

# ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE BANDAS DE LÜDERS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

## **Elaine Carballo S. Corrêa**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.  
Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte – MG. 30160-030. elaine@demet.ufmg.br

## **João Paulo Batista Silva**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.  
Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte – MG. 30160-030.

## **Franco Bubani**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.  
Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte – MG. 30160-030.

## **Paulo Roberto Cetlin**

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais.  
Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte – MG. 30160-030.

**Resumo.** *A ocorrência de bandas de Lüders em aços de baixo teor de carbono é um fenômeno amplamente conhecido e investigado, cujos estudos incluem desde a natureza das bandas até os aspectos cinéticos associados à formação e propagação das mesmas. No entanto, a análise dessa instabilidade plástica através de técnicas numéricas é tema ainda pouco explorado. Neste trabalho, a nucleação e a propagação de bandas de Lüders no aço baixo carbono durante testes de tração foi avaliada através do método de elementos finitos. Diferentes condições foram consideradas no estudo, envolvendo curvas de fluxo com valores de tensão inicial distintos. Além da observação visual do desenvolvimento das bandas, os resultados associados às curvas carga x deslocamento das amostras e às curvas deformação efetiva x tempo de três regiões das mesmas são apresentados, possibilitando a discussão do fenômeno e evidenciando a conveniência de usar técnicas numéricas para a análise. Os resultados mostraram que o número de bandas nucleadas e o modo de propagação é influenciado pelo valor de tensão de escoamento inicial da curva de entrada fornecida ao método, afetando, portanto, as características do patamar de escoamento do mesmo.*

**Palavras-chave:** *deformação, bandas de Lüders, tração, elementos finitos.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Bandas de Lüders são regiões de deformação plástica localizada, cuja nucleação e propagação produzem o chamado escoamento descontínuo, também conhecido como efeito Piorbet. Esse fenômeno, observado em alguns materiais metálicos durante a transição do comportamento elástico para o comportamento plástico, é classicamente associado à interação das discordâncias com átomos de soluto intersticiais, que agem no sentido de imobilizá-las com a formação de atmosferas<sup>(1,2)</sup>, em posições de menor energia na rede cristalina. Inicialmente, observa-se a ocorrência do limite superior de escoamento, correspondente à liberação das discordâncias em uma determinada região do metal. Em seguida, verifica-se o limite inferior de escoamento, equivalente à tensão necessária para movimentar esses defeitos lineares, que se multiplicam. A partir deste momento, escoamento irregular ou valores de tensão praticamente constantes são exibidos, dependendo se uma única banda foi desenvolvida, espalhando-se por todo o metal, ou se diversas bandas foram formadas, caracterizando a cada conjunto nucleação/propagação uma porção do serrilhado da curva tensão-deformação.

Apesar de serem originalmente associadas a amostras de aço com baixo teor de carbono e testes de tração uniaxial, as bandas de Lüders podem ser observadas em outros metais, como ligas de alumínio<sup>(2)</sup>, e sob diversos tipos de carregamento, simples e complexos<sup>(3,4)</sup>, inclusive durante a estampagem de chapas<sup>(4)</sup>. Dessa forma, além da importância em termos teóricos, relativa à possibilidade de maior compreensão dos mecanismos de deformação plástica nos metais, a análise do escoamento descontínuo apresenta aplicações industriais, podendo ser associada ainda aos fenômenos de envelhecimento estático e dinâmico nos materiais.

Diversas investigações foram conduzidas sobre o tema, envolvendo tanto as características microscópicas como os aspectos macroscópicos do desenvolvimento das bandas de Lüders<sup>(3,5,6)</sup>. A determinação do ângulo e da velocidade de propagação das mesmas, a influência da quantidade na tensão de escoamento e os efeitos dos fatores metalúrgicos (estrutura cristalina, composição química e tamanho de grão) e das condições de ensaio (geometria da amostra, taxa de deformação e tipo de carregamento) são exemplos de estudos conduzidos, compreendendo abordagens teóricas e experimentais. Por outro lado, apesar da praticidade e possibilidade de obtenção de informações detalhadas, a utilização de métodos numéricos na análise do escoamento descontínuo parece ser discreta<sup>(4,6)</sup>, contrastando com os processos de deformação plástica dos metais em geral, nos quais estas técnicas, em especial o método de elementos finitos, vem sendo aplicadas tanto em termos de pesquisa como industrialmente<sup>(7)</sup>.

Dentro deste contexto, neste trabalho a nucleação e a propagação de bandas de Lüders em amostras de aço baixo carbono durante testes de tração foi avaliada através do método de elementos finitos, considerando como dados de entrada do metal duas curvas de fluxo distintas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A simulação numérica da formação e propagação das bandas de Lüders foi realizada através do método de elementos finitos, utilizando o software comercial DEFORM 2D versão 9.0, no regime plástico e considerando estado plano de deformação. O processo foi conduzido através de ensaios de tração, empregando corpos de prova retangulares, com largura e comprimento de 10mm e 100mm, respectivamente. A malha usada no trabalho foi de quatro nós, com um número total de 4928 elementos. Os testes foram realizados em 500 passos, com um tempo de 0,1s por passo. Por fim, a velocidade escolhida para a operação foi de 0,1mm/s, levando a um alongamento ou extensão total da amostra de 5mm.

Em relação aos parâmetros de entrada ou características do metal, duas curvas distintas baseadas em testes de tração de corpos de prova de aço com baixo teor de carbono foram consideradas no trabalho, cujos dados foram introduzidos ponto a ponto no programa. A diferença entre as mesmas foi o valor de limite superior de escoamento LS: 220MPa para o material 1 e 240 MPa para o material 2, conforme pode ser observado na Figura 1.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 a 4 são apresentados os resultados da simulação numérica do ensaio de tração conduzida com o material 1 (Figura 1(a)), incluindo a curva carga x deslocamento do corpo de prova, as imagens de nucleação e propagação das bandas de Lüders e a evolução da deformação em três regiões distintas da amostra (a 25mm, 50mm e 75mm da base da mesma).

Considerando a Figura 2, observa-se a ocorrência do escoamento descontínuo com extensão ou alongamento de aproximadamente 0,62mm e carga relativa ao limite superior de escoamento de 2540N. De acordo com a Figura 3, verifica-se que, como relatado na literatura<sup>(1-3)</sup>, esse limite superior de escoamento corresponde à nucleação de bandas de Lüders, fazendo um ângulo de cerca de 45° com o eixo de aplicação da força de tração. No caso específico deste trabalho, duas bandas foram inicialmente formadas, como pode ser constatado para tempo de 0,2s ou deslocamento de 0,02mm (Figura 3(a)) e claramente confirmado após 0,8s ou 0,08mm (Figura 3(b)). A partir deste momento, discreta alteração na banda superior é observada, em contraste com a inferior, que se

propaga tanto em direção ao topo como em direção à base do corpo de prova (Figura 3(c)), fenômeno que pode ser associado à região relativamente linear do patamar (Figura 2). Após cerca de 3s ou 0,3mm (Figura 3(d) e (e)), a situação parece inverter, e a banda superior começa a propagar-se, caracterizando novamente valores de carga praticamente constantes. Em seguida, ambas se espalham pela amostra (Figura 3(f)) e, por fim, após 6,2s, todo o corpo de prova já foi deformado (Figura 3(g)), conforme havia sido revelado na curva da Figura 2, dando início ao período de deformação plástica uniforme do metal.

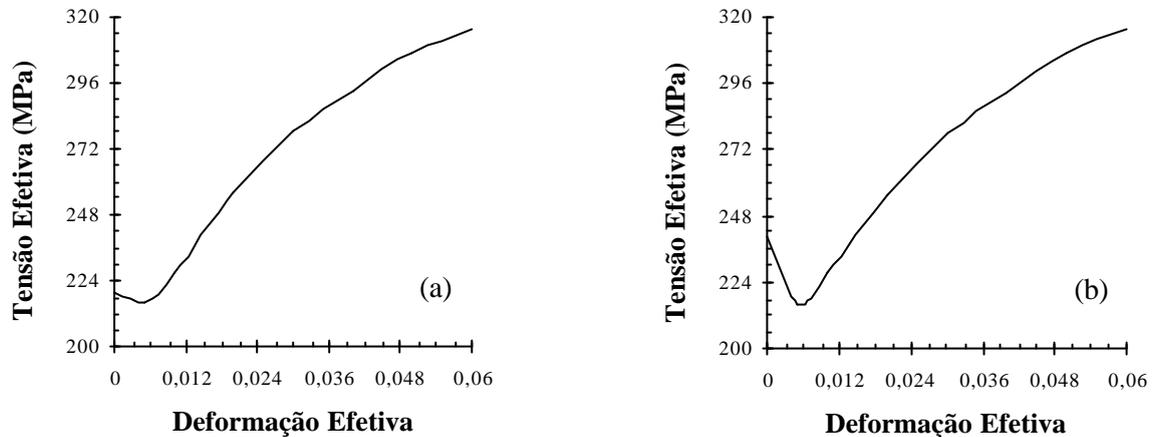


Figura 1. Curvas utilizadas na simulação numérica do ensaio de tração: (a) curva/material 1 – limite superior de escoamento  $LS = 220\text{MPa}$  e (b) curva/material 2 - limite superior de escoamento  $LS = 240\text{MPa}$ .

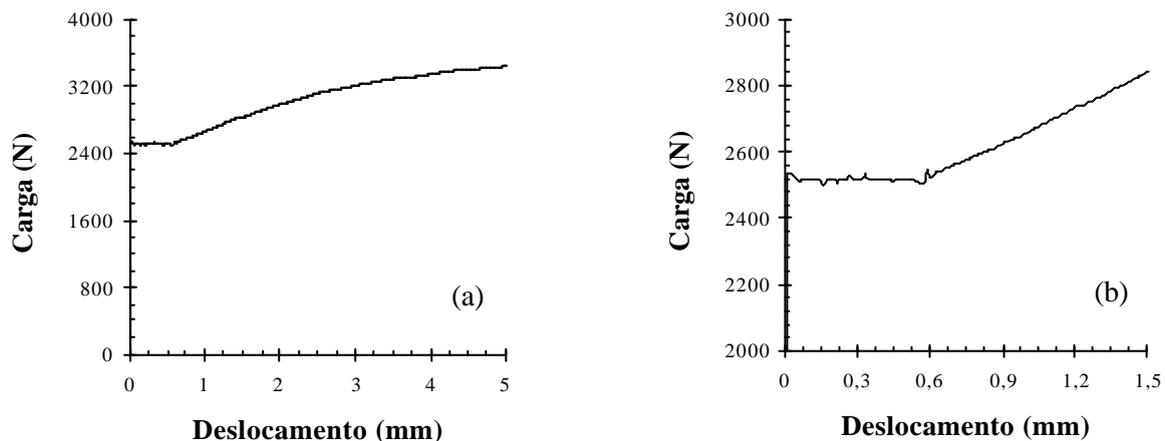


Figura 2. Curva carga (N) x deslocamento (mm) obtida com a curva de escoamento do material 1 –  $LS = 220\text{MPa}$  curva: (a) curva completa e (b) detalhe.

Os resultados descritos anteriormente são confirmados na Figura 4. Um acentuado aumento nos valores de deformação é verificado logo no início do teste de tração, para um tempo entre 0,5s e 1s, para as regiões a 25mm e a 75mm da base da peça (de maneira quase simultânea). Esse aumento de deformação efetiva nestes locais corresponde exatamente à ocorrência ou desenvolvimento das duas bandas de Lüders iniciais verificadas na Figura 3(b). A porção central da amostra apresenta um acréscimo gradual de deformação efetiva durante os ensaios, que não é percebida na Figura 3, só atingindo dados similares aos das demais após cerca de 6s, momento no qual as frentes das duas bandas se encontram, caracterizando deformação plástica em toda a extensão do corpo de prova, assim como havia sido observado na Figura 3.

Os resultados da simulação numérica realizada com o material 2 (Figura 1(b)) são exibidos nas Figuras 5 a 7. Observa-se a ocorrência de patamar de escoamento com alongamento de 1,06mm e carga inicial de 2905N (Figura 5), ambos valores superiores àqueles apresentados na análise anterior. Neste caso, contrastando com as imagens da Figura 3, diversas bandas de Lüders foram

nucleadas, caracterizando inclusive regiões de deformação plástica localizada em cruz na amostra (Figura 6(a) e (b)). De maneira geral, à medida que o teste de tração é conduzido, as bandas se espalham ao longo da peça. Esse fenômeno ocorre de maneira mais acentuada para algumas situações, como a banda na porção inferior do corpo de prova, ou de modo descontínuo (propagando, parando e depois voltando a propagar), como as bandas desenvolvidas no centro (Figura 6(c)-(h)). Dessa forma, a avaliação do escoamento deste material é mais complexa, uma vez que o mesmo não apresenta longos períodos com um único tipo de comportamento, o que justificaria a presença do serrilhado no patamar. Ainda em contraste com os resultados das Figuras 2 a 4, verifica-se que, embora todo o corpo de prova tenha sido deformado plasticamente após 10,6s ou 1,06mm (Figura 6(i)), concordando com os dados observados na curva carga x deslocamento (Figura 5), a deformação não é uniforme ao longo do comprimento da amostra, que apresenta conjuntos de bandas em cruz com valores superiores àqueles das demais regiões.

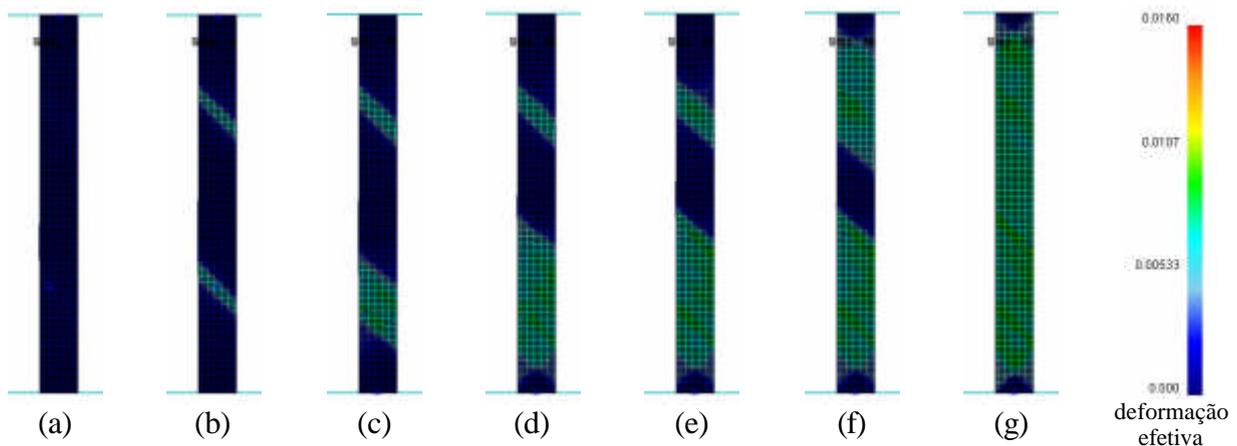


Figura 3. Formação e propagação das bandas de Lüders durante a simulação da tração conduzida com a curva do material 1 – LS = 220MPa (escala: deformação efetiva): tempo ou deslocamento (a) 0,2s ou 0,02mm, (b) 0,8s ou 0,08mm, (c) 1,8s ou 0,18mm, (d) 3s ou 0,3mm, (e) 3,4s ou 0,34mm, (f) 4,6s ou 0,46mm e (g) 6,2s ou 0,62mm.

O fenômeno mencionado no parágrafo anterior é confirmado pela análise da evolução da deformação nas três porções do metal na Figura 7. Observa-se que, no início, apenas a região a 50mm da base da amostra apresenta uma deformação acentuada (para um tempo de cerca de 2s), confirmada pelas duas bandas em cruz no meio da peça (Figura 6(c)). Após cerca de 8s a 10s, verifica-se a ocorrência de deformação nas outras duas seções em análise, confirmada pela Figura 6(h) e (i). Por fim, nota-se que somente após cerca de 16s os resultados de deformação se tornam relativamente semelhantes, uniformes em toda a amostra.

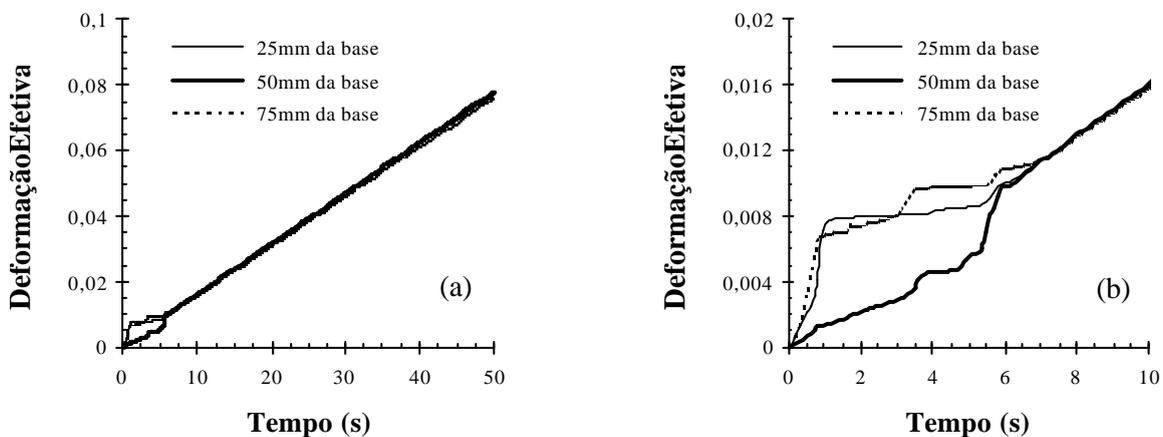


Figura 4. Curvas deformação x tempo (s) para três regiões distintas do corpo de prova relativo à simulação com a curva do material 1 – LS = 220MPa: (a) curva completa e (b) detalhe.

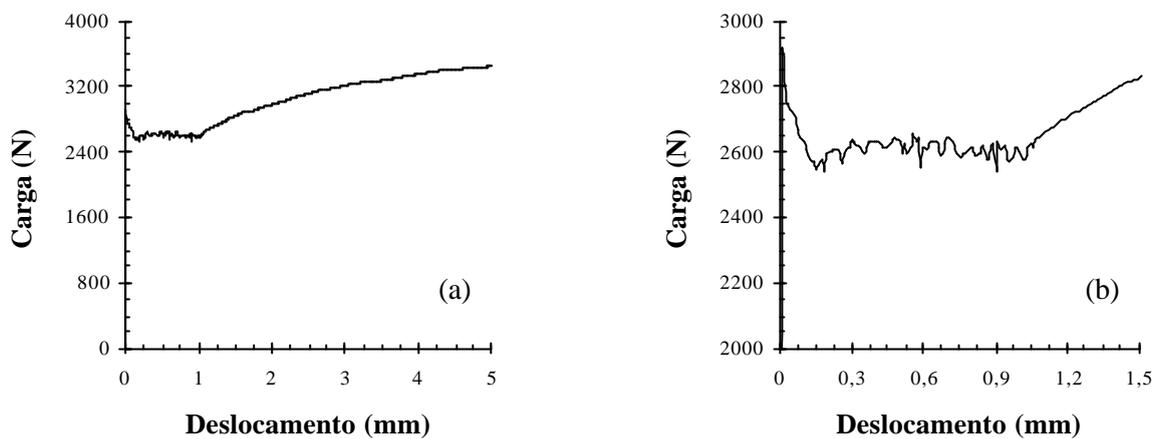


Figura 5. Curva carga (N) x deslocamento (mm) obtida com a curva de escoamento do material 2 – LS = 240MPa curva: (a) curva completa e (b) detalhe.

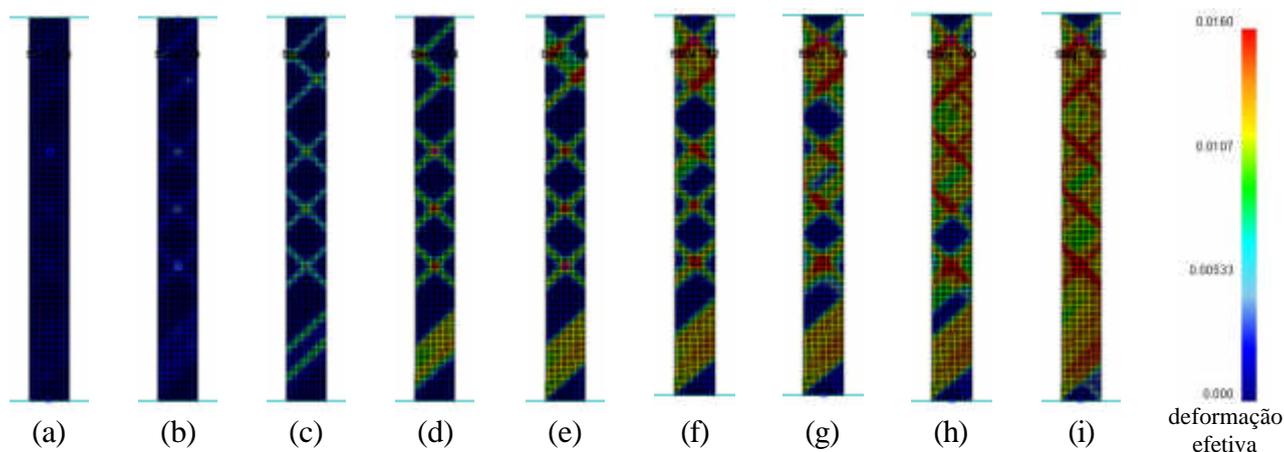


Figura 6. Formação e propagação das bandas de Lüders durante a simulação da tração conduzida com a curva do material 2 – LS = 240MPa (escala: deformação efetiva): tempo ou deslocamento (a) 0,4s ou 0,04mm, (b) 0,8s ou 0,08mm, (c) 1,8s ou 0,18mm, (d) 3,4s ou 0,34mm, (e) 4,4s ou 0,44mm, (f) 6,2s ou 0,62mm, (g) 7,4s ou 0,74mm, (h) 9s ou 0,9mm e (i) 10,6s ou 1,06mm.

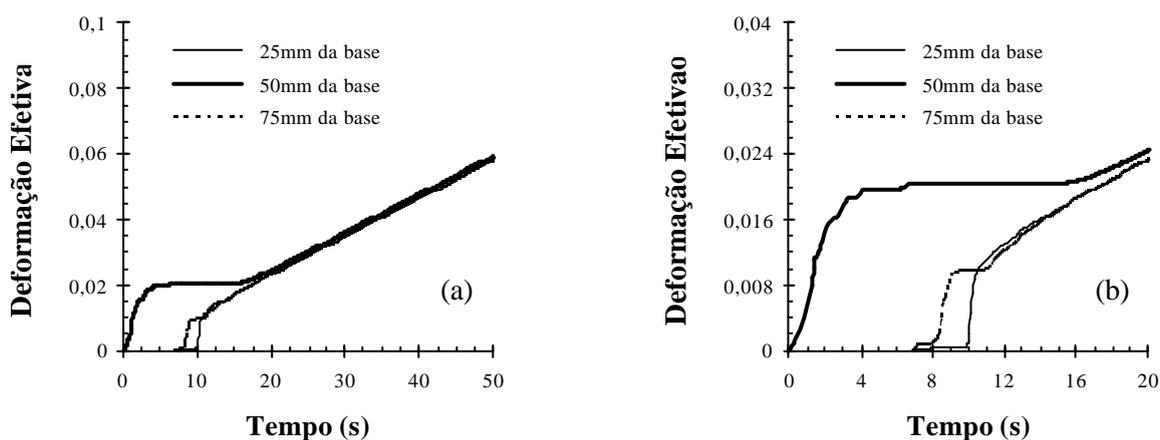


Figura 7. Curvas deformação x tempo (s) para três regiões distintas do corpo de prova relativo à simulação com a curva do material 2 – LS = 240MPa: (a) curva completa e (b) detalhe.

#### 4. CONCLUSÕES

- De maneira geral, os resultados mostram a conveniência de investigar o desenvolvimento de bandas de Lüders através do método de elementos finitos, uma vez que algumas características observadas no trabalho foram anteriormente verificadas através de técnicas experimentais.

- O número de bandas nucleadas e o modo de propagação das mesmas é influenciado pelo valor de tensão de escoamento inicial da curva de entrada do metal fornecida ao método, afetando, portanto, as características do patamar de escoamento do mesmo.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro ao trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. REED-HILL, R.E. **Princípios de metalurgia física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982. 776 p.
2. DIETER, G.E. **Mechanical metallurgy**. 2. ed. London: McGraw-Hill, 1988. 751 p.
3. ZHANG, J., JIANG, Y. Lüders bands propagation of 1045 steel under multiaxial stress state. **International Journal of Plasticity**, v. 21, p. 651-670, 2005.
4. TSUKAHARA, H., IUNG, T. Finite element simulation of the Piorbet-Lüders behavior in an uniaxial tensile test. **Materials Science and Engineering A**, v. A248, p. 304-308, 1998.
5. HUTANU, R., CLAPHAM, L., ROGGE, R.B. Intergranular strain and texture in steel Lüders bands. **Acta Materialia**, v. 53, p. 3517-3524, 2005.
6. 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.
7. ALTAN, T., VAZQUEZ, V. Status of process simulation using 2D and 3D finite element method. "What is practical today? What can we expect in the future?". **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71, p. 49-63, 1997.

### ANALYSIS OF LÜDERS BANDS FORMATION THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD

#### **Elaine Carballo S. Corrêa**

Department of Metallurgical and Materials Engineering – Federal University of Minas Gerais. Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte - MG. 30160-030. elaine@demet.ufmg.br

#### **João Paulo Batista Silva**

Department of Metallurgical and Materials Engineering – Federal University of Minas Gerais. Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte - MG. 30160-030.

#### **Franco Bubani**

Department of Metallurgical and Materials Engineering – Federal University of Minas Gerais. Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte - MG. 30160-030.

#### **Paulo Roberto Cetlin**

Department of Metallurgical and Materials Engineering – Federal University of Minas Gerais. Rua Espírito Santo, número 35, Centro, Belo Horizonte - MG. 30160-030.

**Abstract.** *The development of Lüders bands in low carbon steels is a widely investigated phenomenon, whose studies, however, have rarely involved numerical techniques. In this paper, the nucleation and propagation of Lüders bands in low carbon steel during tensions has been evaluated through the finite element method. Two flow curves have been used in the simulations, involving different upper yield stress values. In addition to the images of the bands, the results associated with the load-displacement and the local deformation-time curves are presented, allowing the analysis of the phenomenon and confirming the convenience of employing the numerical technique in this study. The results showed that the number and the propagation of the bands is affected by the upper yield stress value, leading to different yield point phenomenon characteristics.*

**Keywords:** *straining, Lüders bands, tension, finite element.*