

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA LAMINAÇÃO A FRIO DO AÇO HC420LA

¹Katarine Tavares

²Tiago Rodrigues

USP, Faculdade de Engenharia Naval e Oceânica – Av. Prof. Mello Moraes 2231
Cidade Universitária, São Paulo, SP
tiago_rodrigues@ursp.br

¹Maria Cindra Fonseca

Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/UFF – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil.
mariacindra@id.uff.br

Resumo. Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) possuem ampla aplicação na indústria devido a sua elevada resistência e tenacidade. Muitas de suas propriedades são oriundas do processo de laminação a frio, no qual o material é conformado mecanicamente. Entretanto, é nessa etapa que devido ao grau de deformação sofrido pelo material, tensões residuais são geradas e podem comprometer a vida em serviço do produto final. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo estudar a influência do grau de deformação induzido por laminação a frio nas tensões residuais de amostras de aço HC420LA. Foi usada a técnica por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$, para as medições, seguida pela análise numérica por elementos finitos após diferentes reduções. Os resultados mostraram que as tensões residuais, inicialmente compressivas, sofreram alteração para trativas, relativamente elevadas, após a laminação a frio com redução de 10% (220 MPa) e de 165 MPa com redução de 20%, em ambas as faces. Com o aumento do percentual de redução para 50%, as tensões residuais, tanto longitudinais quanto transversais, se tornaram compressivas. A simulação pelo método de elementos finitos do processo de laminação a frio se mostrou coerente com os resultados experimentais disponíveis na literatura.

Palavras chave: Tensões Residuais. Laminação. Aço HC420LA. Difração de raios-X. Elementos finitos.

1. INTRODUÇÃO

Os aços ARBL (alta resistência e baixa liga) são materiais estruturais importantes que possuem baixa quantidade de elementos de liga como titânio, nióbio e alumínio. Esses aços foram projetados para atender condições como elevada resistência e foram destaque no início da década de 70 pela contribuição no desenvolvimento de produtos mais leves (SKOBIR, 2011).

A laminação é o processo de conformação mecânica no qual ocorre a redução de espessura de um material como resultado da ação de prensagem dos rolos de trabalho, além das tensões de cisalhamento exercidas pelos rolos de laminação opostos entre si, girando com a mesma velocidade periférica e em sentido contrário (GROOVER, 2014). A laminação pode ser feita tanto a frio quanto a quente dependendo da temperatura de trabalho. Dessa forma, a laminação a frio é conhecida como sendo um processo de conformação mecânica de deformação a frio caracterizado por ser realizado a uma temperatura inferior à temperatura de recristalização do material T_{nr} (CHIAVERINI, 1986).

Todos os processos de fabricação, incluindo os de conformação mecânica, são geradores de tensões residuais. As tensões residuais são tensões auto-equilibradas presentes em materiais sólidos na ausência de aplicação de esforços externos. Dependendo da natureza e da magnitude, estas tensões, se forem trativas, podem reduzir a vida em fadiga do componente, facilitar a nucleação de trincas de fadiga, corrosão sob tensão e levar à ruptura prematura do componente. Entretanto, se as tensões residuais forem compressivas elas podem ser benéficas e aumentar a vida em fadiga do componente (HEINZE *et al.*, 2011).

Segundo Devarajan (2012) é um desafio superar problemas relacionados à laminação. Mesmo nas fases iniciais do projeto, simulações de processos de conformação de metais são realizadas usando métodos de elementos finitos. Dessa forma, muitos estudos têm sido realizados a fim de verificar a influência dos parâmetros de laminação, tais como velocidade e diâmetro do rolo, e como eles alteram o estado de tensões gerado na chapa final produzida. Neste propósito, Wang *et al* (1998) analisaram as tensões residuais, pressão de contato e força de laminação, alterando a velocidade do rolo na laminação a frio de chapas de aço e Jiang e Tieu *et al.* (2004) simularam a laminação a frio de chapas finas de aço

com diferentes modelos de atrito usando análise de elementos finitos 3D. Apesar desses trabalhos, pouco foi estudado sobre a influência dos passes de laminação a frio nas tensões residuais, em especial nos aços ARBL.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo analisar as tensões residuais em amostras do aço HC420LA de amostras como recebidas, pelo método de difração de raios-X, seguida da análise numérica, simulando o processo de laminação com reduções de 10%, 20% e 50%, pelo método de elementos finitos com um *software* comercial.

2. METODOLOGIA

No presente trabalho foram estudadas amostras do aço de alta resistência e baixa liga denominado HC420LA, recebido em forma de chapa laminada com 2,0 mm de espessura, fabricado conforme a norma DIN EN 10268. O material foi recebido na forma de chapa laminada e foi realizado o corte por guilhotina de duas amostras de 160 x 40 mm. A composição química e as propriedades mecânicas do material, informadas na norma, se encontram nas Tab. (1) e Tab. (2).

Tabela 1. Composição química do aço HC420LA (máx. % de peso) (Fonte: Norma DIN EN 10268).

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
0,14	0,5	1,6	0,030	0,025	0,015	0,15	0,09

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço HC420LA (Fonte: Norma DIN EN 10268).

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Deformação (%)
420-520	470-600	17

O trabalho de análise numérica e experimental foi iniciado com os seguintes procedimentos: Preparação de duas amostras de aço HC420LA; medição de tensões residuais por difração de raios-X em cada face das amostras como recebida, modelagem das amostras, e análise numérica por elementos finitos na laminação a frio com reduções diferentes, todas relacionadas à mesma espessura inicial, conforme demonstrado na Fig (1).

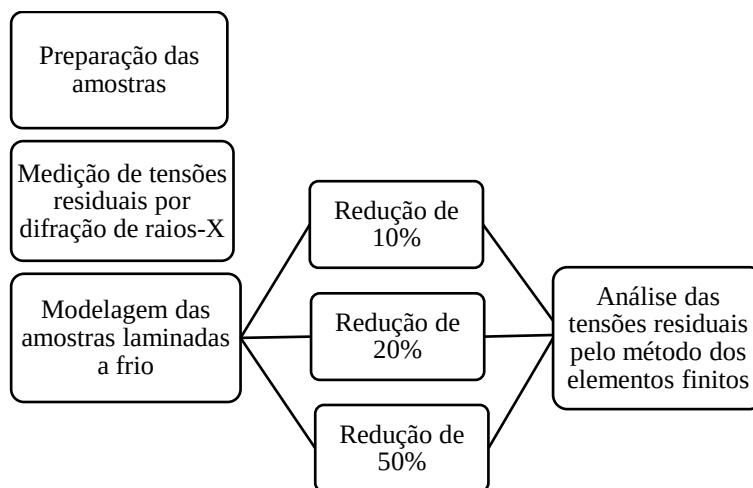


Figura1. Procedimento das análises numérica e experimental.

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$. As medições foram realizadas no Laboratório de Análise de Tensões (LAT/UFF), utilizando o analisador de tensões XStress3000, do fabricante Stresstech, apresentado na Fig. (2).

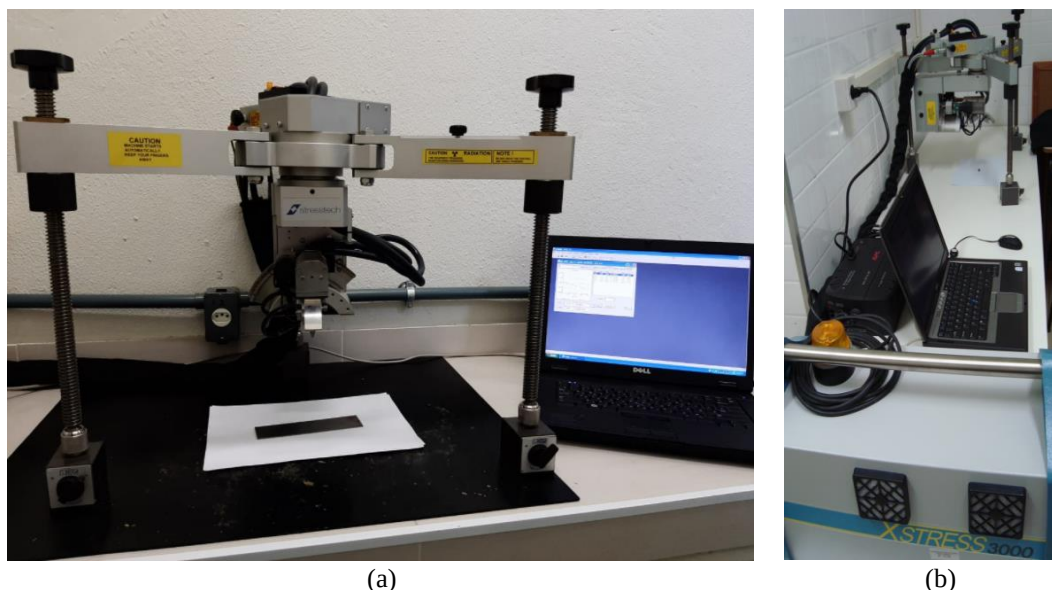


Figura 2. Analisador de tensões X-Stress3000: a) sistema de medição com *software*; b) equipamento completo com unidade de controle.

As amostras foram simuladas com base num laminador elétrico duo de modelo LE 200 que possui suas especificações na Tab. (3), evidenciando a velocidade de rotação do rolo e sua capacidade de redução que foram usadas na definição das características do rolo no modelo de elementos finitos.

Tabela 3. Características técnicas do laminador LE 200.

Motor	Trifásico de 5HP
Diâmetro da área de trabalho do rolo (mm)	110
Comprimento da área de trabalho do rolo (mm)	200
Capacidade aproximada de laminação (mm)	25 a 0,1
Velocidade aproximada de laminação (m/min)	8
Velocidade de rotação do rolo (rot/min)	23

Em relação à modelagem em elementos finitos, a metodologia que foi utilizada para este estudo foi a de problema explícito, com estado de tensão 3D. A chapa foi modelada como um bloco linear, com integração reduzida, utilizando o elemento do tipo C3D8R e análise dinâmica explícita utilizando o *software*. O modelo concebido, a fim de simular a laminação, apresentou 55124 nós e 41010 elementos. O modelo em elementos finitos foi construído para uma abordagem tridimensional.

O processo de laminação é considerado um problema quase-estático porque sua velocidade de trabalho é baixa, sendo assim os efeitos de inércia não são dominantes (SMITH, 2009). A chapa foi definida como um sólido deformável e o rolo como um sólido discreto rígido. Nenhuma dependência de temperatura foi levada em consideração.

As condições de contorno do modelo foram empregadas em duas etapas: primeiramente foi essencial restringir a movimentação indesejada do conjunto, chapa e rolo, para isso foi utilizada uma condição de pino no ponto de referência (RP) adicionado ao centro do rolo. A segunda parte consiste em impor a movimentação esperada do conjunto, em relação ao rolo de trabalho. Assim, foi aplicada uma velocidade angular constante no valor de 2,4 rad/s propagada ao longo das etapas. Em relação à chapa, foi determinada uma velocidade linear na direção X no valor de 132 mm/s como condição inicial que foi suprimida ao longo do processo, pois a velocidade angular do rolo foi a responsável por manter a velocidade da chapa ao longo da simulação. A Fig. (3) mostra esquematicamente o modelo em malha e as condições iniciais aplicadas.

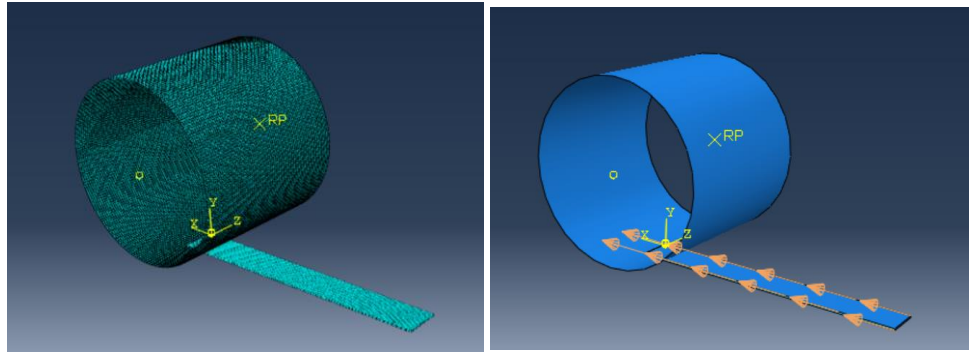


Figura 3. Vista 3D da malha gerada no conjunto montado (esquerda) e condições iniciais (direita).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das tensões residuais analisadas nas superfícies das amostras como recebidas estão indicados no gráfico de barras exibido na Fig. (4). Cada amostra recebeu uma numeração e as letras A e B representam suas faces. As chapas apresentaram tensões residuais compressivas em ambas as faces, tanto no sentido longitudinal quanto no transversal, apresentando uma tensão residual média de -92,5 MPa na direção longitudinal e de -90 MPa.

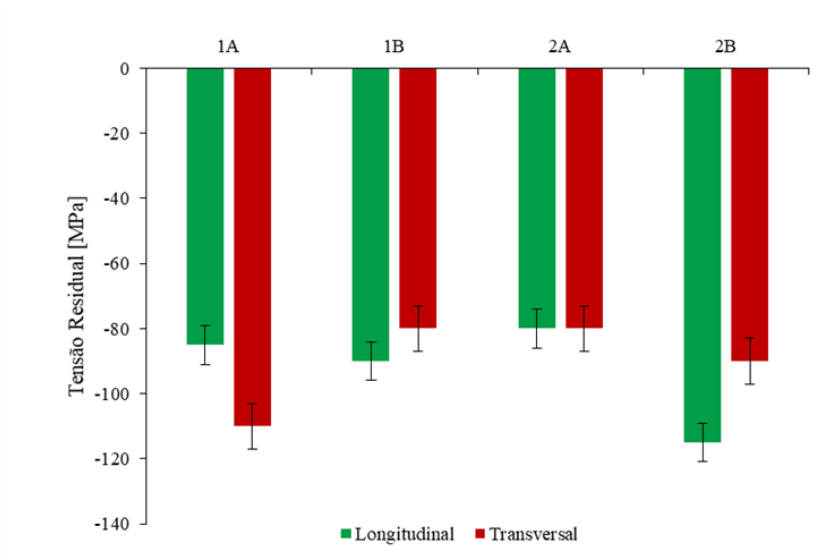


Figura 4. Tensões residuais superficiais.

3.1. Análise numérica por elementos finitos

Cada amostra foi laminada com diferentes graus de redução (10%, 20% e 50%) e seus valores de tensão residual na condição como recebida, tanto longitudinal (S_{11}) como transversal (S_{22}), foram considerados como condição inicial de cada face analisada. A velocidade angular do rolo e a velocidade inicial da chapa foram consideradas as mesmas em todas as análises e apenas um passe foi realizado em cada simulação.

O estado de tensão resultante após a aplicação das forças de laminação necessárias para conformar as chapas na redução desejada, resultou no surgimento de tensões residuais trativas e compressivas nas diferentes faces das amostras pelo modelo de elementos finitos conforme as Figs. (5) e (6).

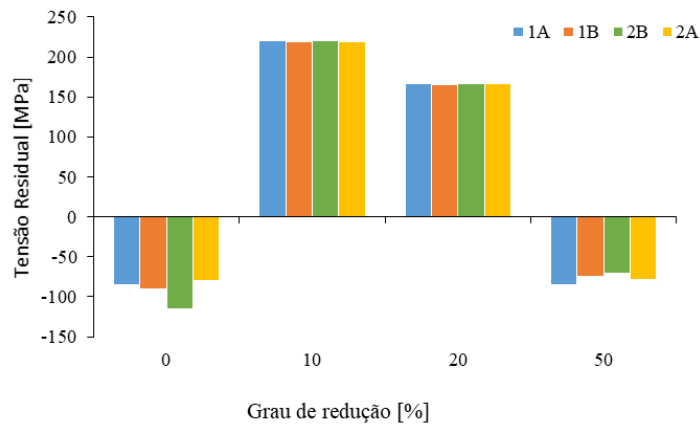


Figura 5. Tensões residuais longitudinais superficiais nas faces das amostras pelo modelo de elementos finitos.

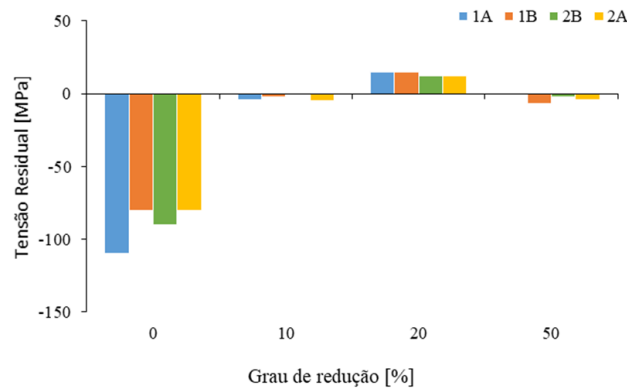


Figura 6. Tensões residuais transversais superficiais nas faces das amostras pelo modelo de elementos finitos.

Analisando os resultados é possível depreender que a redução de 10% na laminação foi a que provocou o maior aumento nos valores das tensões residuais longitudinais, que tiveram magnitude e natureza modificadas. Entretanto, na direção transversal o comportamento das tensões foi diferente do observado na direção longitudinal, as tensões residuais foram praticamente relaxadas, ficando em torno de zero não somente após a redução de 10%, mas permanecendo no mesmo patamar após as reduções subsequentes de 20% e 50%. Além disso, é possível observar que, diferentemente das tensões residuais longitudinais, as transversais foram mais uniformes ao longo de toda a chapa laminada, não apresentando variação expressiva conforme Fig (7). Tensões residuais destas magnitudes, próximas de zero, não afetarão a vida em serviço do material ao se somarem às tensões de trabalho.

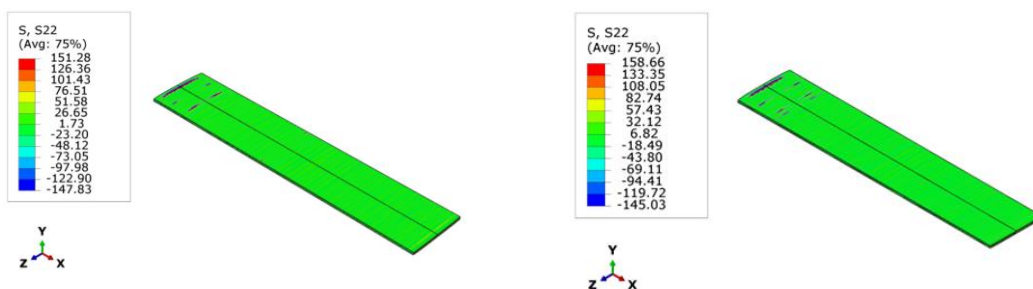


Figura 7. Evolução das tensões residuais transversais no modelo de elementos finitos após redução de 20% em ambas as faces da amostra

A análise de cada etapa de redução permite perceber que a redução de 10% foi a que mais impactou as tensões residuais superficiais longitudinais que se tornaram trativas e relativamente elevadas (220 MPa), o que representa cerca de 50% do limite de escoamento inicial do material (420 MPa), conforme Fig (8). Esse resultado está coerente com o trabalho Bahadur *et al.* (2004), que também observaram aumento das tensões residuais após a laminação com redução de 10%.

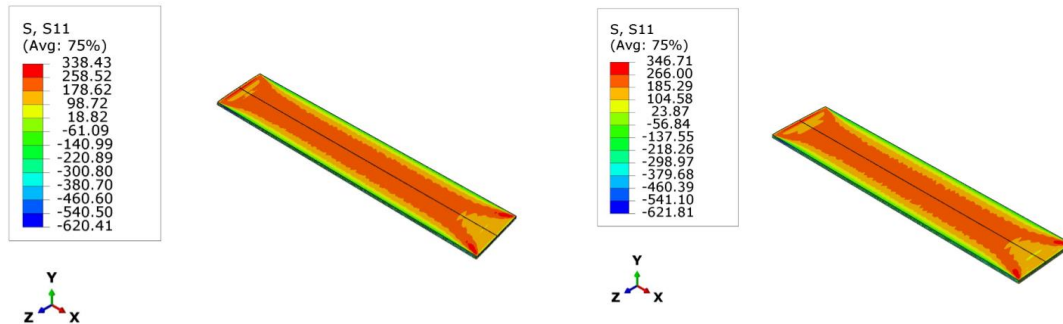


Figura 8. Evolução das tensões residuais longitudinais no modelo de elementos finitos após redução de 10% nas duas faces da amostra.

Por outro lado, após a laminação com redução de 50%, pelo modelo de elementos finitos, todas as faces mantiveram as tensões residuais longitudinais compressivas, atingindo o grau máximo de compressão semelhante ao estado como recebido. Assim, foi possível analisar que as tensões residuais longitudinais se tornaram compressivas em deformações maiores, como considerado anteriormente por Bahadur *et al.* (2004) que observaram presença de tensões residuais compressivas em reduções acima de 30%. O mesmo foi constatado por Santos (2019), que observou a presença de tensões residuais compressivas numa chapa laminada com grau de redução de 50%. Por fim, é evidente na Fig. (9) que houve uma maior uniformidade das tensões ao longo de todo material laminado.

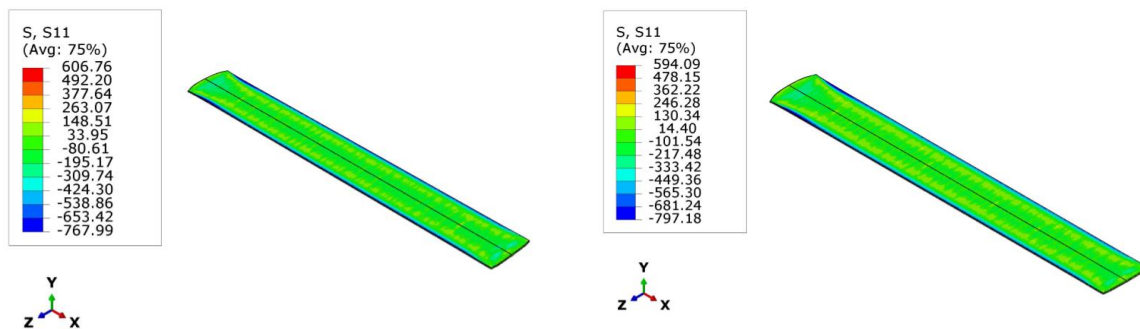


Figura 9. Evolução das tensões residuais longitudinais no modelo de elementos finitos após redução de 50% nas duas faces da amostra.

4. CONCLUSÕES

O estudo realizado, que teve como objetivo analisar as tensões residuais de chapas de aço HC420LA laminadas a frio sob diferentes graus de redução, permite as seguintes conclusões:

1. As amostras como recebidas apresentaram tensões residuais longitudinais compressivas, que sofreram alteração para trativas relativamente elevadas após a laminação a frio com redução de 10% (220 MPa) e de 165 MPa com redução de 20%, em ambas as faces.
2. Com o aumento do percentual de redução para 50%, as tensões residuais tanto longitudinais quanto transversais se tornaram compressivas.
3. Houve relaxação das tensões residuais transversais no decorrer dos diferentes graus de redução de 10%, 20% e 50%.
4. A simulação pelo método de elementos finitos da laminação a frio foi coerente com os resultados experimentais disponíveis na literatura.

5. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código Financeiro 001. Os autores também gostariam de agradecer às agências de pesquisa CNPq e FAPERJ, pelo apoio financeiro, que permitiu a realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Bahadur, A., Kumar, B.R, Chowdhury, S. G., 2004, “Evaluation of changes in X-ray elastic constants and residual stress as a function of cold rolling of austenitic steels”, Materials Science and Technology, Vol.20.
- Chiaverini, V; 1986, Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas, 2ª Edição, Vol I, São Paulo.
- Devarajan, K., Marimuthu, K. P., Dr. Ajith Ramesh., 2012, “FEM Analysis of Effect of Rolling Parameters on Cold Rolling Process”, Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 2.
- Groover, P. M., 2014, Introdução aos Processos de Fabricação. (4 ed) LTC Editora.
- Heinze, C., Schwenk, C., Rethmeier M., 2011, “Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding.” Journal of Constructional Steel.
- Jiang, Z.Y., Tieu, A.K., 2004, “A 3-D finite element method analysis of cold rolling of thin strip with friction variation”, Tribology International, Science direct, Vol. 37, No.37, Pp.185-191.
- Santos, T. R., 2019, Análise numérica e experimental da influência do grau de deformação por laminação a frio nas tensões residuais em amostras de aço IF, Dissertação de M.Sc.; PGMEC/UFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Skobir, D., A., 2011, “High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steels”, Materials and Technology 45, 295-301.
- Smith M., 2009, ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Wang, B., Hu, W., Kong, L.X., Hodgson, P., 1998, “The Influence of Roll Speed on the Rolling of Metal Plates”, Journal of metals and materials, Vol. 4, No. 4, Pp. 919-919.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE COLD ROLLING OF HC420LA STEEL

¹Katarine Domingues Tavares

²Tiago Rodrigues

USP, Faculdade de Engenharia Naval e Oceânica.
tiago_rodrigues@usp.br

¹Maria Cindra Fonseca

Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, e-mail:
mariacindra@id.uff.br

Abstract. High-strength and low-alloy steels (HSLA) have wide application in the industry due to their high strength and toughness. Many of its desirable properties come from the cold rolling process, in which the material is mechanically deformed. However, it is at this stage that due to the deformation rates experienced by the material, residual stresses are generated and can compromise the service life of the final product. Therefore, the present work aims to study the influence of the deformation rate induced by cold rolling on the residual stresses of HC420LA steel samples. The X-ray diffraction technique, using the $\sin^2\psi$ method, was used to measure the residual stresses of the samples as received condition, followed by numerical analysis by finite elements after different reductions. The results showed that the residual stresses, initially compressive, changed to relatively high tensile stresses after cold rolling with a reduction of 10% (220 MPa) and 165 MPa with a reduction of 20%, on both sides. With the increase in the reduction percentage of reduction to 50%, the residual stresses, both longitudinal and transverse, have become compressive. The finite element method simulation of the cold rolling process was coherent with the experimental results available in the literature.

Keywords: Residual stress, rolling, HC420LA steel, X-ray diffraction, finite element analyses

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.