

# SIMULAÇÃO DO PASSE DE ENCRUAMENTO (SKIN-PASS) DE CHAPAS DE AÇO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS<sup>1</sup>

Alexandre Moura Giarola<sup>2</sup>  
Cristiano da Costa Cunha<sup>3</sup>  
Antônio Eustáquio de Melo Pertence<sup>4</sup>  
Maria Teresa Paulino Aguiar<sup>5</sup>  
Haroldo Béria Campos<sup>4</sup>  
Paulo Roberto Cetlin<sup>6</sup>

## Resumo

O passe de encruamento (*skin pass*) em chapas de aço envelhecíveis é de grande importância por que elimina a presença de bandas de Lüders em artefatos fabricados com estas chapas. As heterogeneidades de deformação associadas ao passe de encruamento são, porém pouco compreendidos, e o número de pesquisas sobre o assunto é limitado. O presente trabalho analisa a distribuição de deformação em chapas envelhecíveis submetidas ao passe de encruamento, empregando a simulação numérica do processos através do método dos elementos finitos.

**Palavras-chave:** Bandas de Lüders; Elementos finitos; Distribuição de deformação; Passe de encruamento.

## THE SIMULATON OF THE SKIN-PASS OF STEEL SHEETS THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD

## Abstract

The skin-pass of aged steel sheets is of great importance because it eliminates the presence of Lüders bands in the products manufactured with these sheets. The strain heterogeneities in the sheet caused by the skin pass are not well understood and there is a limited number of studies covering the subject. The present work analyses the strain distribution in aged steel sheets submitted to a skin-pass, employing a numerical simulation of the processes based on the finite element method.

**Key words:** Lüders bands; Finite elements; Strain distribution; Skin-pass.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 47º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 26 a 29 de outubro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Minas Gerais.

<sup>4</sup> Professor Associado do Depto de Engenharia Mecânica da UFMG

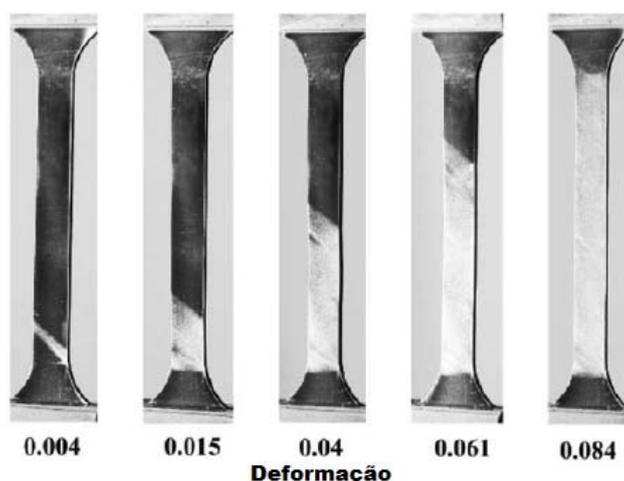
<sup>5</sup> Professora Associada do Depto de Engenharia de Materiais e Construção Civil da UFMG

<sup>6</sup> Professor Titular do Depto de Metalurgia e Materiais da UFMG

## 1 INTRODUÇÃO

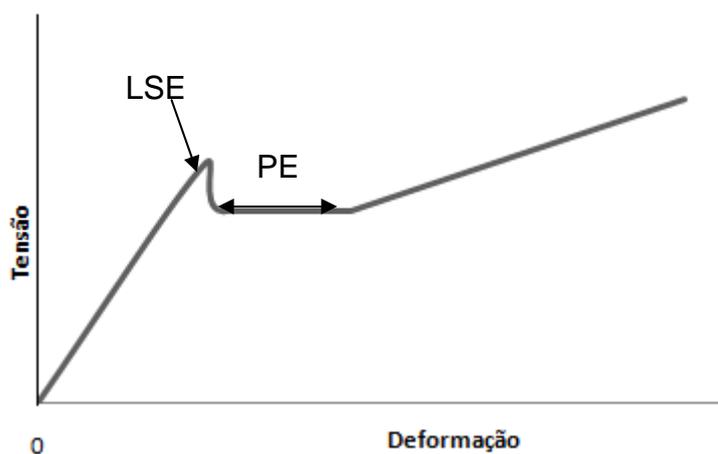
Produtos de aços laminados à frio são de ampla utilização principalmente na indústria automotiva. O processo de laminação de chapas finas à frio é responsável pelo bom acabamento superficial e alta precisão dimensional exigidas pelos clientes.<sup>(1-3)</sup>

Bandas de Lüders são regiões de deformação plástica localizada responsáveis pelo escoamento não-homogêneo da em alguns materiais metálicos, também conhecido como efeito Piobert.<sup>(4)</sup> No caso do ensaio de tração, tais bandas comumente nucleiam-se em uma região de concentração de tensão e propagam-se com um ângulo de aproximadamente 45°, <sup>(5)</sup> como ilustrado na Figura 1.



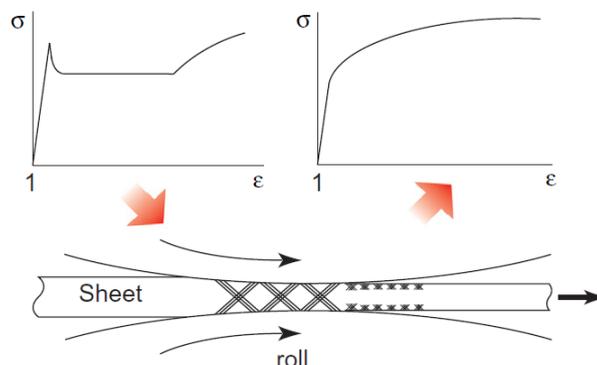
**Figura 1.** Propagação das bandas de Lüders no ensaio e tração.<sup>(5)</sup>

As bandas de Lüders ocorrem após o Limite de Escoamento Superior (LSE) e durante o patamar de escoamento (PE) no ensaio de tração de chapas de aço envelhecidas, como ilustrado na Figura 2. Para que tais bandas não ocorram em artefatos fabricados com essas chapas, causando danos inaceitáveis à aparência desses produtos, a última etapa de fabricação das chapas envolve uma leve laminação a frio, com reduções de espessura de 1% a 2% (laminação de encruamento ou *skin-pass*), que elimina o problema em questão.<sup>(3,6)</sup>



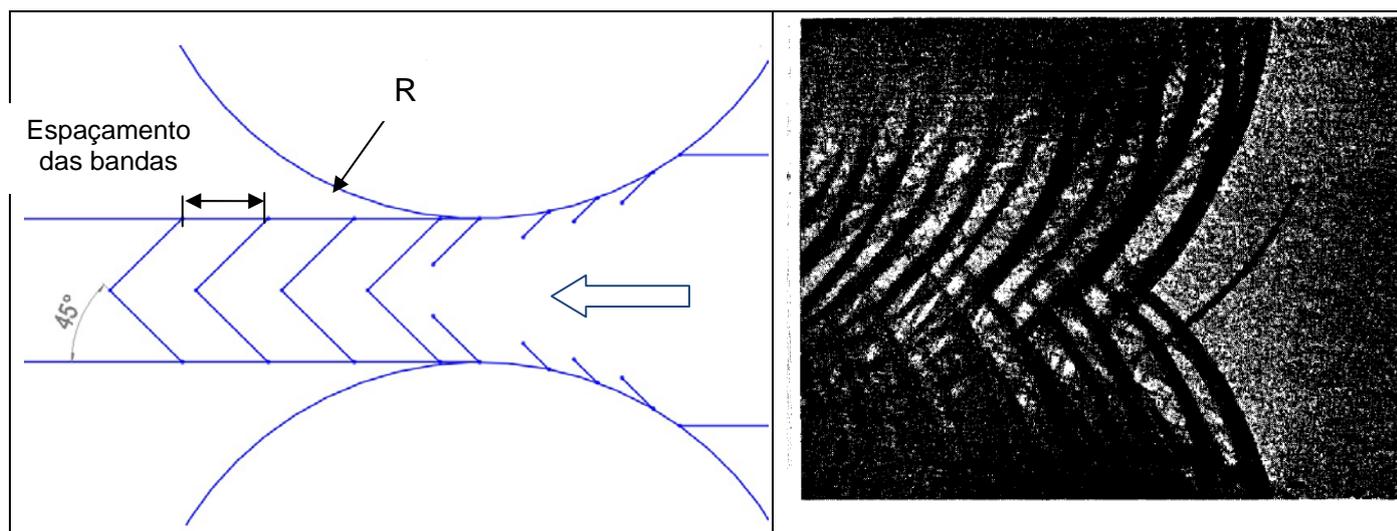
**Figura 2.** Curva esquemática do Limite de escoamento superior (LSE) e patamar de escoamento (PE) no ensaio à tração de chapas de aço envelhecidas.

A Figura 3 apresenta o mecanismo proposto na literatura<sup>(6)</sup> para a eliminação dos problemas causados pelas bandas de Lüders em artefatos fabricados com chapas envelhecidas. O passe de encruamento introduz um grande número de bandas de Lüders incipientes na chapa, que se propagam de forma limitada nas peças fabricadas com a chapa, não causando danos à aparência de tais artefatos.



**Figura 3.** Ilustração esquemática da formação de bandas de Lüders no passe de encruamento.<sup>(6)</sup>

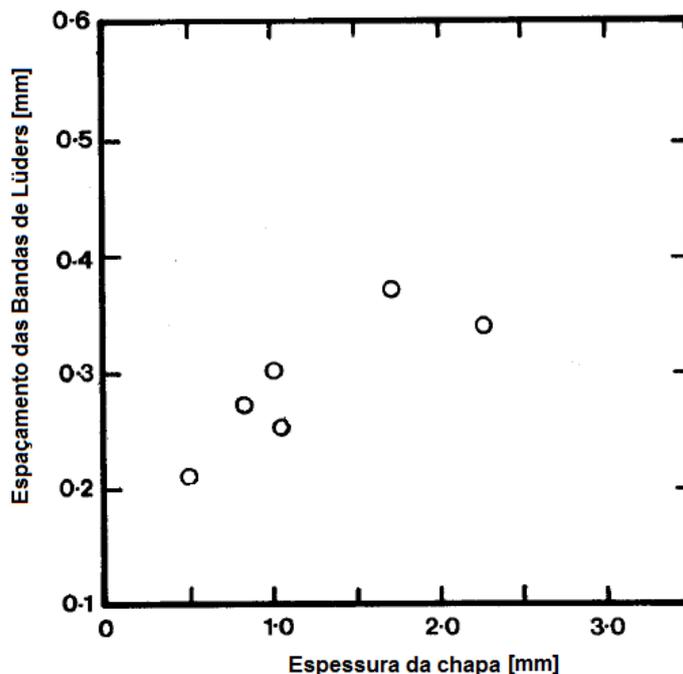
As bandas se formam da superfície da chapa para seu interior, estão dispostas a 45° com a direção de laminação e apresentaram um espaçamento regular, como ilustrado esquematicamente na Figura 4.<sup>(7)</sup>



**Figura 4.** Ilustração esquemática da propagação das bandas de Lüders durante o passe de encruamento<sup>(7)</sup> e resultado experimental obtido na literatura para 0,9% de deformação.<sup>(8)</sup>

O espaçamento das bandas é um importante parâmetro que Lake estudou para vários tipos de aço e condições de laminação. Diversos estudos foram feitos variando espessura, composição química das chapas, diâmetro do cilindro e acabamento superficial.<sup>(9)</sup>

O espaçamento das bandas é influenciado pela espessura da chapa, ilustrado na Figura 5. O espaçamento das bandas de Lüders aumenta com o aumento da espessura da chapa.<sup>(9)</sup>



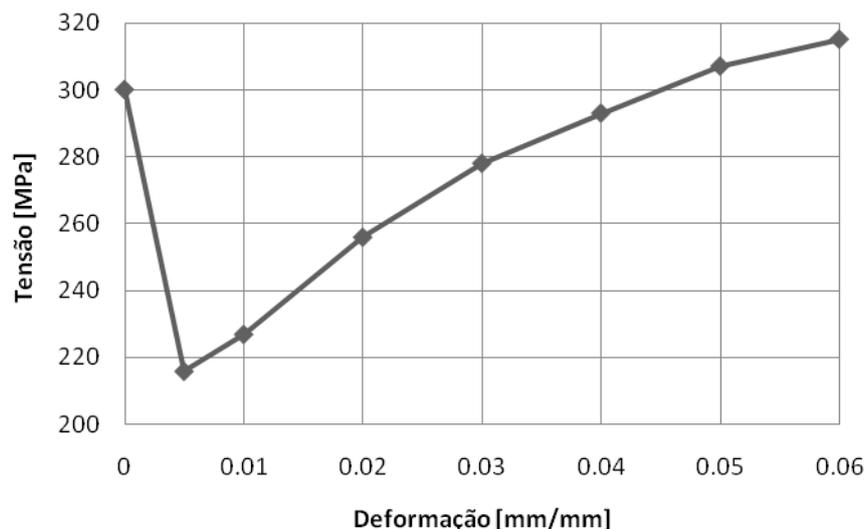
**Figura 5.** Espaçamento das bandas de Lüders em função da espessura da chapa, para cilindros com ótimo acabamento superficial.<sup>(9)</sup>

De acordo com a literatura, as variáveis que afetam a distribuição de deformação nas chapas, causada pelo passe de encruamento, seriam as seguintes: espessura da chapa, tamanho de grão, grau de redução no passe, velocidade de laminação e condições de atrito entre a chapa e o cilindro, considerando-se a rugosidade do cilindro.<sup>(7,9)</sup>

A análise do passe de encruamento através do método dos elementos finitos tem sido limitada. O objetivo do presente artigo é a análise da distribuição de deformação causada pelo passe de encruamento em uma chapa de aço com um certo grau de envelhecimento; considerou-se uma redução fixa durante o passe e variou-se a espessura inicial da chapa.

## 2 METODOLOGIA

Foi utilizado o software de elementos finitos Deform 2D V8.0 (*Scientific Forming Technologies Corporation*), considerando a condição de estado plano de deformações, sob processamento isotérmico a 20°C. Utilizou-se um material envelhecido com a curva de fluxo ilustrada na Figura 6.



**Figura 6.** Curva de fluxo dos materiais utilizados nas simulações.

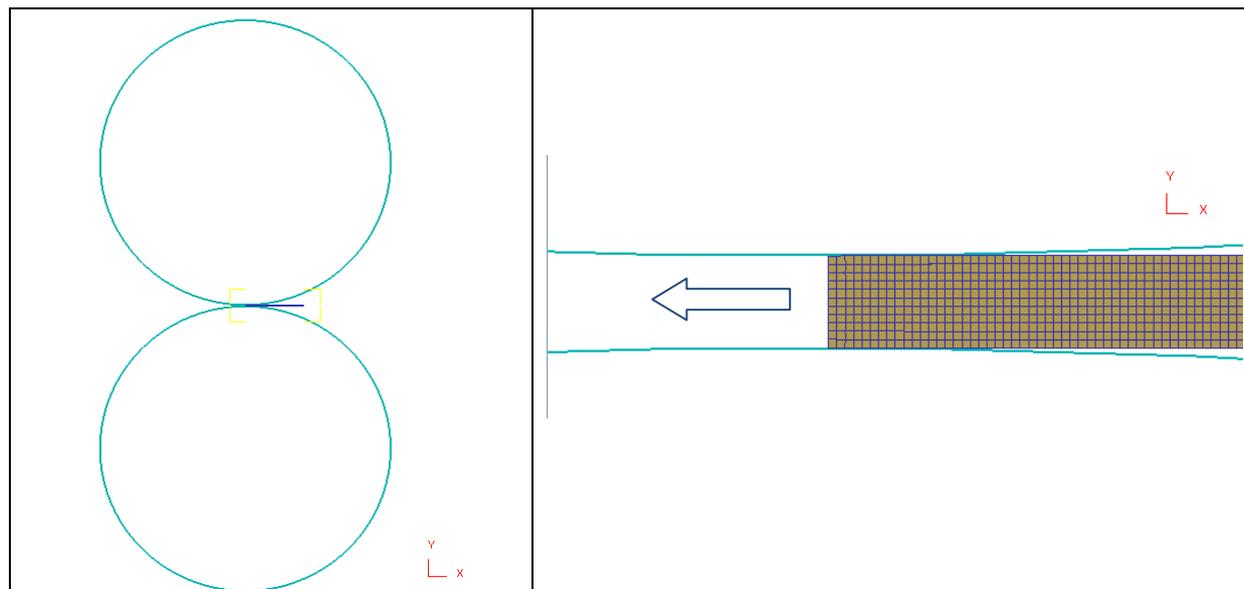
A Tabela 1, resume as condições de entrada no software Deform 2D.

**Tabela 1.** Resumo das condições da simulação utilizadas

Coeficiente de atrito	0,12
Número de etapas na simulação	150
Tempo da etapa	0,0004 s
Velocidade angular dos cilindros	6,24 rad/s
Temperatura	20°C
Malha inicial	6.500 elementos plásticos

As chapas tinham um comprimento inicial de 50 mm e as seguintes espessuras: 0,5 mm; 1,0 mm; 1,5 mm; 2,0 mm e 3,0 mm. Os cilindros de laminação tinham diâmetro de 200 mm. A redução de espessura em todos os casos foi de 1% da espessura da chapa. Inicialmente, os cilindros tinham uma luz maior que a da espessura inicial da chapa; a ponta desta chapa foi posicionada entre os cilindros, que foram aproximados até que se alcançasse uma redução de espessura de 1% da espessura inicial da chapa. Finalmente, girou-se os cilindros com a velocidade angular mostrada na Tabela 1.

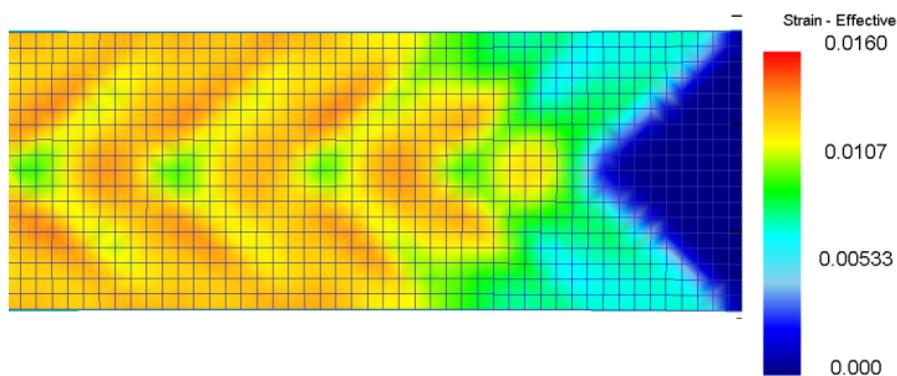
A geometria do modelo computacional utilizado para simulação numérica e a malha empregada são ilustradas na Figura 7.



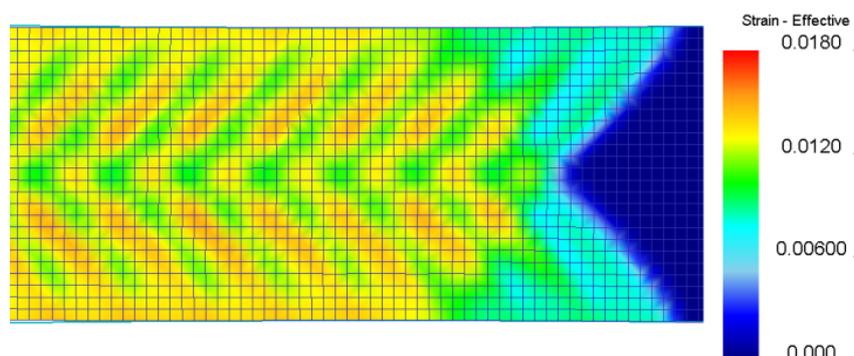
a) b)  
**Figura 7.** a) Geometria do modelo computacional b) Detalhe da malha utilizada na simulação.

### 3 RESULTADOS

As Figuras 8 a 12 mostram os resultados obtidos na simulação por elementos finitos para a distribuição de deformação efetiva nas chapas, após o passe de encruamento, para as diversas espessuras iniciais consideradas.



**Figura 8.** Distribuição de deformação na chapa de espessura inicial de 0,5 mm.



**Figura 9.** Distribuição de deformação na chapa de espessura inicial de 1,0 mm.

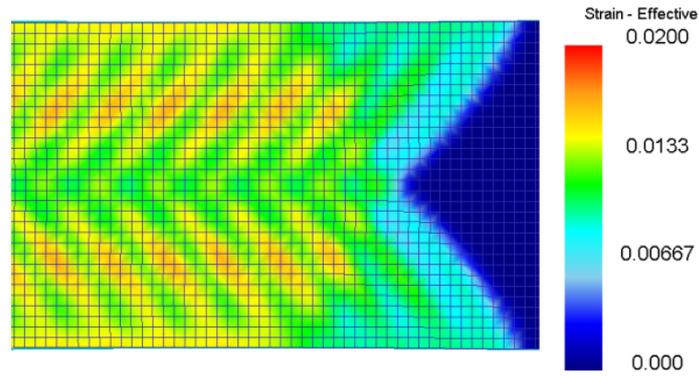


Figura 10. Distribuição de deformação na chapa de espessura inicial de 1,5 mm.

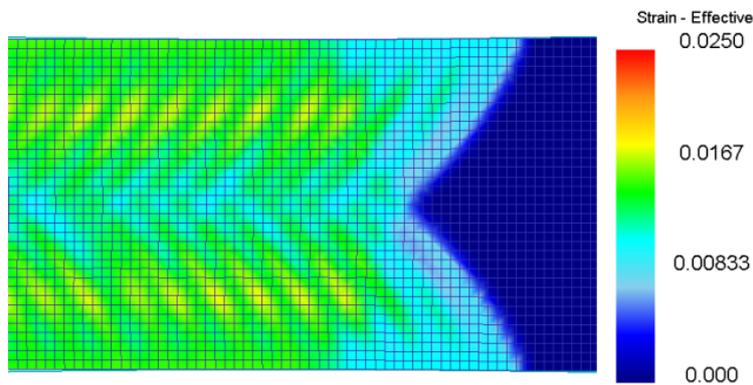


Figura 11. Distribuição de deformação na chapa de espessura inicial de 2,0 mm.

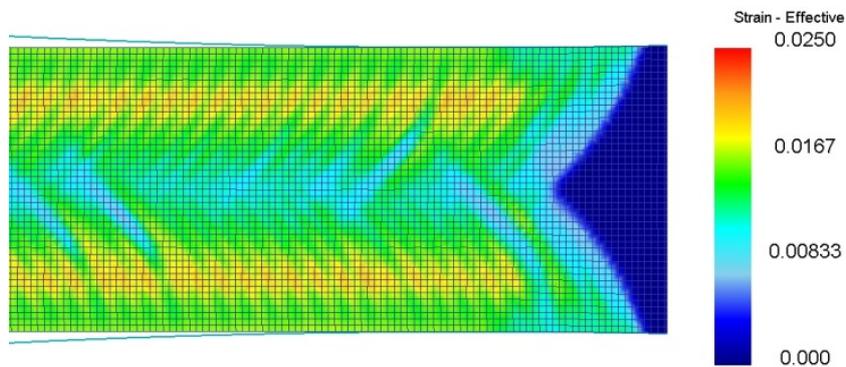


Figura 12. Distribuição de deformação na chapa de espessura inicial de 3,0 mm.

A medida do espaçamento médio das bandas foi feita utilizando a ferramenta de medida contido no software Deform 2D V8. O resultado é ilustrado na Figura 13.

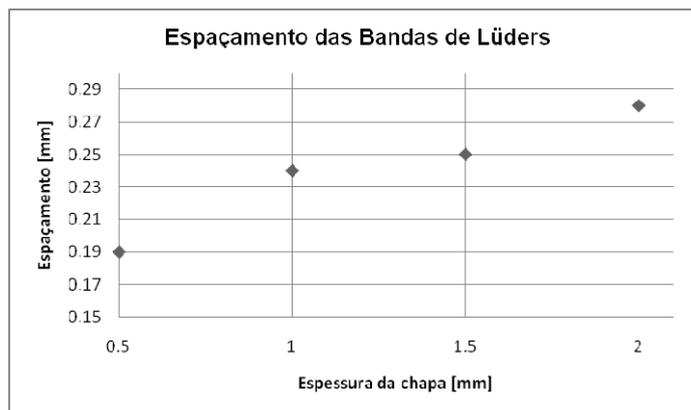


Figura 13. Espaçamento das bandas de Lüders em função da espessura da chapa laminada a 1%.

## 4 DISCUSSÃO

A observação das Figuras 8 a 12 indica que o comprimento selecionado para a chapa permitiu, em todos os casos, alcançar um estado estacionário, onde o padrão de distribuição de deformações não mais se modificava ao longo da o comprimento da chapa. Em todos os casos ocorreu uma pronunciada heterogeneidade de deformação, com a formação de bandas de deformação (bandas de Lüders) regularmente espaçadas.

É digno de nota que a orientação dessas bandas (na forma de “setas apontando para a cabeça da chapa”) é na mesma direção encontrada na literatura<sup>(7)</sup> e mostrada na Figura 4.

Os resultados aqui relatados concordam com aqueles indicados por Lake.<sup>(9)</sup> À medida que aumenta a espessura inicial da chapa, as bandas tornam-se mais finas e com espaçamento maior; além disso, a deformação na região central da chapa diminui, ou seja, a deformação concentra-se mais na camada superficial da chapa, de forma semelhante àquela descrita na chapa de saída ilustrada na Figura 3.<sup>(6)</sup>

Observa-se que a deformação mostrada nas figuras 11 e 12 exibem uma certa assimetria de deformação em relação à linha média da chapa, indicando a conveniência de se realizar a simulação por elementos finitos com os dois cilindros de laminação, e não somente com um deles, aceitando uma simetria de comportamento. Tal procedimento é comumente adotado visando uma economia no tempo computacional.

O espaçamento das bandas no modelo computacional, Figura 13 apresentou o mesmo comportamento de crescimento com o aumento da espessura da chapa, mas o valor encontrado foi menor que da medida experimental Figura 5.

## 5 CONCLUSÃO

De uma maneira geral, os resultados mostram a conveniência de se estudar o desenvolvimento das bandas de Lüders através do método de elementos finitos, uma vez que o desenvolvimento das bandas seguiu os modelos verificados experimentalmente.

A forma das bandas e a sua profundidade são influenciadas pelo valor da espessura inicial da chapa.

O aumento da espessura da chapa passa a promover nas regiões internas da chapa uma maior heterogeneidade.

Maiores estudos devem ser realizados para analisar o espaçamento das bandas experimental e numérico pois tais valores de espaçamento se mostraram diferentes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e do Ministério da Educação – CAPES.

## REFERÊNCIAS

- 1 TAKITA, M., OHASHI, H. Application of High-Strength Steel Sheets for Automobiles in Japan. *Revue de Metallurgie*, v.98, n.10, p.899-909, oct. 2001.
- 2 Cunha C.C. Simulação Computacional via Elementos Finitos da Laminação de Encruamento (agosto 2007 a julho 2008). 2007. Iniciação Científica. (Graduando em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Paulo Roberto Cetlin, relatório final de pesquisa.
- 3 REED-HILL, R.E. Princípios de metalurgia física. 2. ed. Rio de Janeiro: GuanabaraDois, 1982..
- 4 CORRÊA, E.C.S ; SILVA, J.PB ; BUBANI, T.C. ; CETLIN, P. R. . Análise da Formação de Bandas de Lüders Através do Método de Elementos Finitos. In: 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - 4º COBEF, 2007, Estância de São Pedro - SP. Anais do 4º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - 4º COBEF, 15 a 18 de abril, 2007. p. 1-6.
- 5 SUN, H.B., YOSHIDA, F., MA, X., KAMEI, T., OHMORI, M. Finite element simulation of the propagation of Lüders band and effect of stress concentration. *Materials Letters*, v. 57, p. 3206-3210, 2003
- 6 YOSHIDA F., KANEDA Y. YAMAMOTO.S./ *International Journal of Plasticity* v.24 n10 p. 1792–1818, aug. 2008
- 7 FERNANDES R.C.O. Efeito da Temperatura de Encharque no Recozimento Contínuo e da Deformação na Laminação de Encruamento sobre as Propriedades Mecânicas de um Aço Microligado Laminado a Frio. 2007. Dissertação (Mestrado em Curso de Pós Grad de Eng Metal e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, . *Orientador:* Paulo Roberto Cetlin
- 8 HUNDY, B.B. “Inhomogeneous Deformation During the Temper-Rolling of Annealed Mild Steel”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, pp.313-314,1955.
- 9 LAKE, J. S. H. Control of Discontinuous Yielding by Temper Rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*, v.12, p.35-66, 1985.