

APLICAÇÃO DO EFEITO BAUSCHINGER EM ARAME BAIXO TEOR DE CARBONO MICROLAMINADO A FRIO.

Luan Marcel Costa Vasconcelos ¹; Felipe Farage David²;

¹ Luan Marcel Costa Vasconcelos, Bolsista (CNPq, FAPEMIG ou IFMG), Engenharia Mecânica, IFMG Campus Congonhas, Congonhas - MG; luanvasconcelos0895@gmail.com

² Orientador: Felipe Farage David. Pesquisador do IFMG, Campus Congonhas; felipe.farage@ifmg.edu.br

RESUMO

O Efeito Bauschinger é um fenômeno que ocorre nos metais de maneira a reduzir a resistência mecânica e aumentar a ductibilidade. Em geral, é considerado um efeito deletério as propriedades mecânicas do aço. O presente trabalho busca controlar esse fenômeno em arames de aço baixo carbono, como alternativa a produção de arame recozido ou galvanizado sem a utilização de tratamento térmico de recozimento para alívio de tensão. Para isso, foi projetada e construída a máquina para Alívio De Tensão em Arames Metálicos (máquina ATAM, número do pedido da patente BR 10 2020 009155 7) que aplicará esforços cíclicos de flexão através de roldanas. Esses esforços cíclicos irão desencadear o Efeito Bauschinger que é o fenômeno responsável pelo alívio de tensões a frio. As variáveis utilizadas para promover desse efeito foram o número de roldanas, o ângulo entre as roldanas e a velocidade do arame durante seu processamento. Os resultados comprovaram que a máquina ATAM é capaz de aliviar consideravelmente a tensão Limite de escoamento e a Limite de Resistência a Tração, e aumentar a ductibilidade do arame de aço baixo carbono microlaminado a frio.

INTRODUÇÃO:

Na produção de fios e arames de aço, o Efeito Bauschinger demonstra um potencial significativo para adequação das propriedades mecânicas finais do aço. O Efeito Bauschinger é definido pela redução do limite de escoamento de um metal policristalino após uma pré-deformação na direção oposta à conformação (KOSTRYZHEV, 2009). De acordo com Hu et al. (2016), esse fenômeno aumenta a ductibilidade e reduz o limite de escoamento e resistência. Essas alterações de propriedades demonstram-se benéficas para recuperar a ductibilidade em arames de aço que foram submetidos a altas taxas de deformação a frio. Também, de acordo com Pereira et al. (2014), após o Efeito Bauschinger há um rearranjo das discordâncias em uma estrutura de subgrão, que reduz o limite de escoamento do material. A redução do limite de escoamento e de resistência é benéfica na fabricação de arames recozidos e gera uma possibilidade de redução do tempo do ciclo de recozimento ou utilização de ligas de aço carbono comum de menor custo.

A máquina para Alívio De Tensão em Arames Metálicos (máquina ATAM, número do pedido da patente BR 10 2020 009155 7) foi inspirada no princípio de funcionamento do processo de endireitamento convencional, como mostrado esquematicamente pela Figura 1. Este processo promove deformações plásticas cíclicas e bem definidas de flexão para remover todas as tensões que causaram uma curvatura em formato espiral (Figura 2), de maneira a introduzir um novo padrão de deformação, correspondente a de um fio reto. Cada flexão deve ser aplicada para produzir no material uma tensão acima do seu limite de escoamento, ou o fio irá retornar à sua posição original (ENGHAG, 2009).

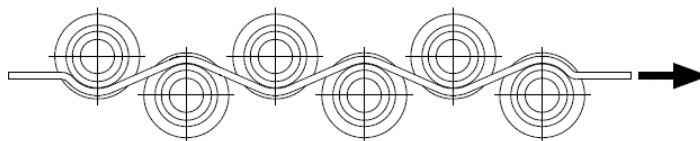


Figura 1 – Endireitamento de um arame via roldanas.

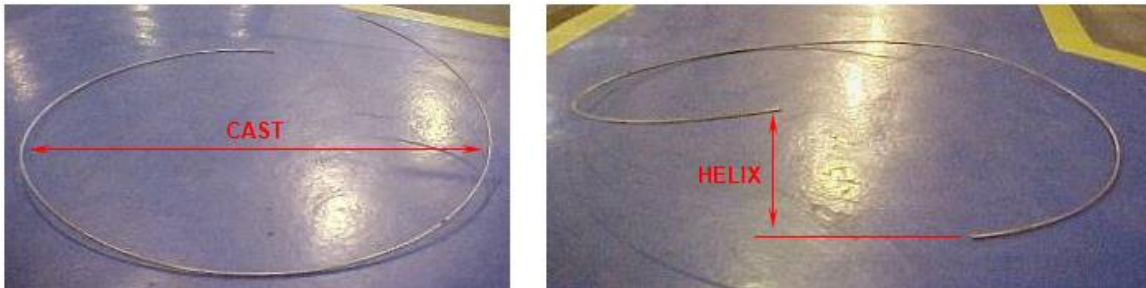


Figura 2 – Curvatura resultante do processo de trefilação de arames na (a) horizontal (Cast) e (b) vertical (Helix) (DAVID, 2014).

No processo de endireitamento, tensões de compressão e tração são aplicadas na superfície do arame conforme mostra a Figura 3. A fração da deformação plástica e elástica é aplicada no material em função do diâmetro do rolo endireitador. Quanto menor diâmetro do rolo maior será a fração de deformação plástica (ENGHAG, 2009).

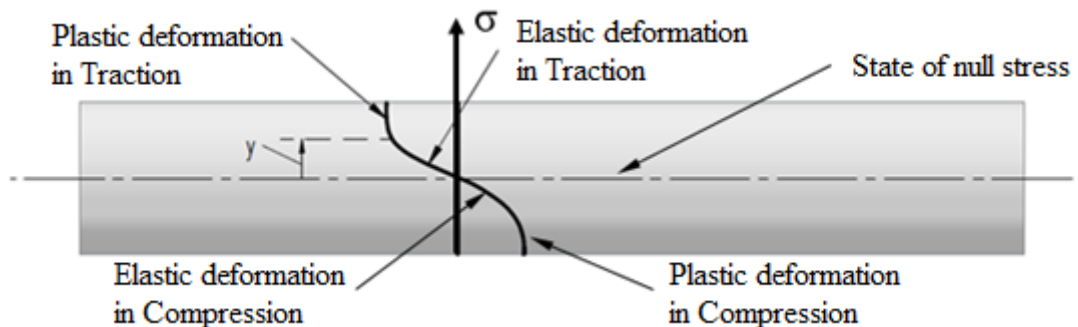


Figura 3 – Fração da deformação plástica e elástica no perfil de um arame endireitado, adaptado (ENGHAG, 2009).

Na etapa de endireitamento dos arames de aço, o material sofre flexão como mostra a Figura 1. Dessa forma, o material é submetido a três estado de tensões: compressão, nulo e tração (Figura 3).

A superfície do arame em contato com a roldana é a região de máxima deformação de compressão. Na superfície oposta ao rolo endireitador o material é submetido à tensão máxima de tração. Logo, existe uma linha interna em que a tensão aplicada é nula. O diagrama contendo as três regiões está de acordo com a Figura 3. Como os rolos endireitadores alternam de posição (Figura 1), as regiões de tensão de compressão e tração também alternam de maneira cíclica, promovendo um alívio de tensão no arame, fenômeno denominado de Efeito Bauschinger (SOWERBY, UKO and TOMITA, 1979).

Importante ressaltar que este alívio de tensão pode ser produzido utilizando apenas deformações plásticas cíclicas de compressão e tração, que são produzidas através do endireitamento do arame microlaminado ou trefilado em roldanas. Assim, há um potencial de evitar o tratamento térmico de alívio de tensões, que demanda tempo e temperatura (realizados em fornos do tipo campânula ou cubas de chumbo líquido a 700°C). Isso reduz uma etapa do processo de fabricação e conseqüentemente o custo de produção do arame microlaminado ou trefilado.

Portanto, o objetivo deste artigo é promover o Efeito Bauschinger no arame de aço baixo carbono microlaminado a frio, com composição química de acordo com a norma ASTM A1040 classe 1006. Dessa forma, será avaliado o potencial de reduzir o limite de escoamento, limite de resistência, e aumentar a ductibilidade do arame com alto grau de redução a frio. Este processo de alívio de tensão será desenvolvido através de um processo cíclico de flexão a frio aplicado pelas roldanas da máquina ATAM.

METODOLOGIA:

Para os experimentos, foi utilizado o arame aço carbono comum com diâmetro de 1,29 mm, com composição química equivalente a norma ASTM A1040 classe 1006. Este material é comumente utilizado na microlaminação a frio de arames de aços galvanizados e recozidos. Os dados da composição química deste aço são exibidos na Tabela 1, sendo obtidos por meio de ensaios de espectrometria óptica.

Tabela 1: Composição química do aço ASTM A1040 classe 1006.

Classe do Aço	Composição Química (% peso)					
	C	Mn	Si	S	P	N (ppm)
1006	0,05	0,42	0,080	0,014	0,022	29

O arame de aço foi inicialmente processado na máquina para Alívio De Tensão em Arames Metálicos (número do pedido da patente BR 10 2020 009155 7, Figura 4). Esta máquina foi desenvolvida, construída e instalada no Laboratório de Ensaios e Metalografia do IFMG em parceria com a Gerdau S.A. O objetivo dessa máquina é promover e controlar o Efeito Bauschinger, por meio das seguintes variáveis operacionais: velocidade de bobinamento do arame, ângulo entre as roldanas e o número de roldanas. A máquina ATAM (Figura 4) é constituída de 3 partes: 1. Estocador, 2. Mesa de Roldanas e 3. Bobinador.

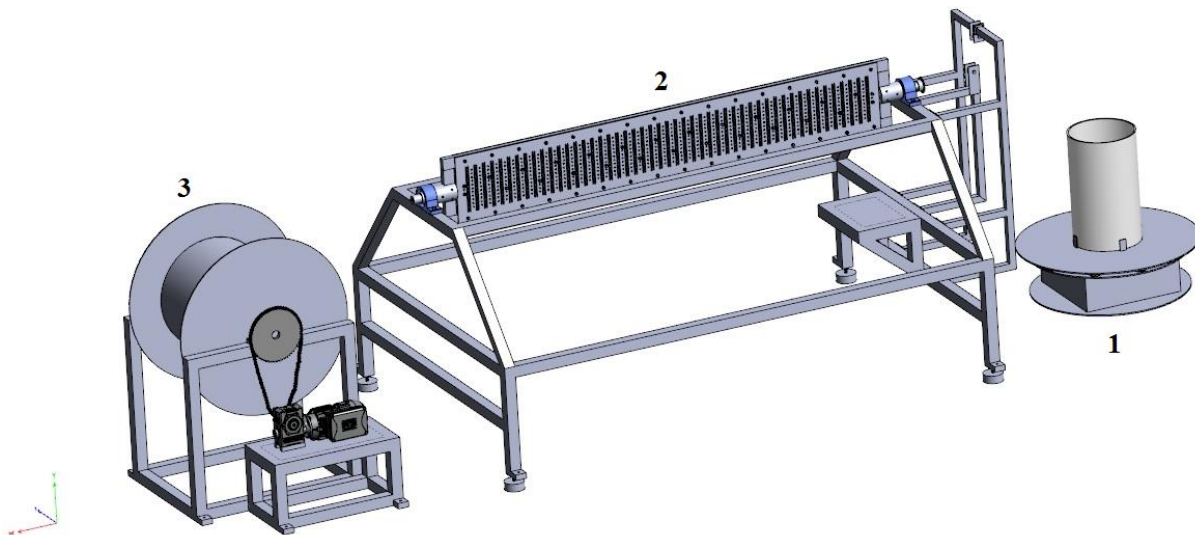


Figura 4 - Desenho esquemático tridimensional da máquina ATAM.

O Estocador é responsável por acomodar e receber os rolos de arame de aço. A Mesa de Roldanas é o local onde será inserido as roldanas de aço para determinar o caminho de deformação do arame. Nela será alternado o número e o ângulo entre as roldanas. Já o Bobinador puxa o arame de aço pelo sistema. Nele é possível variar a velocidade de bobinamento do arame.

Com a finalidade de promover o Efeito Bauschinger na máquina ATAM, foi utilizado a seguinte condição operacional de teste: velocidade de bobinamento de 10,1 m/min, 11 roldanas totais e um ângulo do arame entre as roldanas de 47,4°. Este ângulo é determinado em função do posicionamento das roldanas na Mesa de Roldanas (Figura 4, item 2). A velocidade foi escolhida tomando como base a velocidade de processamento do arame de aço na linha de galvanização em indústrias Siderúrgicas. O processamento do arame de aço por meio da máquina ATAM é exibido na Figura 5. O caminho de deformação do arame de aço no processamento é no formato senoidal.



Figura 5 – Posicionamento de 11 roldanas em um ângulo fixo de $47,4^\circ$ para o arame microlaminado a frio.

A velocidade nominal de bobinamento do arame foi monitorada através do sensor de velocidade da máquina ATAM e apresentou um valor médio de 10,1 m/min. Nota-se que inicialmente a velocidade aumenta e em 3 segundos atinge a velocidade nominal conforme exibido na Figura 6. Após 51 segundos o teste é interrompido e a velocidade do arame atinge seu valor nulo em 5 segundos. O tempo do teste na velocidade nominal foi de 48 segundos, sendo processados 8 metros de arame.

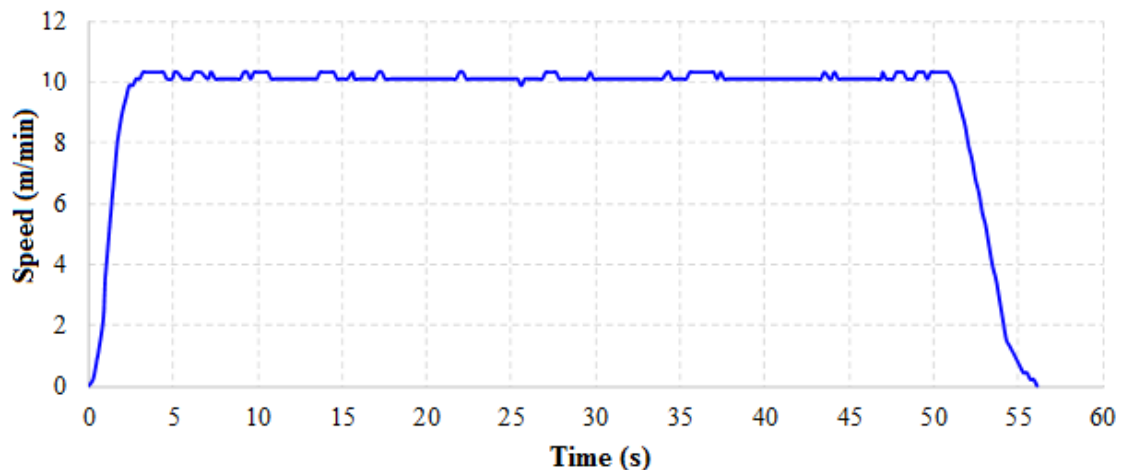


Figura 6 – Curva da velocidade de bobinamento do arame durante o teste na máquina ATAM.

As amostras para realização dos ensaios de tração foram retiradas após 5s de teste, de maneira a garantir que o arame foi processado na velocidade de 10,1 m/min (Figura 6). Ainda, foram utilizadas 11 roldanas posicionadas sob um ângulo fixo de $47,4^\circ$, na posição central do gabarito, conforme exibido na Figura 5.

Ensaio de tração foram realizados para identificar as principais propriedades mecânicas (limite de escoamento, relação elástica e alongamento) do arame de aço. Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal EMIC 100kN do IFMG. As propriedades mecânicas do arame microlaminado a frio (como recebido) e após o processamento por meio da máquina ATAM, foram determinados por meio do ensaio de tração (mínimo de 7 réplicas) conforme a norma ASTM A370.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

As propriedades mecânicas do arame microlaminado a frio (como recebido) e após o processamento por meio da máquina ATAM (condição operacional de teste: velocidade de bobinamento de 10,1 m/min, 11 roldanas totais e um ângulo do arame entre as roldanas de $47,4^\circ$), são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Variação das propriedades mecânicas do arame antes e após aplicação do teste na máquina ATAM.

Propriedades	Arame Como Recebido	Arame Após Teste	ΔP	$\Delta P(\%)$
Diametro (mm)	1,29 \pm 0,005	1,27 \pm 0,003	-0,02	-1,3
$\sigma_{e(0,2\%)}$ (MPa)	846,7 \pm 21	732,3 \pm 58	-114,4	-13,5
σ_r (MPa)	922,8 \pm 6	875,9 \pm 5	-46,9	-5,1
σ_r/σ_e	1,09 \pm 0,03	1,20 \pm 0,09	+0,11	+10,2
Alongamento (%)	1,9 \pm 0,4	2,6 \pm 0,3	+0,7	+40,1

Dessa forma, por meio dos resultados exibidos na Tabela 2, é possível determinar a diferença entre as propriedades mecânicas (Limite de escoamento (σ_e), Limite de Resistência a Tração (σ_r), Relação Elástica (σ_r/σ_e) e Alongamento), do arame de aço antes e após a passagem pela máquina ATAM. Os resultados são exibidos na Tabela 2, em que ΔP é a variação das propriedades (valores de propriedades após passagem pela máquina ATAM subtraído dos valores de propriedades do aço como recebido) em valores absolutos e $\Delta P(\%)$ é a diferença de propriedade em valores percentuais.

Os resultados do teste (Tabela 2) exibem uma redução expressiva de 13,5% (-114,4MPa) do Limite de escoamento e de 5,1% (-46,9MPa) do Limite de Resistência a Tração. Ainda um aumento da Relação Elástica de 10,2% e um considerável aumento do Alongamento de 40,1%. Ainda, o diâmetro do arame durante o teste permaneceu quase inalterado (pequena redução de 1,3%).

As curvas Tensão-Deformação para o arame como recebido (curva azul) e após o teste na máquina ATAM (curva vermelha), está exposto na Figura 7. É possível verificar graficamente o aumento expressivo da plasticidade do material e ainda a redução do Limite de escoamento e do Limite de Resistência a Tração. O campo de deformação plástica (quantidade de deformação a partir do limite de escoamento até a ruptura do corpo de prova) aumentou em 72%. Este comportamento mecânico reafirma que máquina ATAM, por meio do processamento e controle das variáveis operacionais (velocidade de bobinamento, ângulo do arame entre as roldanas e número de roldanas), é capaz de produzir o Efeito Bauschinger no arame de aço e, por conseguinte, recuperar parcialmente as propriedades mecânicas do arame encruado.

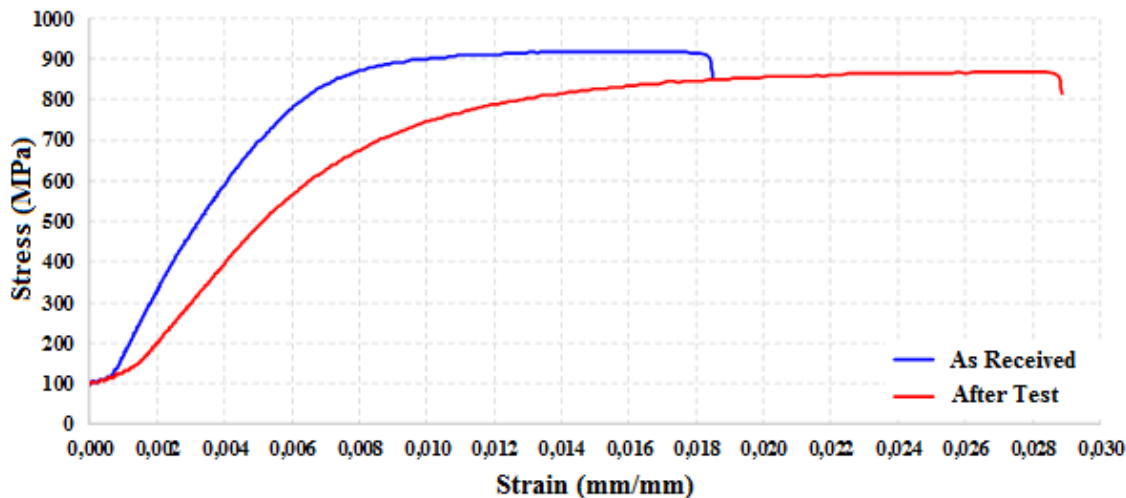


Figura 7 – Curva tensão-deformação para o arame como recebido e após o teste com a máquina ATAM.

CONCLUSÕES:

Este trabalho demonstrou a aplicação do Efeito Bauschinger no arame de aço baixo carbono microlaminado a frio, com a finalidade de promover alívio parcial das tensões e, por conseguinte, uma recuperação parcial das propriedades mecânicas do arame encruado.

Ao final das análises foi constatado que, apesar do Efeito Bauschinger ser considerado um efeito deletério as propriedades do metal, quando controlado, pode ser utilizado para alívio de tensões em arames de aço encruados. Os resultados obtidos demonstraram uma recuperação da plasticidade do arame do aço baixo carbono de 72% e um aumento da ductibilidade em torno de 40%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. West Conshohocken, p. 49. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1040: Standard Guide for Specifying Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Carbon, Low-Alloy, and Alloy Steels**. West Conshohocken, p. 13. 2015.

DAVID, F. F. **Influence of thermomechanical treatment on microalloyed steel and common carbon in the manufacture of CA-60 steel wire**. Dissertação (Master in Mechanical Engineering) - Federal University of Pernambuco. Recife, p. 102. 2014.

DAVID, Felipe Farage. **Máquina para alívio de tensão em arames metálicos**. Depositors: Federal Institute of Education Science and Technology of Minas Gerais and Gerdau S.A. BR 10 2020 009155 7. Deposit: 08 Mar. 2020.

ENGHAG, P. **Steel Wire Technology**. 4ª. ed. Orebro: Applied Materials Technology, 2009.

HU, J. et al. On the evaluation of the Bauschinger effect in an austenitic stainless steel - The role of multi-scale residual stresses. **International Journal of Plasticity**, 24 Maio 2016. 203-223.

KOSTRYZHEV, A. G. **Bauschinger effect in Nb and V microalloyed line pipe steels**. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Birmingham. Birmingham, p. 206. 2009.

PEREIRA, T. S.; CHIU, Y. L.; JONES, I. P. **Microstructure characterisation of an X70 grade pipeline steel and its dislocation development during Bauschinger testing**. Electron Microscopy and Analysis Group Conference 2013. York: Journal of Physics. 2014. p. 1-4.

SOWERBY, R.; UKO, D. K.; TOMITA, Y. **A Review of Certain Aspects of the Bauschinger Effect in Metals**. Materials Science and Engineering, Lausanne, 7 Maio 1979. 43-58.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

Este projeto de pesquisa foi apresentado e publicado nos anais do I South Florida Congress of Development, organizado por South Florida Publishing LLC, durante os dias 14 e 15 de abril de 2021.

Título do artigo: The Bauschinger Effect application on cold micro-laminated low-carbon wire.