass. Different sequences of thickness reduction were analyzed in order to link the number of passes and the variation of plate thickness in each pass with the stress and deformation created in the process. Higher deformation rates generate more residual stress. For an equal value in plate thickness reduction, the smaller the number of passes used the greater residual stress. The results are consistent with the technical literature about the subject.

Key words: Roll forming; Finite element method; Residual stresses; Multiple passes.

¹ Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE

² Eng. Mecânico, Mestrando em Engenharia Mecânica - Laboratório de Fenômenos de Superfície EPUSP. Eng. de Desenvolvimento, Smarttech Mecânica, Grupo Smarttech. São Paulo SP.

³ Doutor em Engenharia, Eng. Responsável Técnico Smarttech Mecânica, Grupo Smarttech. São Paulo SP.

⁴ Mestre em Engenharia, Gerente Smarttech Mecânica, Grupo Smarttech. São Paulo SP.

⁵ Eng. Mecânica, Eng. de Suporte Smarttech Mecânica, Grupo Smarttech. São Paulo SP.

⁶ Doutor em Engenharia, Professor Doutor do Depto. de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

1 INTRODUÇÃO

Laminação é um processo de conformação mecânica, utilizado na fabricação de chapas, barras e perfis metálicos, que consiste em modificar a seção transversal de um material metálico através da passagem deste entre dois ou mais cilindros girantes, com superfície retilínea (laminação plana) ou com canais (laminação não plana), sendo a distância entre os cilindros menor do que a espessura inicial da peça. Esse processo confere ao material uma geometria definida, com as formas e propriedades mecânicas adequadas para produtos em aço de uso comercial.

A laminação de produtos planos produz chapas de espessura determinada a partir de chapas mais grossas, blocos ou lingotes e consiste numa redução progressiva, sempre num mesmo plano, feita em vários passes (cada passe reduzindo a espessura num determinado percentual). Os cilindros de trabalho, que entram em contato com o material, são suportados por cilindros de encosto, com diâmetros maiores e que evitam que os primeiros se deformem a níveis que possam ocasionar quebras. Já a laminação de produtos não planos utiliza cilindros que recebem sulcos ou canais usinados a fim de produzir barras ou perfis de geometrias diversas (redondas, quadradas, cantoneiras, trilhos, perfis U e I, etc.), sendo geralmente necessário que a deformação ocorra alternadamente entre 2 planos. Assim, passe a passe, as barras e perfis são obrigados a mudar da seção inicial para o perfil final, gradualmente.

A laminação pode ser feita tanto a quente quanto a frio. O trabalho mecânico a quente é realizado acima de 723°C (temperatura crítica do aço), o que torna o material mais dúctil e, conseqüentemente, mais fácil de ser deformado. Após a deformação dos grãos do material, estes se recristalizam sob a forma de grãos maiores. A laminação a frio é realizada abaixo da temperatura crítica, o que faz com que os grãos permaneçam deformados após o trabalho (material “encruado”). O encruamento altera as propriedades do material, aumentando sua resistência, o escoamento, a dureza, e a fragilidade, ao passo que reduz o alongamento, a resistência à corrosão, etc. Se o material encruado é aquecido, os cristais se reagrupam e o encruamento desaparece.

É o atrito entre as superfícies o responsável pela tração entre o material laminado e o cilindro de laminação (que “puxa” o material para dentro dos cilindros). A redução de espessura ou a variação na geometria é limitada pelas potências do laminador (motores), resistência mecânica dos cilindros, mancais, redutores e eixos cardans. Os passes variam muito de máquina para máquina e devem ser dados de forma decrescente e suave, para evitar a ocorrência de desníveis nas chapas.

Devido às grandes áreas envolvidas, os esforços da laminação atingem milhares de toneladas, o que interfere significativamente no surgimento de tensões residuais, tanto no material laminado quanto nos cilindros de laminação. No material laminado as tensões são resultantes da compressão exercida por roletes e do cisalhamento superficial, resultante do atrito entre os rolos e o material.

Segundo Sjöström,⁽¹⁾ elevadas reduções de espessura por passe podem ser vantajosas não só pelo aumento de produtividade, mas também por imprimir melhores propriedades ao material. Isso acontece devido às altas reduções por passe (acima de 40%) proporcionarem um melhor estado de tensões e pressão hidrostática no material, o que resulta numa melhor equalização na segregação e no fechamento de porosidades. Entretanto, em seus experimentos, Sjöstrom⁽¹⁾ mostrou que elevadas reduções não conferem melhoras significativas no fechamento de porosidades ou nas propriedades mecânicas dos materiais laminados testados por

ele. Ademais, observa-se um aumento expressivo nos valores das forças de laminação para altas reduções de espessura por passe no laminador, o que pode ocasionar restrições industriais para esse tipo de fabricação. Problemas de engripamento também se fazem presentes.

Stahlberg,⁽²⁾ fazendo uma analogia entre laminação e forjamento, mostrou que o aumento no valor da razão entre o arco de contato entre o cilindro e a chapa e a espessura média da chapa durante um passe ocasiona um melhor estado de tensões no material laminado, bem como leva ao fechamento de porosidades do material.

Zhang e Zhang⁽³⁾ apresentam uma formulação para a análise de tensões na laminação contínua, obtendo importantes equações e coeficientes para o processo, mostrando que as tensões, sensíveis a variações do sistema, são diretamente proporcionais à variação temporal do fluxo de material que passa entre os cilindros de laminação e inversamente proporcional ao módulo de laminação contínua (valor que trata sobre as relações de deformação do material na laminação).

Kiuchi, Abe e Onodera⁽⁴⁾ desenvolveram um sistema de simulação numérico computacional para análise de laminação a frio aplicando a vários processos de laminação diferentes, considerando efeitos de geometria, posicionamento dos cilindros, dimensões da chapa e propriedades mecânicas do material laminado além dos esforços, tensões e deformações presentes nos processos.

Tieu et al.⁽⁵⁾ analisaram informações reais da produção numa laminação a frio e desenvolveram uma otimização para os valores de resistência à deformação e atrito do processo, considerando a dependência do coeficiente de atrito com as velocidades de laminação e desgaste dos cilindros de trabalho, sendo que quanto menor a rotação do cilindro, maior é o atrito. Park,⁽⁶⁾ utilizando o Método dos Elementos Finitos, desenvolveu um modelo acoplado para a laminação a quente, considerando a recristalização e o fluxo de tensão para a predição do fluxo de tensão e do crescimento de grão na região austenítica do aço analisado.

Lopes et al.⁽⁷⁾ avaliam o efeito do tipo e quantidade de pré-deformação na laminação do aço inoxidável AISI 430E, empregando a técnica de cisalhamento planar simples, concluindo que transientes na resistência mecânica e na taxa de encruamento são dependentes do valor da pré-deformação adotado.

Mäntilä et al.⁽⁸⁾ desenvolveram um novo sistema para otimização da seqüência dos passes na laminação, calculando as forças e carregamentos do processo pela utilização de um modelo baseado em análises estatísticas que permite a redução do número de passes com melhorias no escoamento do material.

Em um laminador, numa seqüência de cadeiras de laminação, as primeiras, denominadas cadeiras desbastadoras, são responsáveis por uma maior redução na espessura da chapa laminada, enquanto que as últimas, as cadeiras de acabamento, têm como função imprimir à chapa as dimensões desejadas, com as tolerâncias e a rugosidade superficial especificada. Dessa forma, numa laminação típica, os primeiros passes levam a um maior percentual de redução da espessura da chapa que os últimos passes e o campo de tensões residuais na chapa fabricada é afetado, variando de passe a passe. O número de passes utilizado é diferente de acordo com o tipo de laminação empregada, com o produto fabricado e com as especificações de tolerância dimensional, rugosidade e propriedades mecânicas para o produto final. Na laminação a frio (aplicada para produzir folhas e tiras com acabamento superficial e tolerâncias dimensionais superiores quando comparadas às tiras produzidas por laminação a quente) o encruamento resultante da redução pode ser aproveitado para dar maior resistência ao produto final. A redução total

varia de 50% a 90%, sendo que a porcentagem de redução menor é feita no último passe para permitir um melhor controle do acabamento superficial e objetivando uma distribuição tão uniforme quanto possível nos diversos passes sem haver uma queda acentuada da espessura da chapa.⁽¹⁾ A Figura 1 traz uma representação genérica das várias cadeiras de laminação empregadas na redução da espessura de um perfil metálico. As deformações podem se dar em um ou mais planos e se acumulam passe a passe, levando a uma variação na distribuição de tensões da chapa conforme esta tem sua espessura reduzida. Um maior ou menor número de passes de laminação empregado é significativo para o surgimento de tensões residuais, das características de acabamento superficiais e para o dimensionamento do laminador de acordo com os esforços do processo.

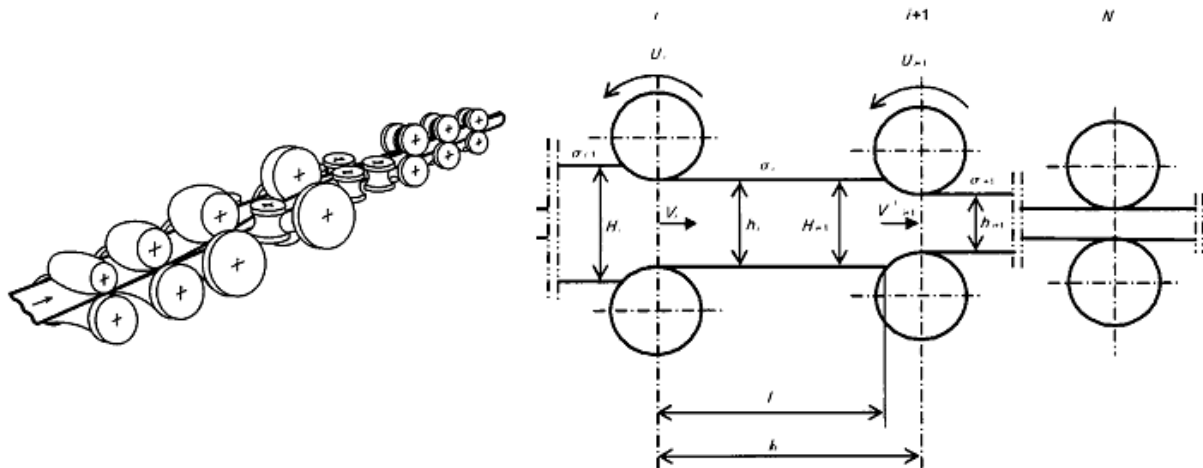


Figura 1 – Esquema de uma laminação contínua em múltiplos passes.

No intuito de investigar a relação entre o número de passes utilizados em uma laminação a frio e o surgimento de tensões residuais e eventuais falhas e defeitos na chapa produzida, foi realizado um estudo comparativo de quatro diferentes configurações para a seqüência de laminação de uma chapa, com redução total de aproximadamente 70% em sua espessura. O modelo computacional termo-mecânico acoplado 3-D, construído em Elementos Finitos utilizando-se o programa Abaqus® v. 6.7, considera os cilindros de laminação como superfícies rígidas. As propriedades térmicas e mecânicas empregadas para o material da chapa são equivalentes às de um aço baixo carbono. As dimensões das partes do sistema estudado foram baseadas numa laminação a frio de chapas metálicas padrão, com cilindros de 740 mm de diâmetros e as chapas laminadas com espessuras iniciais de 130 mm reduzidas pela laminação em passes múltiplos e sucessivos até aproximadamente 40 mm.

O objetivo deste trabalho é analisar o processo de laminação de chapas e perfis metálicos para o estudo das tensões e deformações geradas nos múltiplos passes do material pelas diferentes cadeiras de laminação, examinando as interações do contato chapa-cilindro, avaliando valores dos esforços na laminação e relacionando-os às diferentes combinações na seqüência de deformação do perfil laminado.

Material e Métodos

O estudo fundamentou-se na simulação computacional de quatro processos de laminação, cada um com número diferente de passes utilizados para uma mesma porcentagem de redução total da espessura da chapa. O programa Abaqus foi

utilizado para a construção dos modelos em Elementos Finitos. Observando a Figura 1, verifica-se que uma particularidade deste sistema, para cada cadeia de laminação, é sua simetria em relação a $\frac{1}{4}$ da geometria. Desta forma, pode-se modelar este problema considerando apenas $\frac{1}{4}$ de simetria, reduzindo o esforço computacional. Como visto na Figura 2, as superfícies lateral e inferior da chapa mostram os planos de simetria xy e xz .

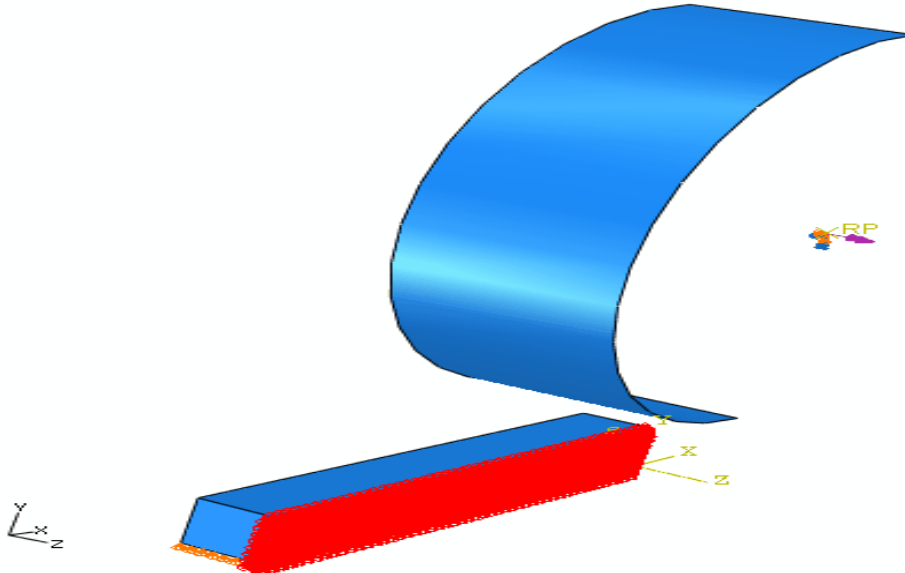


Figura 2 – Simplificação do problema admitindo $\frac{1}{4}$ de simetria.

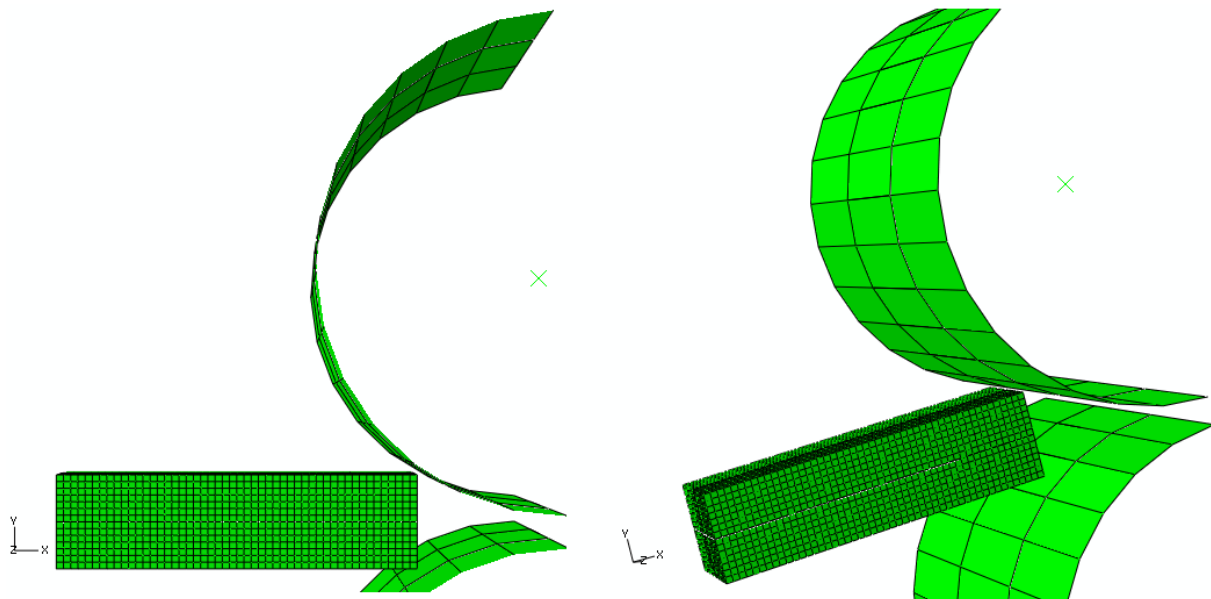


Figura 3 – Duas vistas da malha de Elementos Finitos construída para as simulações numéricas.

Para evitar que as chapas tenham espessura diferente ao longo da largura, os diâmetros dos cilindros de trabalho são maiores no meio que nas extremidades, pois a deformação elástica resulta em uma deflexão maior no meio que nas extremidades dos cilindros ⁽⁶⁾. Entretanto, os cilindros do modelo foram admitidos superfícies rígidas de diâmetro constante e igual a 740 mm. A chapa metálica, de seção quadrada e dimensões iniciais 130 mm x 130 mm x 500 mm, foi discretizada em uma malha de 2453 elementos hexaédricos de oito nós cada, como mostra a Figura 3.

As dimensões e condições de contorno do sistema estão apresentadas na Tabela 1. A chapa tem uma velocidade inicial de 0,84 m/s antes de entrar em contato com a superfície do cilindro de laminação, que gira a 3,28 rad/s. As propriedades térmicas e mecânicas utilizadas nas análises para o material laminado são apresentadas na Tabela 2. A temperatura inicial dos cilindros é de 100°C e da barra, 700°C. O coeficiente de atrito foi admitido variável com a temperatura segundo os valores da Tabela 3. A dependência do sistema com a temperatura se faz apenas para a computação das variáveis do contato entre as superfícies da chapa e do cilindro de laminação.

Tabela 1
Dimensões e condições de contorno para a análise

$\Phi_{\text{cilindro}} = 740 \text{ mm}$	$h_{\text{chapa}} = 130 \text{ mm}$	$V_{\text{chapa}} = 0,84 \text{ m/segundo}$
$\omega_{\text{cilindro}} = 3,28 \text{ rad/segundo}$	$L_{\text{chapa}} = 500 \text{ mm}$	$V_{\text{laminação}} = 1,1 \text{ m/segundo}$

Tabela 2
Propriedades de um aço baixo carbono padrão empregado nas análises.

Calor Específico	400 J/kg.K	Módulo de Elasticidade	150 GPa
Condutividade Térmica	18 W/m.K	Coefficiente de Poisson	0,3
Densidade	7850 Kg/m ³		

Tabela 3
Valores do coeficiente de atrito entre as superfícies em contato

	Temperatura		
	200°C	500°C	700°C
Coeficiente de Atrito	0,3	0,35	0,4

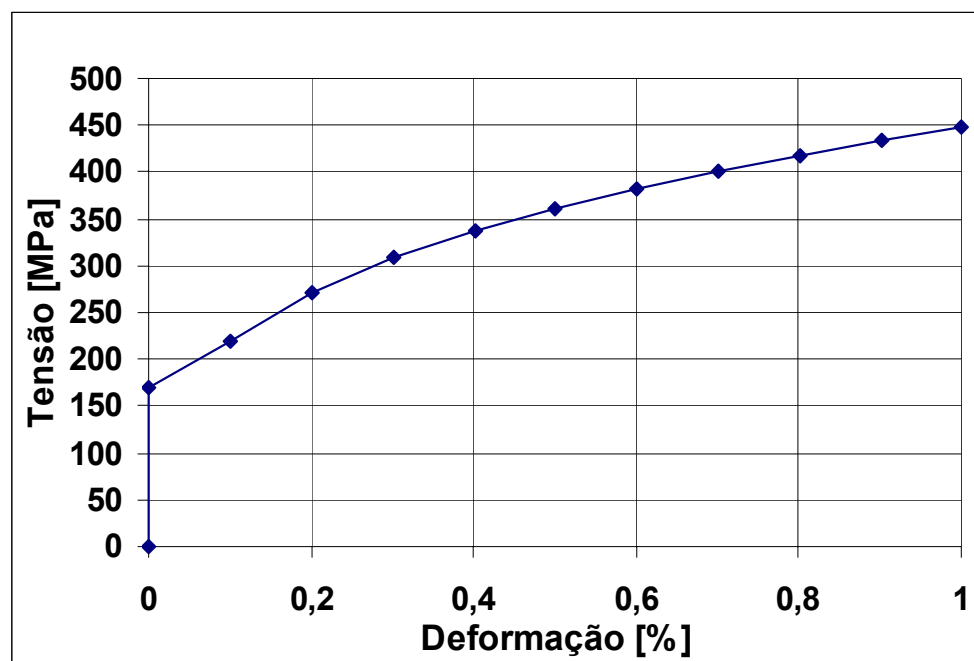


Figura 4 – Comportamento plástico do material utilizado no modelamento das chapas laminadas

O comportamento plástico do material laminado segue os valores apresentados na curva tensão x deformação presente na Figura 4. Para as simulações com mais de um passe, o campo de tensões e deformações gerado em um passe anterior é utilizado como condição inicial do passe seguinte. Quatro diferentes combinações para a seqüência de redução de espessura da chapa laminada foram analisadas a fim de relacionar a quantidade de passes e a variação de espessura da chapa em cada passe às tensões e deformações geradas no processo.

Vale ressaltar que os fenômenos metalúrgicos de recuperação e recristalização, características da laminação a quente, não foram incluídos na análise. Estes fenômenos seriam responsáveis por refinar a microestrutura do material laminado e aliviar as tensões no material pela diminuição da densidade de discordâncias. Sendo assim, parte das tensões na chapa seria eliminada por conta destes fenômenos.⁽⁹⁾

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de redução na espessura das chapas em cada passe, para cada uma das quatro configurações de laminação analisadas, são apresentados na Tabela 4. Nota-se que as espessuras finais das chapas são bastante próximas nas quatro análises (aproximadamente 40 mm).

Tabela 4. Diferentes configurações de laminação analisadas variando-se o número de passes

Simulação	Espessura Inicial (mm)	Espessura após o Passe (mm)			
		1	2	3	4
1	130,00	40,36	-	-	-
2	130,00	70,28	46,06	-	-
3	130,00	98,20	63,30	42,42	-
4	130,00	98,20	75,92	59,36	40,16

Simulação	Espessura Inicial (mm)	Redução por Passe (%)			
		1	2	3	4
1	130,00	68,95	-	-	-
2	130,00	45,94	34,46	-	-
3	130,00	24,46	35,54	32,99	-
4	130,00	24,46	22,69	21,81	32,35

O perfil de tensões ao longo da largura da chapa é apresentado na Figura 5 para os nós do plano referente à metade da espessura da chapa e na Figura 6 para os nós da superfície. Convencionou-se denominar longitudinais as tensões no plano de laminação, normais as tensões no plano normal ao primeiro e paralelo à direção de laminação e transversais as tensões no plano da seção transversal da chapa laminada. São apresentadas as distribuições de tensão ao fim do último passe da seqüência de laminação. Das Figuras 5 e 6 pode-se notar que a laminação em 4 passes apresentou um estado final de tensões mais uniforme que as outras configurações de laminação, sem picos ao longo da largura da chapa, enquanto que o uso de um menor número de passes resultou em picos de tensão no ponto central da largura da chapa tanto em sua superfície quanto no centro. A laminação em 4 passes também apresentou maiores valores de tensões compressivas no centro da chapa, o que leva a um melhor fechamento de defeitos na estrutura do material. Os maiores valores de tensão trativa são observados para a configuração com um e dois passe de laminação.

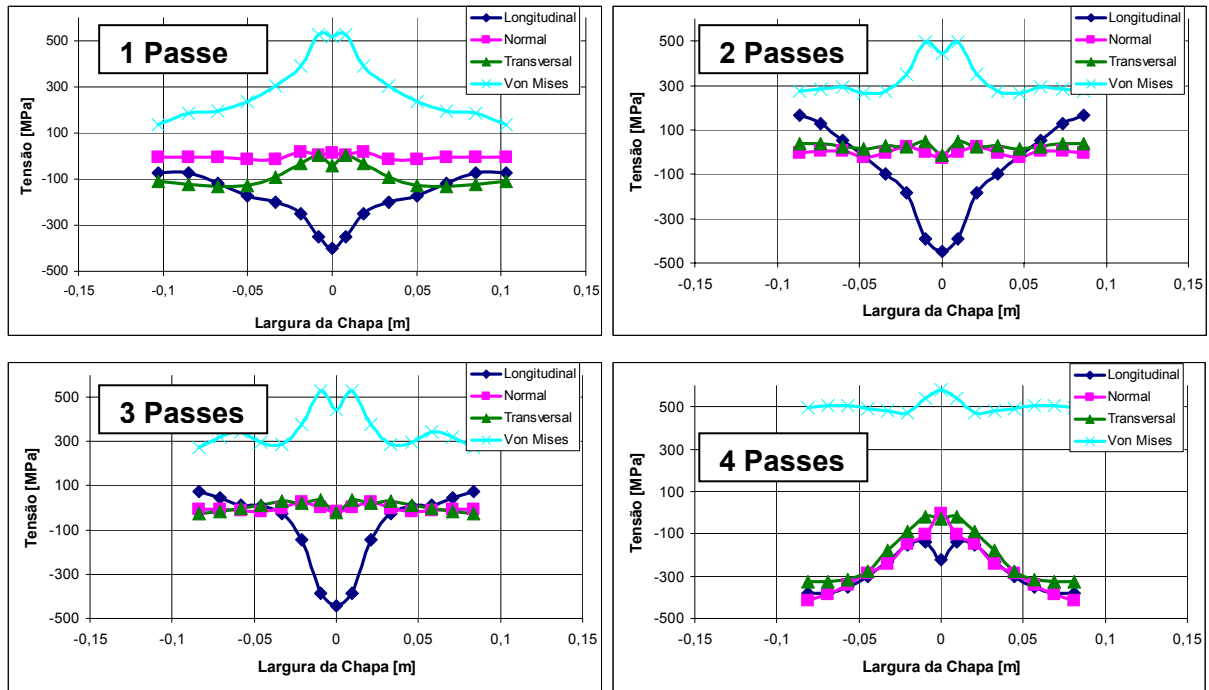


Figura 5 – Comparação entre os níveis de tensão no centro da chapa ao fim do último passe de cada uma das seqüências de laminação.

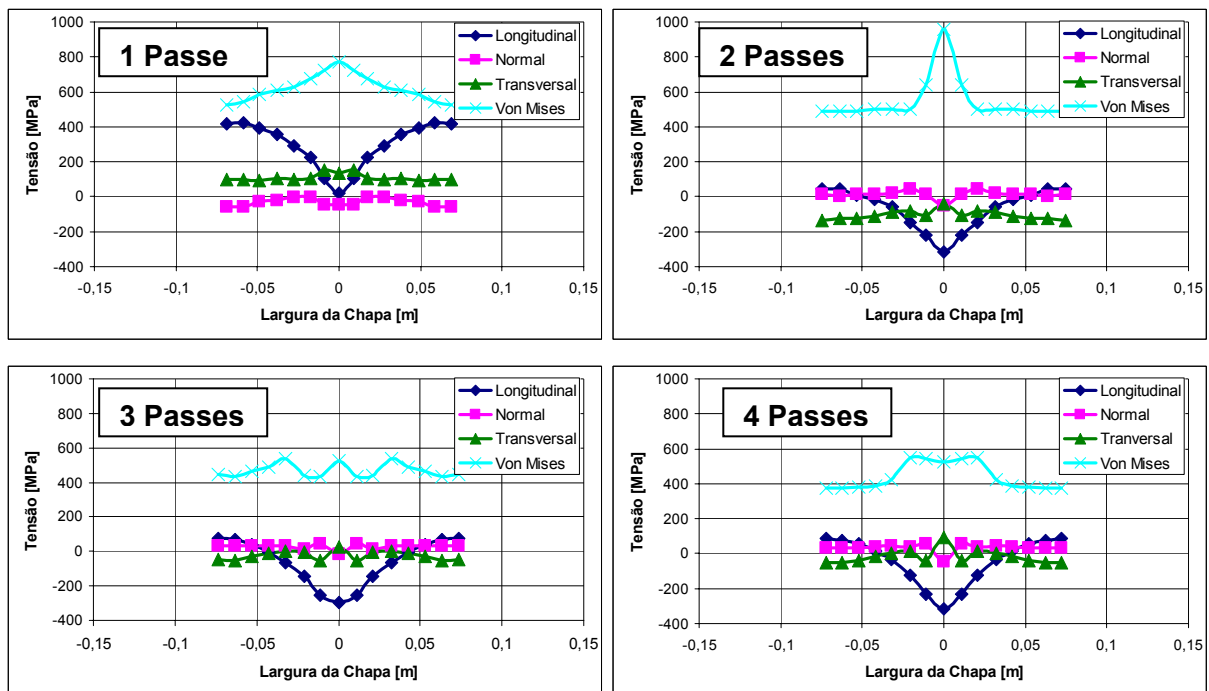


Figura 6 – Comparação entre os níveis de tensão na superfície da chapa ao fim do último passe de cada uma das seqüências de laminação.

Um comparativo entre os valores de deformação plástica equivalente ao final do último passe de cada seqüência de laminação é apresentado nas Figuras 7-A (pontos no centro da chapa) e 8 (pontos na superfície da chapa). As Figuras 7-B, C e D trazem a deformação plástica equivalente no centro da chapa ao fim de cada passe para cada configuração de laminação analisada. Observa-se que a sucessão de passes de laminação leva a um acúmulo de deformação plástica, o que concorda com o trabalho de Sjöström.⁽¹⁾ Da Figura 8 destaca-se que a utilização de um único

passo para imprimir toda a deformação necessária à laminação da chapa até sua dimensão final resulta em níveis de deformação plástica maiores que os observados quando se emprega um maior número de passes.

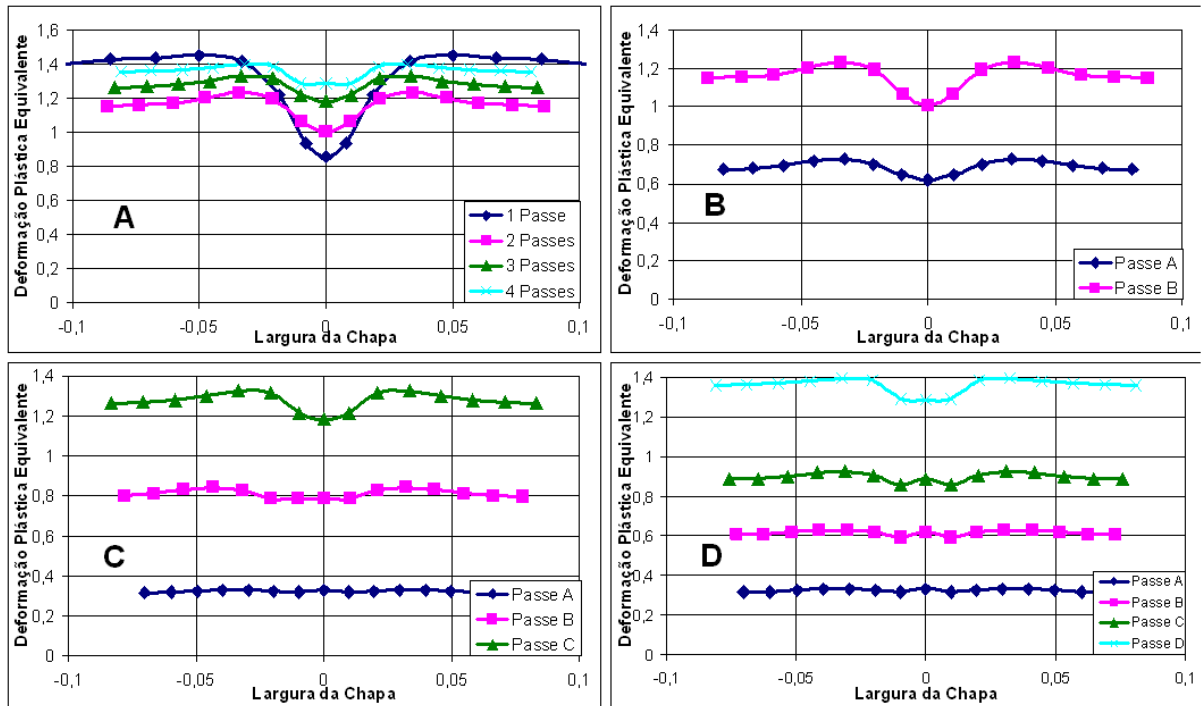


Figura 7 – Valores de Deformação Plástica Equivalente no interior da chapa para as 4 análises numéricas realizadas. (A) Comparação dos valores finais de deformação plástica equivalente variando-se o número de passes. (B) Variação para 2 passes. (C) Variação para 3 passes. (D) Variação para 4 passes.

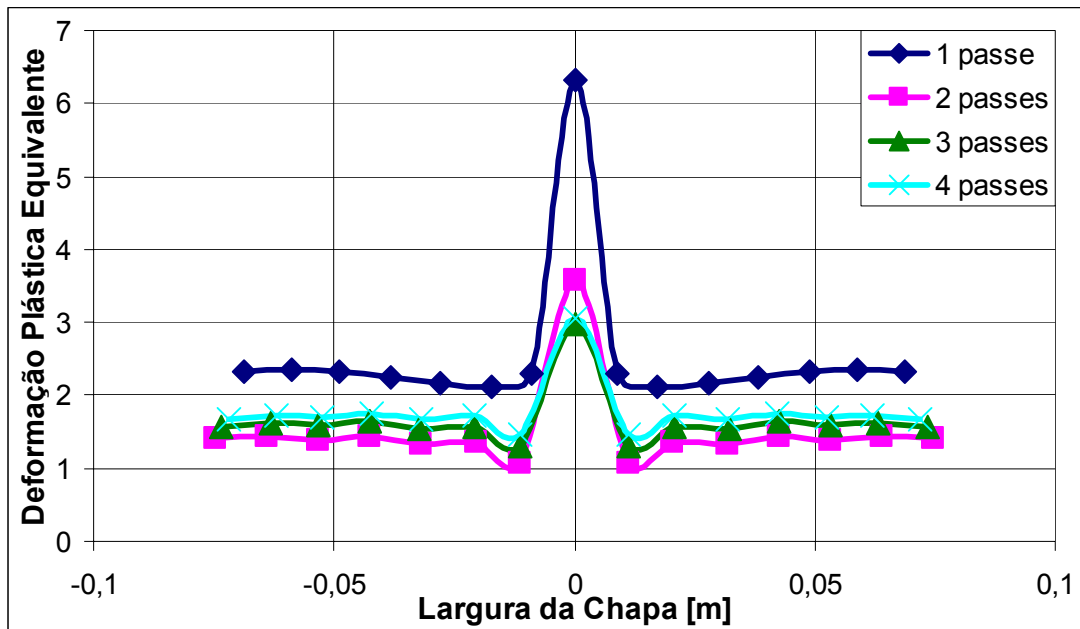


Figura 8 – Valores de Deformação Plástica Equivalente na superfície da chapa ao fim das 4 análises numéricas realizadas.

Em termos práticos, a Figura 8 também sugere que uma falha ou defeito na superfície do material da chapa surgiria preferencialmente em seu centro e não em suas bordas. Já o aparecimento de defeitos internos seria incomum, visto que os valores de deformação plástica equivalente são menores no interior da chapa e as tensões residuais são essencialmente compressivas.

A Tabela 5 mostra os valores das reações de força e momentos de laminação medidos em relação ao eixo longitudinal dos cilindros. Pela nomenclatura utilizada, a seqüência de passes inicia-se pelo passe “A” e é seguida pelos passes de “B” a “D”, dependendo da quantidade de passes utilizada. Quanto maior o valor de redução na espessura, maior a taxa de deformação, pois a velocidade angular dos cilindros foi considerada igual em todas as simulações. Assim, maior também o fluxo de material entre os cilindros e, conseqüentemente, maiores as forças e momentos reativos no eixo do cilindro. Ou seja, a utilização de um menor número de passes ou o uso de elevadas reduções em espessura por passe pode acarretar problemas construtivos e restrições industriais para esse tipo de fabricação, como já foi exposto por Sjöström⁽¹⁾ e Tieu et al.⁽⁵⁾

Tabela 5. Valores de Forças e Momentos na Laminação

	1 Passe	2 Passes		3 Passes			4 Passes			
	Passe A	Passe A	Passe B	Passe A	Passe B	Passe C	Passe A	Passe B	Passe C	Passe D
Força (10 ³ xKN)	7,5	4	4	2,3	3,3	3,7	2,3	2,6	2,6	3,5
Momento (KN.m)	800	360	330	200	310	300	200	225	230	275

Comparando-se as simulações com 1 e 4 passes, nota-se que há, praticamente, uma divisão dos 800 KN.m utilizados para 1 passe, em 200 KN.m utilizados em cada passe da laminação em 4 passes. Pode-se ainda construir uma relação direta entre os dados das Tabelas 4 e 5, confrontando as porcentagens de redução com as forças e momentos da laminação, obtendo-se uma proporcionalidade direta entre essas medidas.

3 CONCLUSÃO

As simulações desenvolvidas neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- As análises em elementos finitos foram capazes de explicar e reproduzir os fenômenos observados durante a laminação a frio de chapas metálicas. Em particular, os resultados numéricos indicam que a utilização de poucos ou de um único passe de laminação gera tensões residuais maiores do que quando se emprega um maior número de passes de laminação.
- Maiores taxas de deformação geram maiores tensões residuais e para uma mesma redução percentual na espessura da chapa observa-se maior concentração de tensões residuais quanto menor for o número de passes utilizados.
- A variação do número de passes empregados para uma mesma redução de espessura da chapa gera diferentes distribuições de tensões no material da chapa.
- As forças de laminação são maiores quanto maiores as porcentagens de redução de espessura da chapa em um único passe.
- Os resultados dos modelos estão qualitativamente em concordância com o trabalho de Sjöström⁽¹⁾ e com os demais trabalhos da literatura técnica sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- 1 SJÖSTRÖM, A. The Effect of High Reductions per Pass on Material Properties in the Hot Rolling of Low-alloyed Steel. In: Journal of Mechanical Working Technology. Amsterdam, 1982. p. 347-360.
- 2 STAHLBERG, V. Slip-line field theory applied to rolling, Scand. J. Metall, 7, 1978. p. 42-48.
- 3 ZHANG, J. Z.; ZHANG X. P. Formulas of Tension of Continuous Rolling Process. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol 20, N° 6. 2007. p. 403-416.
- 4 KIUCHI, M.; ABE, K.; ONODERA, R. Computerized numerical simulation of roll forming process, In: Proc. 5th ICTP Japan, 1996. p. 493-496.
- 5 TIEU, A.K.; YOU, C.; ZHU, H. T.; LU, C.; JIANG, Z.Y.; D'ALESSIO, G. Material Resistance and Friction in Cold Rolling. In: 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization. Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- 6 PARK, J. J. Prediction of the flow stress and grain size of steel during thick-plate rolling. In: Journal of Materials Processing Technology 113, 2001. p. 581-586.
- 7 LOPES, W.; CORRÊA, E. C. S.; CAMPOS, H. B.; AGUILAR, M. T. P.; CELTIN, P. R. Efeito da Pré-deformação em Laminação no Comportamento Mecânico do Aço Inoxidável AISI 430E Solicitado por Cisalhamento. In: 17° CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.
- 8 MÄNTILÄ, P.; KORHONEN, R.; JONSSON, N. G. Improved Thickness and Shape Accuracy with Advanced Pass Scheduling in Plate Rolling. In: Journal of Materials Processing Technology, 34, 1992. p. 255-263
- 9 XAVIER, R. R.; CARVALHO, M. A.; BOCALLINI JUNIOR, M.; SINATORA, A.; SOUZA, R. M. Desenvolvimento e caracterização de desgaste de cilindros para laminadores de tiras a quente. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 40, 2003, Vitória. São Paulo: ABM, 2003. p. 215-223.