

INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO NA LAMINAÇÃO DE ENCRUAMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO REFOSFORADO, GALVANIZADO A QUENTE ¹

Carlos Augusto Carvalho ²
Berenice Mendonça Gonzalez ³
Gláucio Bórtoli da Cruz Rabelo ⁴

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados das propriedades mecânicas em tração e o comportamento ao envelhecimento de um aço acalmado ao alumínio refosforado, produzido como laminado a frio, recozido e galvanizado a quente, em linha contínua. O aço foi processado em um laminador de encruamento utilizando 6 diferentes graus de deformação: 0,0; 0,5; 1,2; 1,5; 1,8 e 2,3%. Foram avaliadas as propriedades mecânicas e o efeito do envelhecimento para cada grau de deformação aplicado na laminação de encruamento. As análises das propriedades mecânicas permitiram a observação de um comportamento mecânico semelhante nos materiais processados com graus de deformação entre 1,2 a 2,3%. Com relação ao envelhecimento, de maneira geral, observou-se maior resistência ao retorno da deformação no patamar de escoamento e do aumento deste parâmetro em materiais com maior grau de deformação aplicado no laminador de encruamento. Pode-se inferir uma elevação da densidade de deslocações com o aumento do grau de deformação, o que explica a maior resistência ao envelhecimento.

Palavras-chave: Aço refosforado; Laminação de encruamento; Propriedades mecânicas; Envelhecimento.

INFLUENCE OF THE DEFORMATION DURING SKIN-PASS ROLLING IN MECHANICAL PROPERTIES OF A HOT-DIP GALVANIZED REPHOSPHORIZED STEEL

Abstract

The present study has the objective to evaluate the mechanical properties as related to tensile strength and the strain aging behavior of a hot-dip galvanized Al-killed rephosphorized steel produced in a Continuous Galvanizing Line. The mentioned steel was processed in a skin-pass mill using 6 skin-pass mill reduction, i.e., no deformation, 0.5%, 1.2%, 1.5%, 1.8% and 2.3%. The evaluation of the mechanical properties data including the strain aging effect for the skin-pass mill reduction applied, allowed to observe the influence of such parameter on the mechanical properties as well as on the aging resistance. The evaluation of the mechanical properties data allowed to conclude that the material tested showed the same behavior for skin-pass rolling between 1.2% to 2.3%. As related to aging generally, was observed a bigger resistance to the return of the yield point elongation for materials with greater deformation applied during the skin-pass rolling. The bigger resistance to aging may be explained by the increase in dislocations density as a function of the increase of the skin-pass mill reduction during skin-pass rolling.

Key-words: Rephosphorized steel; Skin-pass rolling; Mechanical properties; Strain aging.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

² Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Engenharia, Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM, Física, Dra., Professora Associada do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., Doutorando em Engenharia, Superintendência de Metalurgia e Garantia da Qualidade da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística vem, ao longo dos anos, modificando as formas e projeto de fabricação de veículos, o que tem provocado um crescimento nas exigências com relação à estampabilidade das chapas destinadas à fabricação de carrocerias de automóveis. Em particular, a procura pelo aumento da eficiência energética dos automóveis determina um esforço para reduzir seu peso, o que pode ser obtido com aços de média e alta resistência mecânica, dentre eles, os aços acalmados ao alumínio refosforados (AA-FOS), sendo interessante a associação de tal característica com a boa estampabilidade do material. Ainda dentro da preocupação das montadoras e das usinas siderúrgicas com a melhoria dos aços, houve um incremento no uso de chapas de aço com recobrimento metálico, nos últimos anos, devido a necessidade de aumentar a durabilidade destes produtos, tornando-os mais resistentes à corrosão. Com isto, definiu-se um aço acalmado ao alumínio, refosforado, com limite de escoamento superior a 220 MPa, como o material a ser avaliado neste estudo, sendo este usualmente aplicado em painéis automotivos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a influência da deformação na laminação de encruamento (“Skin Pass Mill Reduction” - SPMR) nas propriedades mecânicas e na susceptibilidade ao envelhecimento do aço em questão. A SPMR foi avaliada por influenciar as propriedades mecânicas, destacando o limite de escoamento e a resistência ao envelhecimento do material. Ressalta-se ainda a maior flexibilidade de mudanças na SPMR quando comparada a outros parâmetros do processo de fabricação de aço, em casos de necessidade de ajustes no projeto de fabricação do produto.

O comportamento do limite de escoamento (LE) e da deformação no patamar de escoamento (YP-EL) com a SPMR é caracterizado na Figura 1, conforme Lake⁽¹⁾.

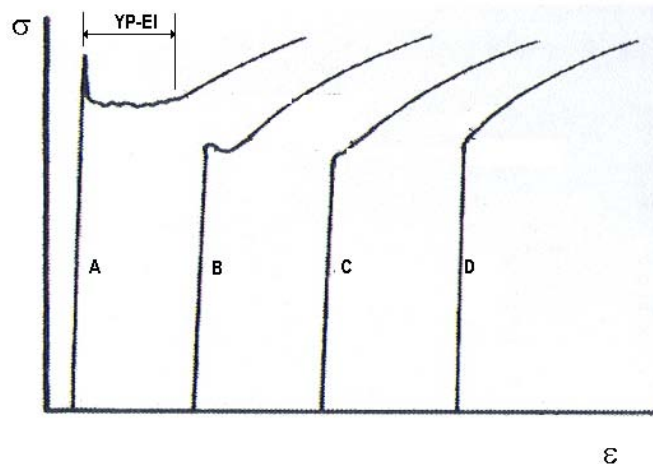


Figura 1 - Mudança da YP-EL e do LE com aumento da SPMR, onde SPMR (A) < SPMR (B) < SPMR (C) < SPMR (D)⁽¹⁾.

A Figura 2, resultante do estudo feito por Lake,⁽¹⁾ mostra a variação do limite de escoamento e da deformação no patamar de escoamento de um aço capeado com o aumento do grau de deformação aplicado no laminador de encruamento.

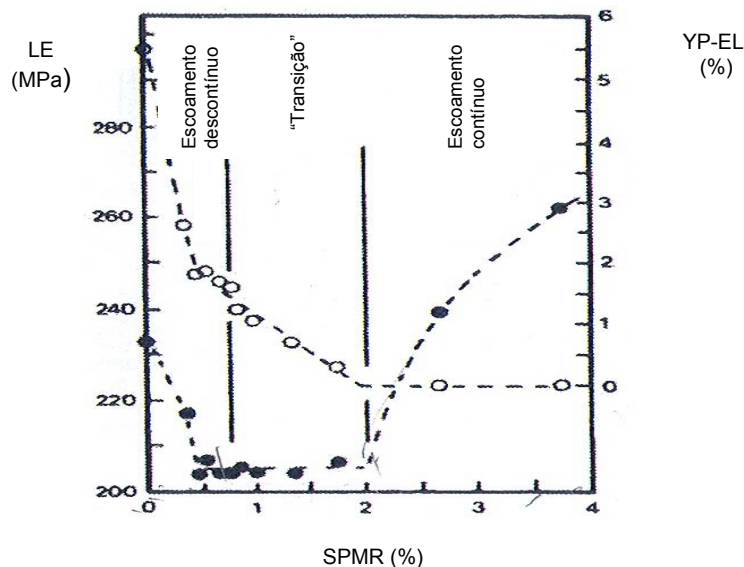


Figura 2 - LE (símbolos fechados) e YP-EL (símbolos abertos) em função da SPMR. Aço capeado. Composição Química: C: 0,06%; Mn: 0,33%; S: 0,017%; N: 0,0020%.⁽¹⁾

Na montagem da Figura 2, Lake⁽¹⁾ utilizou a seguinte metodologia, considerando a Figura 1:

- Região da Figura 2 denominada “escoamento descontínuo”: Gráficos que apresentaram aspecto semelhante às curvas (A) e (B) da Figura 1 (apresentam limite de escoamento inferior);
- Região definida como “transição”: Gráficos com aspecto semelhante à curva (C), sem a presença de limite de escoamento inferior;
- Região destacada como “escoamento contínuo”: curvas semelhantes ao gráfico (D).

Na Figura 2, observa-se que, com o aumento de SPMR, o LE decresce até um valor de SPMR aproximado de 0,5%, fica estável entre 0,5 e 2,0%, e se eleva a partir deste grau de deformação. O YP-EL decresce até SPMR igual a 2,0% e, a partir deste ponto, apresenta um valor constante igual a zero.

No intuito de avaliar o comportamento do envelhecimento de um aço, Hundy,⁽²⁾ através das Figuras 3 e 4, mostra, respectivamente, as variações da deformação no patamar de escoamento e da tensão para deformar o material com o grau de deformação aplicado em um laminador a frio. Os valores destas variações correspondem à diferença entre os resultados após três meses da produção do aço e os obtidos logo após a fabricação.

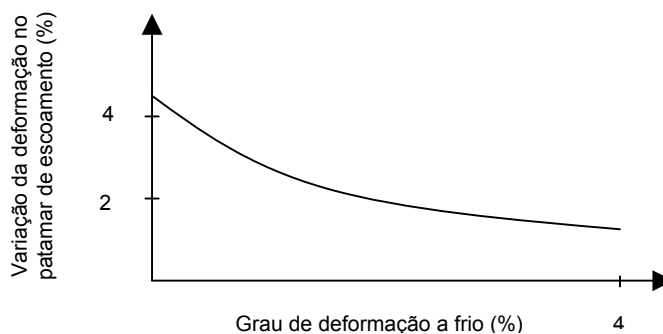


Figura 3 - Efeito do grau de deformação aplicado em um laminador a frio na variação da deformação no patamar de escoamento após três meses.⁽²⁾

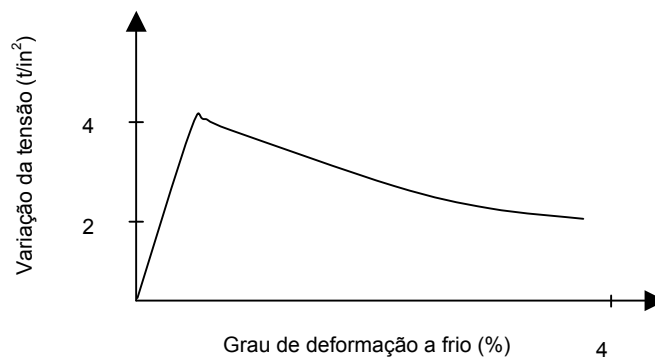


Figura 4 - Efeito do grau de deformação aplicado em um laminador a frio na variação da tensão após três meses.⁽²⁾

Este comportamento pode ser entendido através da variação da densidade de deslocações com a deformação. Gilman⁽³⁾ destaca que, em um metal recozido, a elevação da densidade de deslocações é da ordem de 10.000 vezes para uma deformação de 1% e o aumento é de 2 vezes para um acréscimo adicional de 1% (totalizando 2% de deformação total). O aumento acentuado da densidade de deslocações para pequenas deformações acarreta no incremento do LE devido ao efeito de encruamento. Por outro lado, o aumento da quantidade de deslocações móveis resulta no decréscimo do LE, considerando que a quantidade de intersticiais para ancorar as deslocações permanece constante, fazendo com que o efeito do ancoramento seja menos intenso quanto maior for a deformação. Com isso, Gilman⁽³⁾ conclui que estes dois efeitos contrários acarretam em um acréscimo inicial no aumento do limite de escoamento para pequenas deformações e em um decréscimo para valores maiores da pré-deformação. Assim a curva da variação da tensão versus o grau de deformação na laminação a frio (Figura 4) passa por um máximo e depois decresce.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido a partir de uma corrida do aço AA-FOS produzida de acordo com os parâmetros padronizados até a etapa de laminação de encruamento. A Tabela 1 apresenta a faixa de composição química para esta corrida e os parâmetros dos processos utilizados até a etapa de recozimento.

Tabela 1 – Faixa de composição química e parâmetros operacionais do aço AA-FOS.

Composição Química (% em peso)	C	Mn	P	Al	N
	0,03 ~ 0,06	0,20 ~ 0,70	0,020 ~ 0,080	0,020 ~ 0,100	< 0,0060
Parâmetros Operacionais	Temperatura de reaquecimento de placas			> 1200°C	
	Temperatura de bobinamento			> 700°C	
	Redução a frio			67%	
	Temperatura de encharque			785°C	

O aço foi processado no laminador de encruamento variando a deformação em 6 níveis diferentes, sendo eles: 0,0; 0,5; 1,2; 1,5; 1,8 e 2,3%. Após o

processamento do material realizou-se sua caracterização, pelo ensaio de tração, para cada nível de deformação aplicada no laminador de encruamento.

A avaliação da susceptibilidade ao envelhecimento foi realizada pelo índice de envelhecimento (*Aging index – AI*) e comparação dos valores obtidos para LE e YP-EL logo após a fabricação do aço com os resultados observados após cinco meses de estocagem, à temperatura ambiente, para cada SPMR estudada.

Todos os resultados foram obtidos pela média de três corpos-de-prova (CP), amostrados transversalmente à direção de laminação, com base de medida de 80 mm.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 mostra a influência da SPMR nas propriedades mecânicas em tração, LE e YP-EL, do aço estudado.

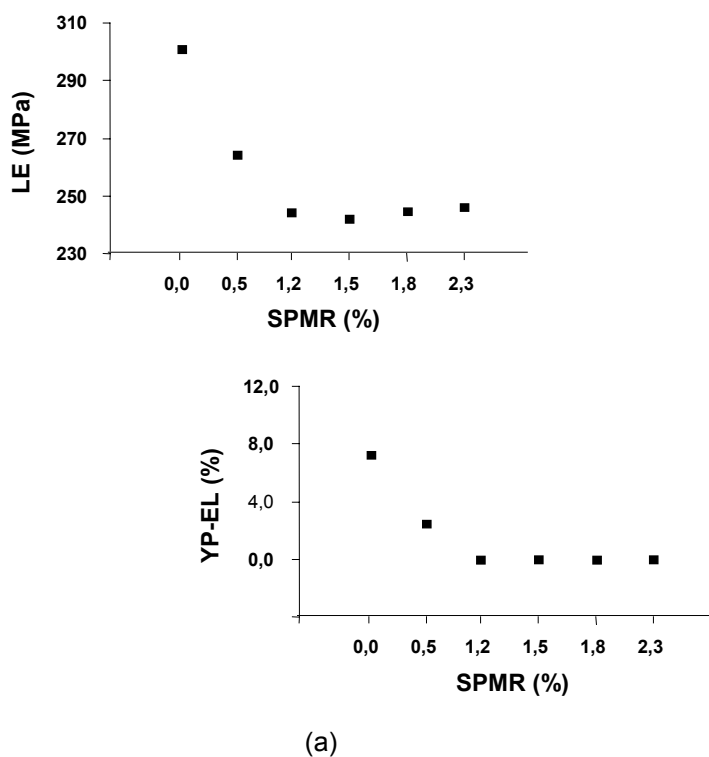


Figura 5 - Influência da SPMR no LE (a) e YP-EL (b) do aço AA-FOS.

Considerando as Figuras 5 (a) e (b), observa-se que o LE decresce juntamente com a YP-EL até o grau de deformação aplicado de 1,2%. A partir deste valor, YP-EL apresenta-se igual a zero e o LE fica praticamente constante até a maior SPMR avaliada (2,3%). Destaca-se que o valor da deformação que corresponde à ausência do YP-EL neste trabalho coincide com a região de LE mínimo, ou seja, a partir de SPMR igual a 1,2%. Este resultado difere do estudo de Lake,⁽¹⁾ manifesto na Figura 2.

A diferença entre as Figuras 2 e 5 pode ser explicada pelo critério de determinação do YP-EL. Em seu trabalho, Lake⁽¹⁾ considerou que as curvas encontradas com o aspecto da curva (C) da Figura 1, que não apresentam LE inferior, mas que têm uma irregularidade na transição do regime elástico para o plástico, possuíam YP-EL. Esta deformação é definida pela diferença entre a deformação relacionada à irregularidade na transição e a correspondente ao início

do fluxo plástico homogêneo. Lake⁽¹⁾ denomina a região com este tipo de curva, na Figura 2, como “transição”.

No presente estudo, as curvas de tração com aspecto semelhante à curva (C) – Figura 1, foram consideradas como escoamento contínuo. Para ilustrar tal situação, é apresentada, nas Figuras 6 (a) e (b), respectivamente, uma das três curvas de tração relativas ao material com SPMR de 1,2%, com aspecto semelhante ao apresentado na Figura 1 – curva (C), e uma realizada para material com SPMR de 0,5%, com aspecto semelhante às curvas (A) e (B) da Figura 1, ou seja, com a presença de LE inferior.

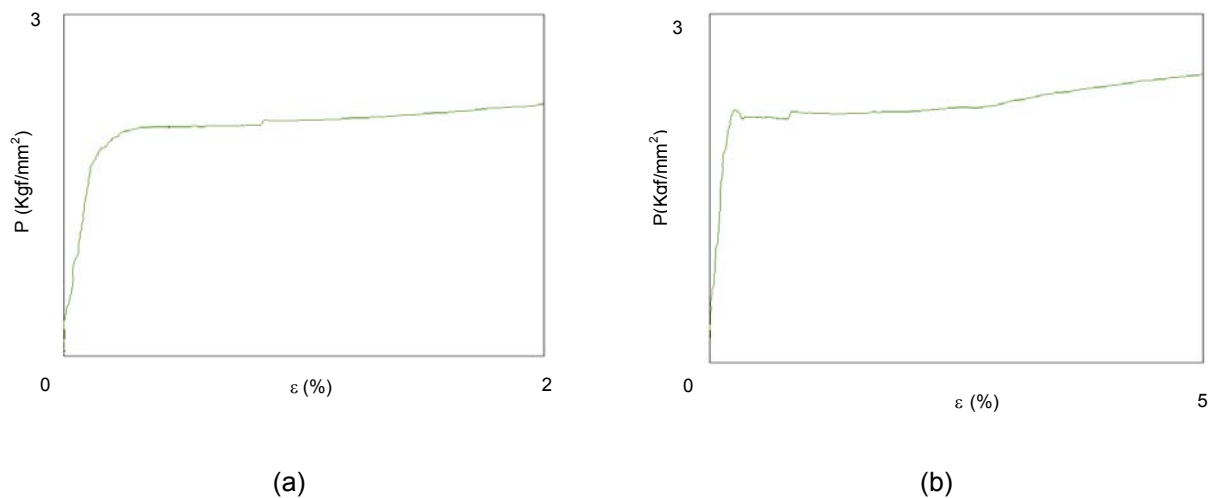
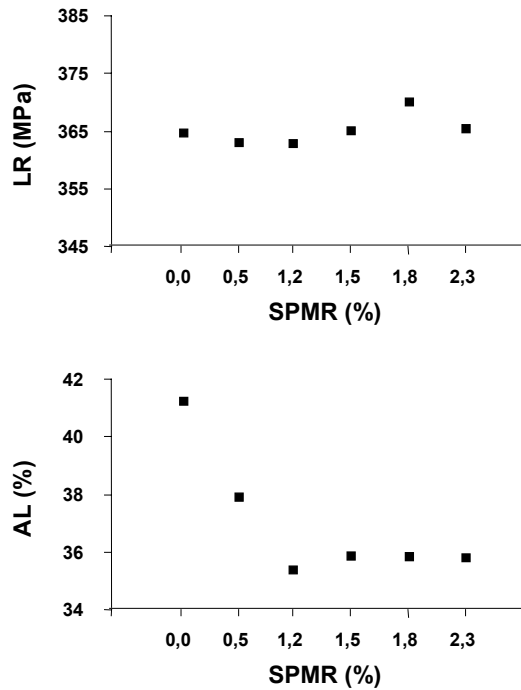


Figura 6 - Curvas de tração, na região de transição elástico-plástico. (a) SPMR: 1,2% e (b) SPMR: 0,5%.

A Figura 7 mostra a influência da SPMR nas propriedades mecânicas de tração, limite de resistência (LR) e alongamento total (AL) do aço estudado.



(a) (b)
Figura 7 - Influência da SPMR no LR (a) e AL (b) do aço AA-FOS.

Não é observada, através da análise da Figura 7(a), nenhuma tendência de mudança do LR com o aumento da SPMR, considerando os graus de deformação analisados. Tal comportamento não evidencia que haja correlação entre SPMR e LR. Como neste estudo não se atingiu a região onde o efeito da SPMR provocaria um acréscimo no valor de LE, não foi possível avaliar se o LR seguiria a mesma tendência de aumentar com o incremento de SPMR.

Na Figura 7(b) nota-se um decréscimo em AL até a deformação de 1,2% de SPMR, e após esta deformação, o valor AL é praticamente constante, semelhante ao observado para o LE (Figura 5(a)).

A Figura 8 mostra a influência da SPMR no AI, parâmetro calculado seguindo procedimento proposto por Chen,⁽⁴⁾ que consiste na medição da diferença entre a tensão necessária para uma deformação de 8% em tração e o limite de escoamento após envelhecimento deste material pré-deformado, após tratamento térmico de 100°C por 1 hora.

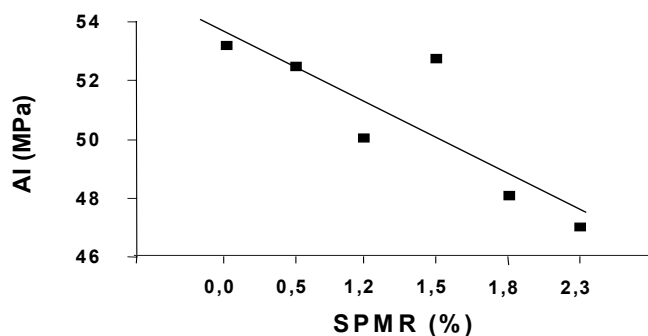


Figura 8 - Influência da SPMR no AI do aço AA-FOS estudado.

Observa-se que os aços estudados apresentam índice de envelhecimento entre 47 a 54 MPa. De acordo com estudo de Tanikawa,⁽⁵⁾ o material que apresenta AI maior que 30 MPa pode ser considerado envelhecível, e quanto maior o AI, maior a tendência em ocorrer tal fenômeno. Assim, pode-se verificar, pela Figura 8, que todos os aços deste estudo são susceptíveis ao envelhecimento e quanto menor o grau de deformação aplicado na laminação de encruamento, maior a tendência à ocorrência do fenômeno em questão.

Foram realizadas comparações entre os valores obtidos de YP-EL e de LE, logo após a produção do aço, com os encontrados após cinco meses de estocagem à temperatura ambiente. As variações da deformação no patamar de escoamento ($\Delta YP-EL$) e do limite de escoamento (ΔLE) nestas condições são apresentadas na Figura 9.

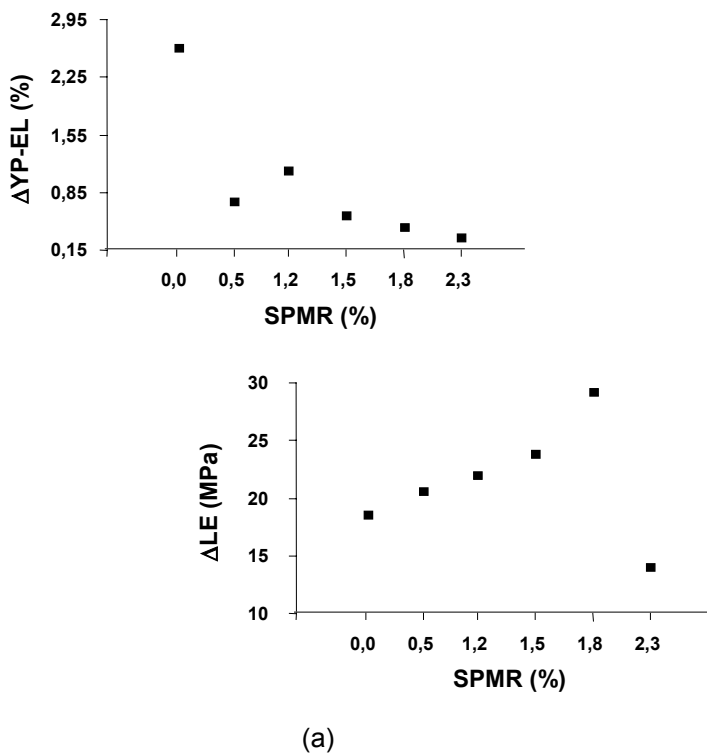


Figura 9 - Efeito da SPMR no valor de $\Delta YP-EL$ (a) e ΔLE (b) do aço AA-FOS estudado.

A Figura 9(a) mostra aspecto semelhante de $\Delta YP-EL$ com SPMR que à encontrada por Hundy⁽²⁾ (Figura 3). Quanto maior o grau de deformação aplicado no laminador de encruamento, menor é a variação da deformação no patamar de escoamento, o que é explicado pelo aumento da densidade de deslocamentos, conforme proposto por Cottrell e Bilby.⁽⁶⁾

Dois variáveis se destacam como influentes na ocorrência do fenômeno de envelhecimento: a composição química e a deformação imposta ao material na laminação de encruamento. Como todos os casos estudados foram oriundos de uma mesma corrida, pode-se inferir que todas as condições avaliadas apresentaram valores similares de carbono e nitrogênio em solução sólida, respectivamente C_{ss} e N_{ss} . Portanto o único parâmetro, relacionado ao fenômeno de envelhecimento, que pode ter variação para cada grau de deformação testado, é a densidade de deslocamentos presente no material.

Na condição de SPMR igual a 0,0% parte das deslocações se apresentavam “ancoradas” por C_{ss} e N_{ss} , enquanto o restante encontravam-se livres. Com o aumento da deformação, há uma elevação da densidade de deslocações, aumentando conseqüentemente a quantidade de deslocações livres, conforme Cottrell e Bilby.⁽⁶⁾ Com o passar do tempo, através de processo difusional, parte destas deslocações livres são também aprisionadas, diminuindo sua quantidade e caracterizando o fenômeno de envelhecimento.

Em suma, à medida que SPMR aumenta, geram-se mais deslocações. Como C_{ss} e N_{ss} são praticamente constantes, a quantidade de deslocações livres aumenta, promovendo uma diminuição dos efeitos do fenômeno de envelhecimento.

Observa-se, na Figura 9(b), que o ΔLE não varia de forma semelhante a $\Delta YP-EL$ com SPMR. Esta se aproxima à Figura 4. Deve-se destacar que esta Figura 9(b) não apresenta a mesma condição de avaliação feita por Hundy⁽²⁾ (Figura 4), uma vez que este estudou maiores graus de deformação que os avaliados nesse trabalho.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou que o aço acalmado ao alumínio e refosforado, laminado a frio, recozido e galvanizado a quente, apresentou comportamento mecânico semelhante quando se aplicou graus de deformação na laminação de encruamento entre 1,2% e 2,3%. Destaca-se também que o material apresentou LE sem deformação no patamar de escoamento, logo após sua produção, para SPMR igual ou superior a 1,2%. Com relação a avaliação do envelhecimento, percebeu-se que o aço estudado apresentou menor tendência de retorno de escoamento descontínuo e do aumento da deformação no patamar de escoamento para maiores reduções aplicadas no laminador de encruamento.

REFERÊNCIAS

- 1 LAKE, J.S.H., **Control of Discontinuous Yielding by Temper Rolling**. Journal of Mechanical Working Technology, V.12, p.35-66, 1985.
- 2 HUNDY, B. B., **The Strain-age Hardening of Mild Steel**. Metallurgia. V.53, p.203, 1956.
- 3 GILMAN, J.J., **Debris Mechanism of Strain-Hardening**. Journal of Applied Physics, V.33, p.2716,1962.
- 4 CHEN, J. K., **Aging Behaviors of Low Carbon Steels**. China Steel Technical Report, Taiwan, N° 14, p. 23-28, 2000.
- 5 TANIKAWA, K., **Strain Aging Properties of Extra-low Carbon Bake Hardenable Cold Rolled Steel Sheets**. NKK Technical Review , N° 72,p. 33-38, 1995.
- 6 COTTRELL, A. H., BILBY, B., **Dislocation Theory of Yielding and Strain Aging of Iron**, Proc. Phys. Soc., 62 A, 49, 1949.