

ANÁLISE DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO NA FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE BANDAS DE LÜDERS ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS¹

*Elaine Carballo Siqueira Corrêa²
Danielle Granha Giorgini³
João Paulo Batista Silva⁴
Franco de Castro Bubani⁵
Paulo Roberto Cetlin⁶*

Resumo

Neste trabalho, a nucleação e a propagação de bandas de Lüders em amostras de aço com baixo teor de carbono foi avaliada através do método de elementos finitos. O fenômeno do escoamento descontínuo foi analisado em testes de tração, cujas simulações numéricas foram conduzidas em corpos de prova com e sem concentrador de tensões. O desenvolvimento das bandas foi observado visualmente e através da análise de curvas carga x deslocamento e de dados de deformação efetiva e tensão efetiva em função do tempo para distintas regiões das amostras. Foram confirmados os efeitos da presença de concentradores de tensão, revelados através da ocorrência de diferentes números de bandas de Lüders e propagação das mesmas de maneira diversa, e foi verificado o comportamento do metal no momento da passagem da banda.

Palavras-chave: Bandas de Lüders; Método de elementos finitos; Deformação localizada.

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF STRESS CONCENTRATION ON THE NUCLEATION AND PROPAGATION OF LÜDERS BANDS THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

In this paper, the nucleation and the propagation of Lüders bands in the low carbon steel has been evaluated through the finite element method. This plastic instability phenomenon has been analyzed in tensile tests, conducted in standard samples and in specimens with stress concentration. The development of the bands has been observed, as well as the load x displacement curves and the evolution of the effective strain and the effective stress in three different regions of the samples. The results revealed the effects of the stress concentrations and the behavior of the metal during the passage of the deformation band.

Key words: Lüders bands; Finite element method; Straining.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Dr., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFETMG, BH - MG. elaine@deii.cefetmg.br*

³ *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica - UFMG, BH - MG.*

⁴ *Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica - UFMG, BH - MG.*

⁵ *Eng. Mecânico, Aluno de Mestrado da Universidade Estadual de Campinas - Campinas - SP.*

⁶ *Dr., Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - UFMG, BH - MG.*

1 INTRODUÇÃO

O escoamento descontínuo, também conhecido como efeito Piobert, está associado à ocorrência das chamadas bandas de Lüders, regiões de deformação plástica localizada que se desenvolvem usualmente em amostras de aço durante a transição do regime elástico para o regime plástico em testes de tração. Esse fenômeno, observado também em outros materiais metálicos, como ligas de alumínio, titânio e molibdênio,^(1,2) e sob diversos tipos de carregamento, dos mais simples e aos mais complexos,⁽³⁻⁵⁾ é classicamente associado à interação das discordâncias com átomos de soluto intersticiais, que agem no sentido de imobilizá-las com a formação de atmosferas,⁽¹⁻³⁾ representando posições de menor energia na rede cristalina.

O aparecimento e o comportamento das bandas são manifestados pela presença de um valor de tensão relativamente elevado na curva de escoamento, denominado limite superior, seguido de queda até o limite inferior e da ocorrência de uma porção serrilhada ou valores de tensão praticamente constantes na mesma. A magnitude dos fenômenos citados depende de vários fatores, dentre os quais podem ser destacados as variáveis do processo (taxa de deformação e temperatura), a realização de eventuais tratamentos térmicos, os parâmetros estruturais do material (como tamanho de grão e densidade de discordâncias) e a presença de concentradores de tensão, fato comum em componentes metálicos reais.^(5,6)

Diversas investigações foram conduzidas sobre essas heterogeneidades de deformação, envolvendo a análise tanto das características microscópicas como dos aspectos macroscópicos do desenvolvimento das mesmas.^(3,7-9) Entretanto, apesar da praticidade e da possibilidade de obtenção de informações detalhadas sobre o tema, em contraste com as operações de deformação plástica dos metais em geral, a utilização de métodos numéricos, em especial o método de elementos finitos, na análise do escoamento descontínuo parece ser discreta.^(4,6,8)

Dentro deste contexto, neste trabalho os efeitos da presença de concentradores de tensão na formação e na propagação de bandas de Lüders no aço com baixo teor de carbono durante testes de tração foram avaliados através do método de elementos finitos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A análise do desenvolvimento de bandas de Lüders em amostras de aço com baixo teor de carbono e dos efeitos da presença de concentradores de tensão nas mesmas foi realizada através da simulação numérica de testes de tração, utilizando o método de elementos finitos, conduzido no programa comercial DEFORM 2D versão 9.0. O regime utilizado na modelagem foi o plástico e estado plano de deformação foi considerado em todo trabalho.

Os ensaios de tração foram simulados com uma velocidade de 0,001mm/s, em 5000 passos, com cada passo equivalendo a 1s, representando, portanto, uma extensão final das amostras de 5mm. A malha gerada no processo foi de quatro nós, em um número total de 4928.

Os corpos de prova utilizados apresentaram comprimento e largura úteis iniciais de 100 mm e 10 mm, respectivamente. Para inserir um concentrador de tensão nos mesmos, dois nós da malha gerada pelo programa foram soltos na extremidade direita inferior da peça, ou seja, em uma região do metal em contato com a garra inferior do ensaio de tração.

A curva utilizada como parâmetro de entrada do metal é mostrada na Figura 1, na qual observa-se que o limite superior de escoamento considerado na operação foi de 220 MPa, seguido de uma queda até 216MPa, representando o limite inferior.

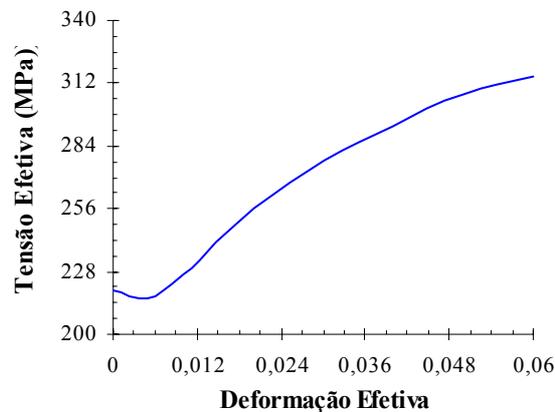


Figura 1 – Curva tensão efetiva (MPa) x deformação efetiva utilizada como parâmetro de entrada do metal na simulação numérica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 pode ser observada a curva carga (N) x deslocamento (mm) obtida na simulação numérica do ensaio de tração do corpo de prova de aço com baixo teor de carbono sem a presença de concentrador de tensão. Verifica-se a ocorrência de patamar de escoamento com valor de carga associada ao limite superior de aproximadamente 2530N, queda até cerca de 2505N, e extensão total de 0,53mm. Neste caso, após atingir o valor de carga associado ao limite inferior de escoamento, os resultados apresentados são relativamente constantes.

Na Figura 3 são mostradas as imagens de distribuição de deformação efetiva ao longo da seção longitudinal desta mesma amostra durante o teste, acompanhadas da escala com os dados. Inicialmente, verifica-se a nucleação de duas bandas de deformação em cruz na região superior da peça (Figura 3 (a)-(c)). Esta fase, até 100 s -130 s de simulação ou 0,1 mm - 0,13 mm de extensão do metal, corresponde ao período do ensaio até o valor de carga inferior. A partir deste momento, as bandas se propagam em direção à base do corpo de prova (Figura 3 (d)-(f)), praticamente unidas, comportamento associado à região relativamente linear do patamar exibido na Figura 2. Por fim, após 530 s, (ou 0,53 mm), a deformação atinge toda a amostra (Figura 3(g)), passando a ser homogênea em seguida. Esses resultados estão de acordo com a descrição do fenômeno de escoamento descontínuo relatada na literatura,⁽¹⁻³⁾ na qual o limite superior é associado ao aparecimento da(s) banda(s) de Lüders, o limite inferior à liberação e a alongação do escoamento à propagação da(s) mesma(s). Neste caso, o patamar de escoamento com dados de tensão praticamente constantes após a queda inicial corresponderia à propagação das bandas formadas inicialmente, enquanto um patamar com irregularidades seria relacionado à nucleação e à propagação de novas bandas de deformação.

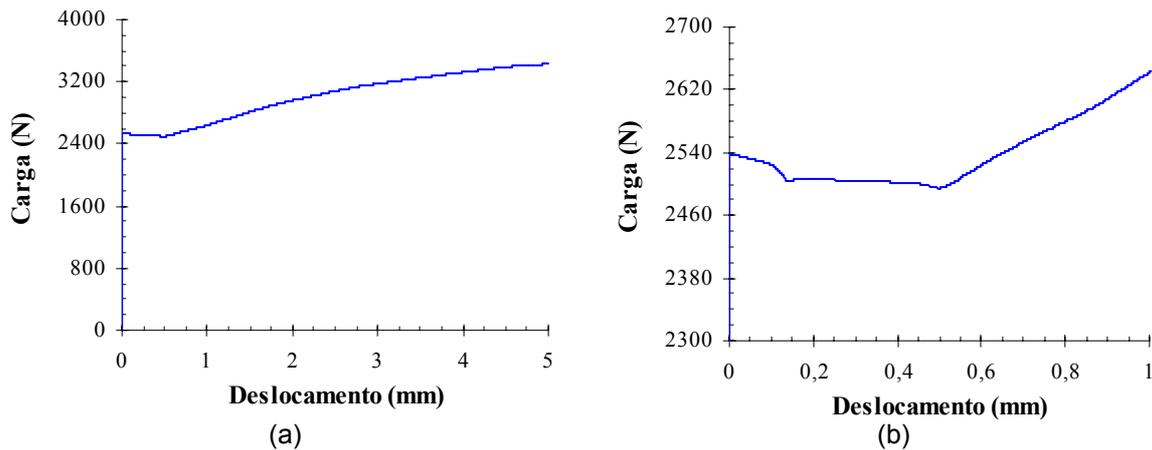


Figura 2 – Curva carga (N) x deslocamento (mm) obtida na simulação numérica do teste de tração conduzido no corpo de prova de aço sem concentradores de tensão: (a) curva completa e (b) detalhe do patamar de escoamento.

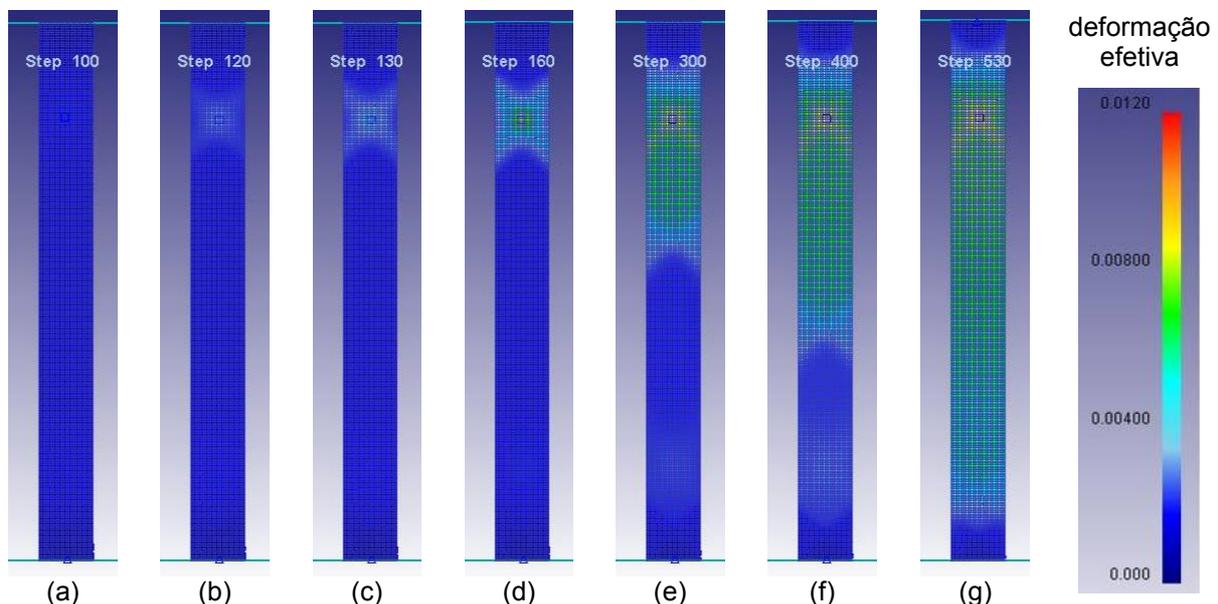


Figura 3 – Formação e propagação das bandas de Lüders observadas na simulação conduzida em corpo de prova sem concentrador de tensões: (a) 100s, (b) 120s, (c) 130s, (d) 160s, (e) 300s, (f) 400s e (g) 530s.

Na Figura 4 é exibida a variação da deformação e da tensão efetivas com o tempo em três regiões distintas do corpo de prova (a 25 mm, 50 mm e 75 mm da base da peça) cujo comportamento geral foi exibido na Figura 3. Observa-se que parece haver deformação na amostra como um todo desde o início da simulação, porém de magnitude quase desprezível, não detectada na figura anterior. Os demais resultados relativos à deformação confirmam as imagens da figura 3: para a porção do corpo de prova a 75 mm da base, um aumento acentuado é verificado após cerca de 190 s, para 50 mm após 360 s e para 25 mm após 490 s. Nota-se que quando esse valor de deformação efetiva é elevado, ou seja, quando a banda atinge as regiões mencionadas, ocorre uma queda/menor resultado acentuado na tensão efetiva (na verdade, a queda máxima é verificada quando o nível de deformação atingido representa cerca da metade do valor total). Esse fenômeno pode ser avaliado de maneira mais clara através da Figura 5, na qual são apresentadas as imagens de distribuição tanto de deformação efetiva quanto de tensão efetiva no momento da queda/menor resultado de tensão. Verifica-se que, para as três porções

de interesse, a distribuição de tensão ao longo da seção transversal do corpo de prova, circundada por valores superiores, apresenta formato ou perfil semelhante à distribuição de deformação, uma espécie de semi-círculo.

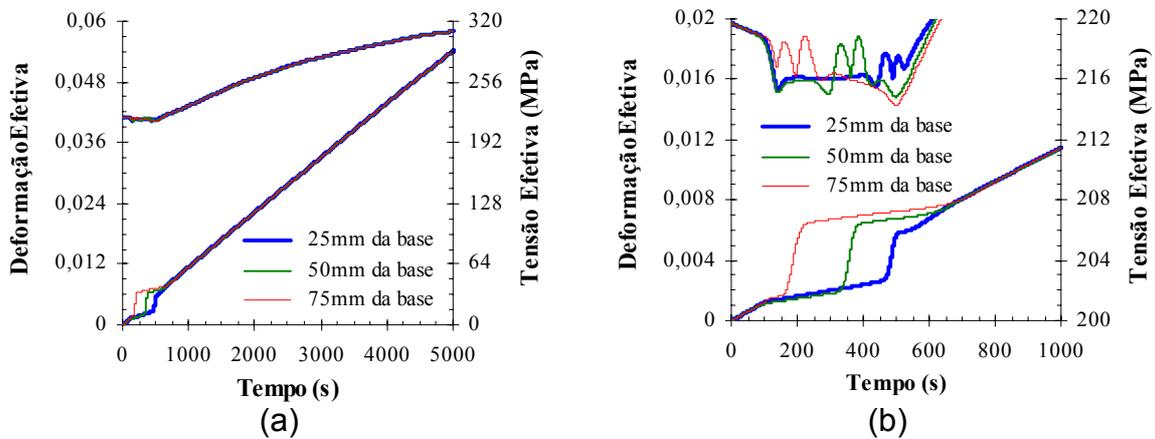


Figura 4 – Curvas deformação efetiva e tensão efetiva (MPa) x tempo (s) para três regiões distintas do corpo de prova sem concentradores de tensão – 25 mm, 50 mm e 75 mm da base: (a) curvas completas e (b) detalhe.

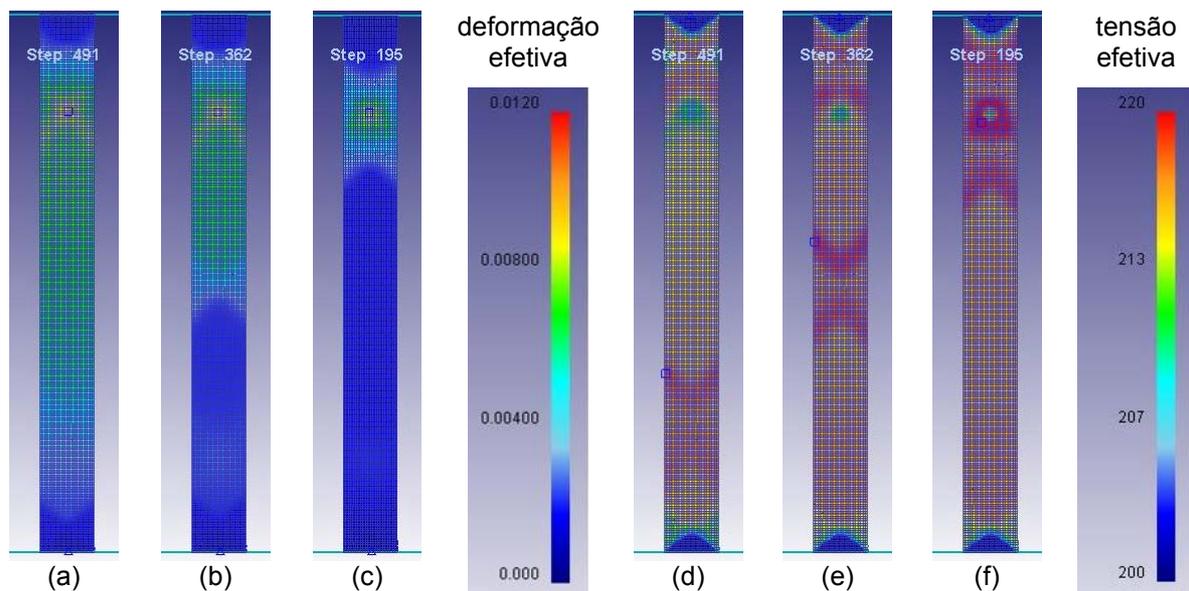


Figura 5 – Distribuição de deformação e tensão efetivas no corpo de prova sem concentradores de tensão no momento da passagem da banda em três regiões distintas do mesmo: (a) e (d) distância de 25 mm após 491 s, (b) e (e) 50 mm após 360 s, (c) e (f) 75 mm após 195 s.

Nas Figuras 6 a 9 são mostrados os resultados relativos à simulação numérica da tração do corpo de prova com concentrador de tensão. Em relação à curva carga x deslocamento (Figura 6), observa-se a ocorrência de patamar de escoamento com extensão total de aproximadamente 0,65 mm, superior, portanto, à condição analisada anteriormente. Por outro lado, a carga inicial apresentada é de 2.420 N, com queda até 2.405 N, ambos valores inferiores àqueles obtidos na simulação com corpo de prova sem concentradores de tensão. Essa diminuição na carga inicial de tração (valor inferior àquele observado na Figura 2), que significa uma tensão superior de escoamento menor, é prevista na literatura clássica sobre o assunto quando há concentradores de tensão na amostra, tendo sido comprovada experimentalmente e observada também para testes nos quais a rigidez do equipamento utilizado não é elevada ou a taxa de carregamento é reduzida.⁽²⁾ Ainda

analisando a Figura 6, após o comportamento já descrito, um aumento acentuado na carga de tração é verificado e, finalmente, uma região de valores relativamente constantes é exibida.

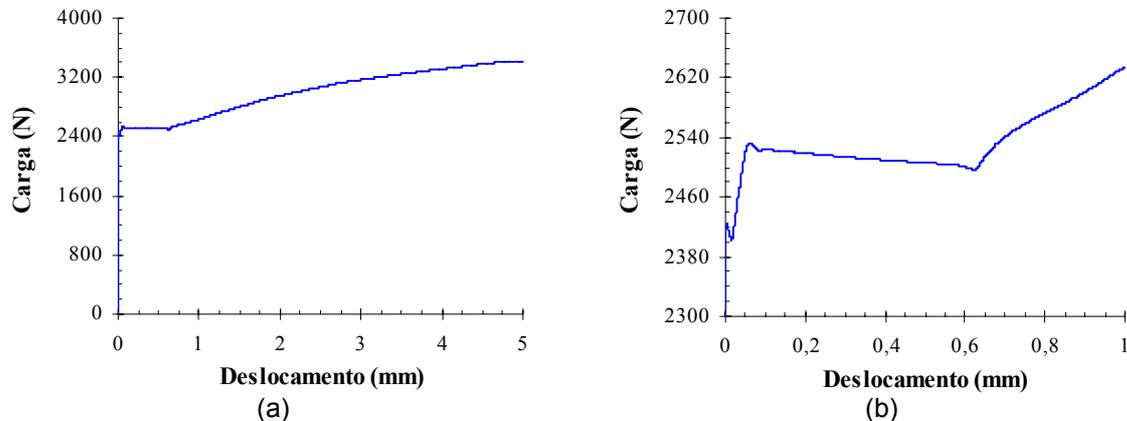


Figura 6 – Curva carga (N) x deslocamento (mm) obtida na simulação numérica do teste de tração conduzido no corpo de prova de aço com concentrador de tensões: (a) curva completa e (b) detalhe do patamar de escoamento.

Considerando as imagens de distribuição de deformação efetiva na amostra durante o teste (Figura 7), também são observados resultados distintos daqueles relativos às Figuras 2 a 5. Uma única banda de deformação é nucleada, na região inferior do corpo de prova, fazendo um ângulo de cerca de 45° com o eixo de tração, em conformidade com o concentrador de tensão inserido na peça (Figura 7(a)-(c)). Esse período, ~ 20 s, corresponde à região da curva da Figura 6 até a carga de 2.405 N. A partir desse momento, em vez de ter a propagação da banda inicialmente formada, ocorre um aumento no valor de deformação efetiva no interior dessa região (figura 7(d)), como se uma nova banda nucleasse dentro da primeira. O aparecimento dessa “segunda” banda de deformação parece explicar a elevação acentuada de carga no patamar de escoamento descrita no parágrafo anterior, uma vez que ambas as situações estão associadas a um tempo de simulação de ~ 50 s ou extensão do corpo de prova de $\sim 0,05$ mm. Conforme mencionado previamente, a ocorrência de curva de escoamento descontínuo irregular, ou seja, a formação de diversos picos de tensão (ou carga) é associada ao desenvolvimento de diversas bandas de Lüders durante a deformação heterogênea do metal.⁽²⁾ Após este ponto, observa-se a propagação da banda na peça (Figura 7(e) e (f)), até que a deformação atinge toda a extensão da mesma, em um tempo de cerca de 650 s (ou deslocamento de 0,65 mm) (Figura 7(g)).

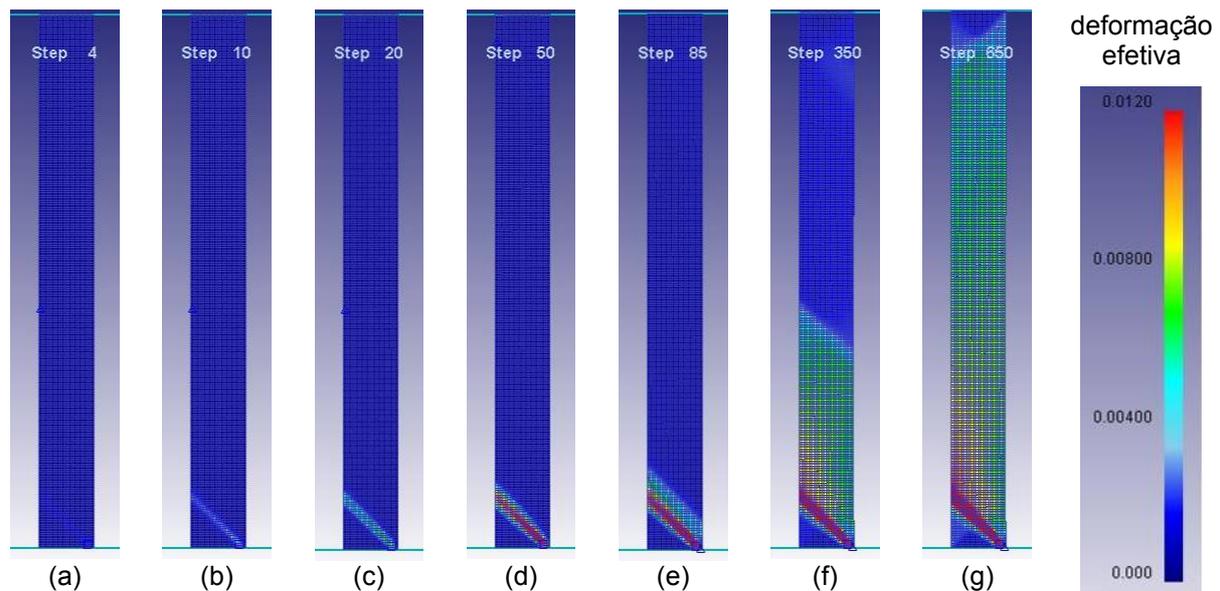


Figura 7 – Formação e propagação das bandas de Lüders observadas na simulação conduzida em corpo de prova com concentrador de tensões: (a) 4 s, (b) 10 s, (c) 20 s, (d) 50 s, (e) 85 s, (f) 350 s e (g) 650 s.

A variação de deformação e tensão efetivas com o tempo de simulação numérica nas três regiões escolhidas da amostra com concentrador de tensão (Figuras 8 e 9) é relativamente similar ao que foi constatado para o material tracionado sem nenhuma irregularidade. Ainda que em termos de magnitude e de ordem de ocorrência dos fenômenos as duas condições analisadas apresentem diferenças, as curvas e as imagens exibidas pelo corpo de prova com concentrador de tensão também revelam o aumento acentuado de deformação durante a passagem da banda pela porção avaliada, acompanhado de que pronunciada (abrupta) queda no valor de tensão. Além disso, as imagens de distribuição de deformação e de tensão confirmam o desenvolvimento, para as três regiões, de perfis similares, desta vez retos, com ângulo de aproximadamente 45° .

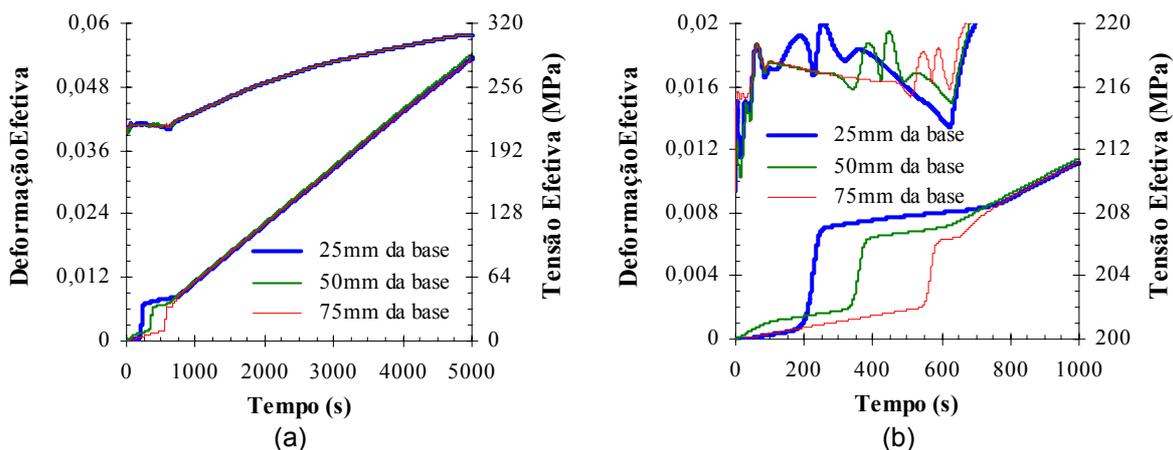


Figura 8 – Curvas deformação efetiva e tensão efetiva (MPa) x tempo (s) para três regiões distintas do corpo de prova com concentrador de tensões – 25 mm, 50 mm e 75 mm da base: (a) curvas completas e (b) detalhe.

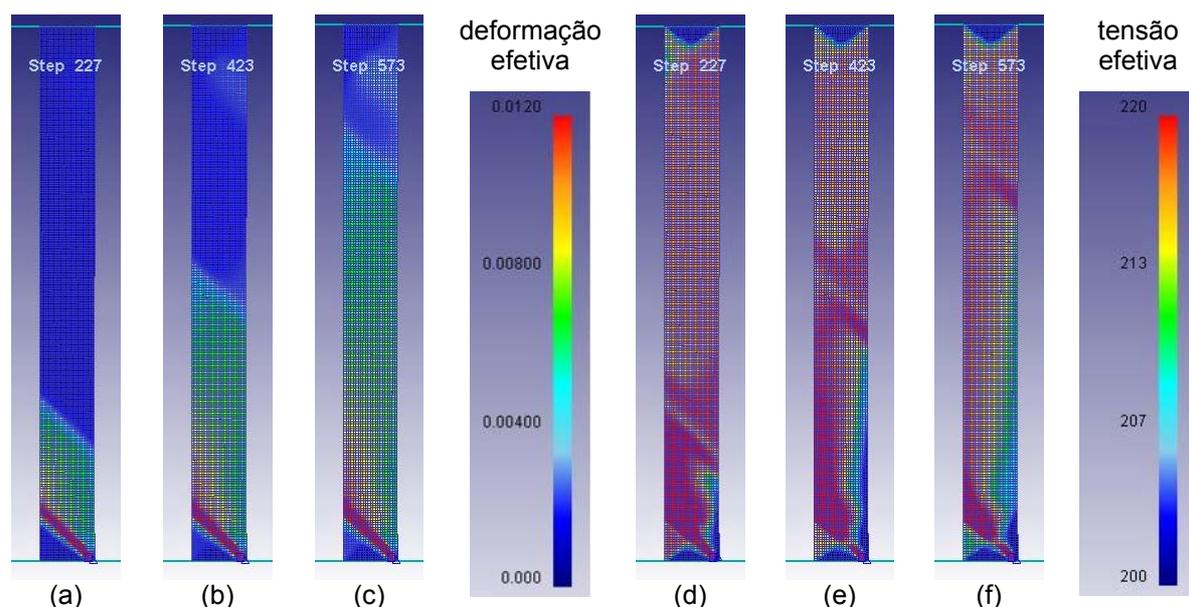


Figura 9 – Distribuição de deformação e tensão efetivas no corpo de prova com concentrador de tensões no momento da passagem da banda em três regiões distintas do mesmo: (a) e (d) distância de 25 mm após 227 s, (b) e (e) 50 mm após 423 s, (c) e (f) 75 mm após 573 s.

4 CONCLUSÕES

- Os efeitos da presença de concentradores de tensão no corpo de prova de aço com baixo teor de carbono tracionado puderam ser analisados através do método de elementos finitos, que evidenciou as diferenças em termos quantitativos, ou seja, valores de deformação e tensão efetivas, e em termos qualitativos, através do número de bandas de Lüders nucleadas e o modo de propagação das mesmas.
- Para ambas as situações avaliadas, foi observado que, no momento da passagem ou propagação da banda de deformação em uma determinada região, a tensão efetiva apresenta uma considerável diminuição, ao longo de toda a seção transversal da amostra.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 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 DHAR, A., CLAPHAM, L., ATHERTON, D.L.. Influence of Lüders bands on magnetic Barkhausen noise and magnetic flux leakage signals. *Journal of Materials Science*, v. 37, p. 2441-2446, 2002.
- 6 GRAFF, S., FOREST, S., STRUDEL, J.L., PILVIN, P., BÉCHADE, J.L. Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens: experiments and finite element simulations. *Materials Science and Engineering A*, v. 387, p. 181-185, 2004.
- 7 HUTANU, R., CLAPHAM, L., ROGGE, R.B. Intergranular strain and texture in steel Lüders bands. *Acta Materialia*, v. 53, p. 3517-3524, 2005.
- 8 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.
- 9 CAPÓ-SÁNCHEZ, J., CAMPOS, M.A., PADOVESE, L.R. Magnetic Barkhausen measurements for evaluating the formation of Lüders bands in carbon steel. *NDT&E International*, v. 40, p. 520-524, 2007.