



COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NO DOBRAMENTO DO AÇO CP1000 UTILIZADO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Tiago Pereira Barbosa¹, José Luiz Ferreira Martins¹, Leosdan Noris¹, Samuel Gramoso¹, Matheus Campolina², Maria Cindra Fonseca^{1*}

1 - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC/ UFF – Universidade Federal Fluminense, Rua Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240, Niterói – RJ.

2 - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – PPEMM – CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, CEP 20.271-110, Rio de Janeiro – RJ.

*mariacindra@id.uff.br

RESUMO

A conformação de chapas metálicas é amplamente empregada na produção de vários componentes na indústria automotiva. O dobramento a frio envolve o carregamento do metal na faixa plástica, seguido de descarga elástica, afetando as propriedades mecânicas do material. Essas grandes deformações inelásticas induzidas resultam em tensões residuais, que podem afetar potencialmente a integridade estrutural e a vida útil da estrutura. Neste trabalho foram analisadas as tensões residuais geradas em operação de dobramento a frio em chapas de aço *Complex Phase* CP1000 (1000 MPa de tensão limite de escoamento). Foram realizados dobramentos sob diferentes ângulos e as tensões residuais foram medidas após cada dobramento por difração de raios-X, pelo método do $\sin^2\psi$. As tensões residuais foram quase uniformes e todas compressivas para os diferentes ângulos de dobramento e podem impactar positivamente a vida em serviço dos componentes fabricados. Análises de dureza por impedância ultrassônica de contato (UCI) complementa o presente estudo.

Palavras-chave: tensões residuais, dobramento, aço CP1000, difração de raios-X.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, regulamentações socioeconômicas fizeram com que a indústria automobilística desenvolvesse veículos de consumo de combustível reduzido a fim de diminuir as emissões de poluentes e, ao mesmo tempo, aumentar a segurança dos ocupantes do veículo⁽¹⁾. O aço *Complex Phase* é um material de alta resistência mecânica. Sua microestrutura é constituída por um agregado de várias fases, sendo a matriz composta de ferrita e bainita, de granulação muito fina (menor que 5µm), além da presença de martensita. A presença de microligantes como Nb, introduz na matriz carbeto finos e estáveis que contribuem para o aumento da resistência mecânica. Dependendo do ciclo térmico empregado e do ajuste da composição química os materiais podem ainda apresentar elevada capacidade de dobramento⁽²⁾. Além disso, oferece alto limite de escoamento, boa resistência a trincas nas bordas e excelentes propriedades de flexão e tenacidade⁽³⁾.

O dobramento a frio é um processo de fabricação que visa atingir uma determinada curvatura necessária em estruturas de engenharia por meio de aplicação de cargas⁽⁴⁾. É uma operação onde o metal, por meio deste carregamento, é submetido até o regime plástico. Estas grandes deformações induzidas durante o dobramento resultam em tensões residuais e estas afetam a vida útil da estrutura^(5,6). As tensões residuais são tensões auto equilibradas existentes nos materiais em condições de temperatura uniforme e na ausência de carregamentos externos⁽⁷⁾.

Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo o estudo das tensões residuais geradas no dobramento a frio do aço CP1000 por difração de raios-X.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foi estudado o aço *Complex Phase* (CP1000) recebido como chapa laminada a frio, de 1,2 mm de espessura, produzido pela Usiminas. As propriedades mecânicas e a composição química do material estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição química do aço CP1000 (máx. % em peso).

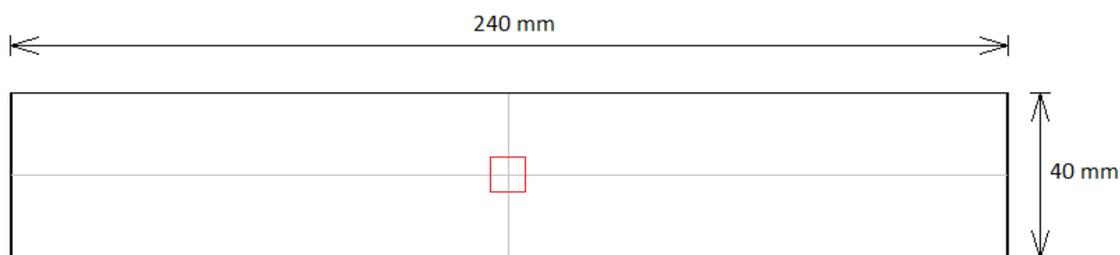
| C | Mn | Si | P | S |
|------|------|------|-------|-------|
| 0,15 | 3,30 | 2,00 | 0,090 | 0,040 |

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço CP1000 (Fabricante).

| σ_{LE} (MPa) | σ_{LR} (MPa) | Alongamento (%) |
|---------------------|---------------------|-----------------|
| 950 | 980 | 6 ~ 8 |

As amostras do aço CP1000 utilizadas têm dimensões aproximadas de 240 mm de comprimento e 40 mm de largura, conforme apresentado na Figura 1:

Figura 1 – Amostra de aço CP1000 utilizada no ensaio de dobramento (O autor).

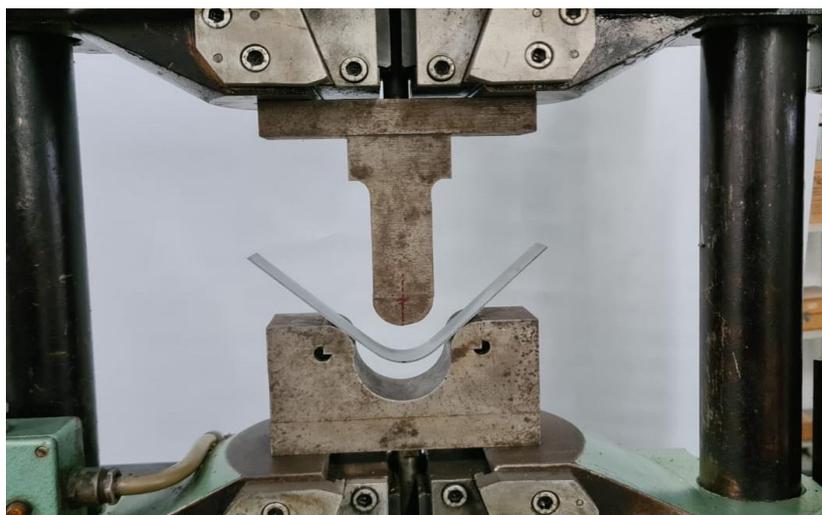


A chapa laminada foi recebida na condição galvanizada e para a medição das tensões residuais no aço (metal base), foi realizado polimento eletrolítico na região destacada em vermelho na Figura 1.

As amostras foram dobradas a frio, conforme a norma ASTM E 290 (ASTM, 2009). O processo de dobramento foi realizado na parte central de nove amostras ao longo de sua direção transversal em três ângulos de dobramento: 95°, 105° e 110°, sendo três amostras em cada condição.

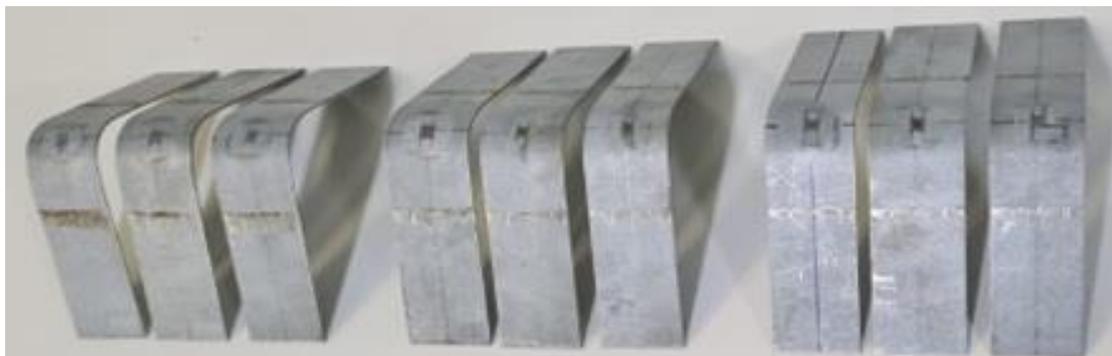
Os ensaios de dobramento foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM/UFF) em máquina de ensaios universal. A Figura 2 apresenta a montagem do ensaio na máquina utilizada.

Figura 2 – Montagem do ensaio de dobramento em máquina universal de ensaios.



Após o dobramento, as amostras ficaram com a configuração, conforme apresentado na Figura 3.

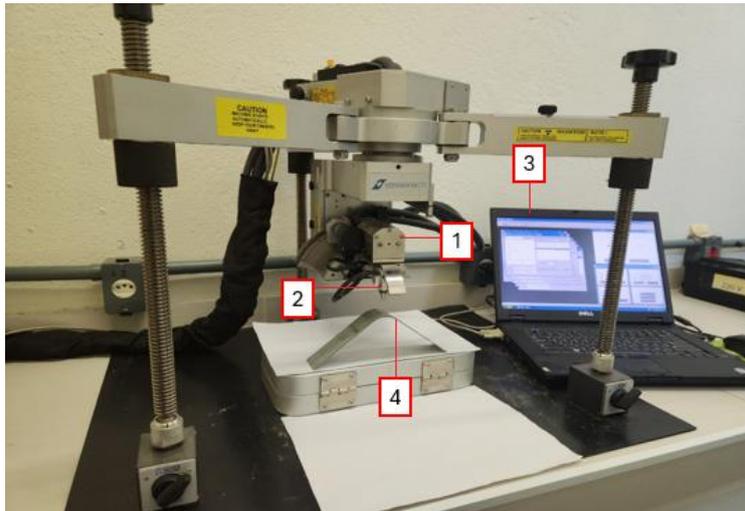
Figura 3 – Configuração das amostras após o processo de dobramento.



Em cada uma das nove amostras dobradas foram medidas as tensões residuais antes e após o dobramento, nos três ângulos, na região destacada em vermelho da Figura 1.

As tensões residuais foram medidas por difração de raios-X, com o método do $\text{sen}^2\psi$, usando radiação $\text{CrK}\alpha$, difratando o plano (211) da ferrita. Foi usado o analisador de tensões XStress3000 (Figura 4) do Laboratório de Análise de Tensões (LAT/UFF).

Figura 4 – Analisador de tensões residuais XStress3000: 1) tubo de raios-X, 2) colimador, 3) software, 4) amostra analisada.



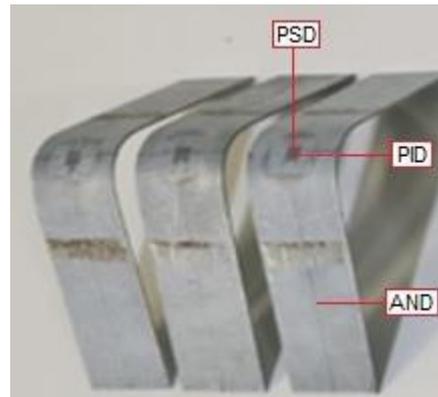
A avaliação de dureza superficial foi medida pelo método da Impedância Ultrassônica de Contato (*Ultrasonic Contact Impedance – UCI*), no Laboratório de Ensaio Não Destrutivos (LEND/UFF).

A Figura 5 apresenta a instrumentação utilizada para a medição de dureza superficial nas amostras. A unidade eletrônica de processamento foi calibrada de forma a apresentar a medida de dureza em HV (Dureza Vickers).

Figura 5 – a) Dureza UCI, b) Locais de medição de dureza nas amostras.



(a)



Em cada amostra foram medidas a dureza Vickers nas seguintes partes:

- Parte superior da área dobrada (PSD)
- Parte inferior da área dobrada (PID)
- Área não dobrada e distante da área dobrada (AND)

(b)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

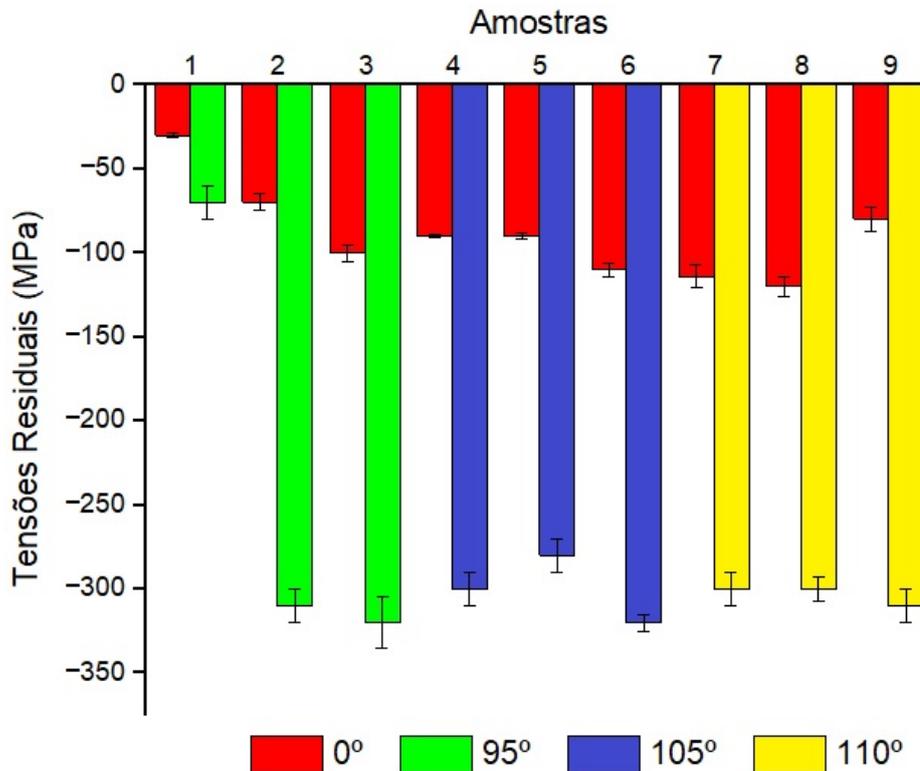
Os resultados das tensões residuais obtidas nas amostras analisadas estão apresentados na Tabela 4 e Figura 6.

Tabela 4 – Tensões residuais no dobramento.

| Amostra | 0° | 95° | 105° | 110° |
|---------|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | - 30 ± 1 | - 70 ± 10 | — | — |
| 2 | - 70 ± 5 | - 310 ± 10 | — | — |
| 3 | - 100 ± 5 | - 320 ± 15 | — | — |
| 4 | - 90 ± 1 | — | - 300 ± 10 | — |
| 5 | - 90 ± 2 | — | - 280 ± 10 | — |
| 6 | - 110 ± 4 | — | - 320 ± 5 | — |
| 7 | - 114 ± 7 | — | — | - 300 ± 10 |
| 8 | - 120 ± 6 | — | — | - 300 ± 7 |
| 9 | - 80 ± 7 | — | — | - 310 ± 10 |

A Figura 6 representa graficamente a variação das tensões residuais (TR) para os três ângulos de dobramento.

Figura 6 – Tensões residuais em função do ângulo de dobramento nas amostras.



As tensões residuais iniciais a 0°, antes do processo de conformação por dobramento foram todas compressivas e as amostras estavam na condição do material como-recebido, após ter sido produzido por laminação a frio. Provavelmente este processo foi o responsável por gerar as tensões residuais compressivas.

Considerando que todas as amostras eram chapas planas antes do dobramento e que os ângulos são medidos do lado interno ao dobramento das amostras dobradas, o ângulo de 110° representa o menor e o de 95° o maior dobramento. Portanto, nas amostras dobradas sob o ângulo de 110° tem-se a menor deformação plástica, enquanto naquelas conformadas a 95° tem-se a maior deformação plástica.

As tensões residuais apresentadas na Tabela 4 fornecem diferentes valores de aumento percentual médio para cada ângulo de dobramento. Estas médias constam na Tabela 5.

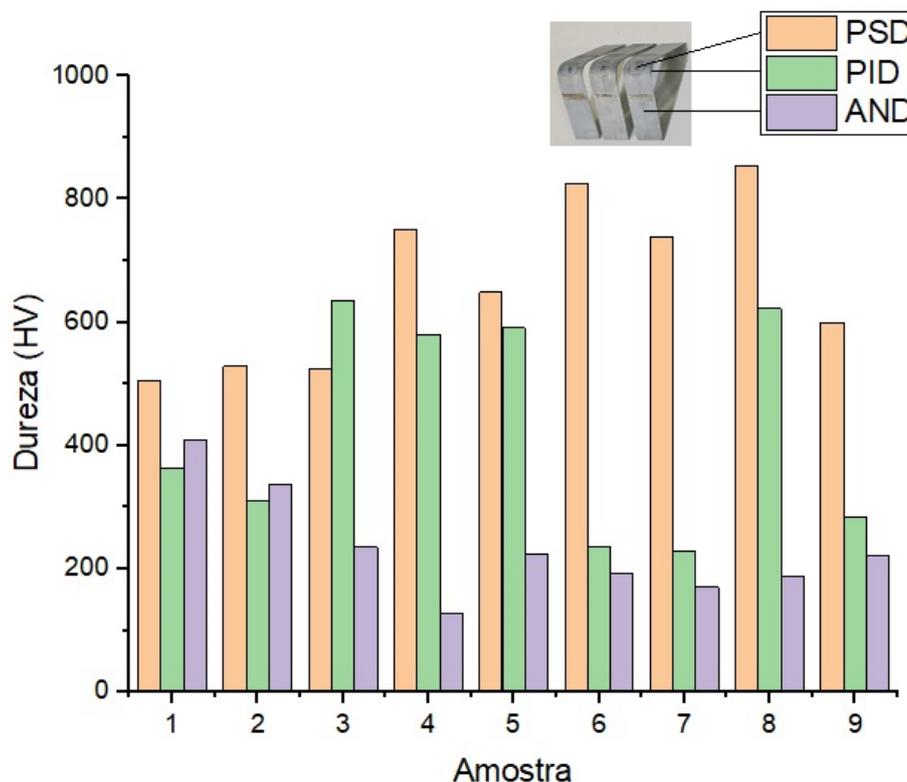
Tabela 5 – Aumento percentual médio das tensões residuais para cada ângulo de dobramento das amostras.

| Ângulo de dobramento | Aumento percentual médio (%) |
|----------------------|------------------------------|
| 95° | 232 |
| 105° | 212 |
| 110° | 200 |

Os resultados apresentados na Tabela 5, dos aumentos percentuais das tensões residuais, corroboram o fato de que a magnitude das tensões residuais cresce com o aumento da deformação plástica.

Na Figura 7 está representada graficamente a variação da dureza Vickers para as três regiões medidas.

Figura 7 – Variação da dureza Vickers função do ponto de medição em cada amostra.



Analisando a Figura 7, é possível destacar que a dureza teve seus valores médios mais elevados na região da conformação por dobramento, em ambos os

lados, superior e inferior, por ser a região submetida às deformações plásticas do processo e, por isso, sofreram encruamento, que resultou no aumento da dureza do material. Enquanto estas duas partes tiveram médias de 664 HV e 428 HV respectivamente, a área não dobrada teve média de 234 HV. O aumento percentual médio da área não dobrada para a parte inferior da região de dobramento foi de 83% enquanto esta mesma comparação quando feita em relação à região superior do dobramento foi de 184%. Este resultado vai de encontro a aquele encontrado por Thiago *et al*, 2011⁽⁸⁾, onde estudaram aços para tubulação e ao contrário deste estudo a região de maior deformação foi amolecida pela deformação plástica. No presente trabalho, o aumento da dureza na área dobrada se dá com maior intensidade no lado de tração da chapa quando comparada ao lado de compressão, o que se deve à maior deformação plástica na região de tração.

CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve por objetivo o estudo das tensões residuais geradas no dobramento do aço CP1000, permite as seguintes conclusões:

- 1) Quanto maiores forem as deformações plásticas na região conformada, maiores serão as magnitudes das tensões residuais.
- 2) Quando comparadas as durezas das regiões dobradas e não dobradas, a dureza da região conformada foi significativamente superior, devido às deformações plásticas mais intensas, que causaram encruamento do material.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - (CAPES) - Código 001. Os autores agradecem também ao CNPq e à FAPERJ, pelo suporte financeiro que permitiu a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

1. CHO W.; JEONG B. S.; JEONG K. J.; LEE S. H.; KIM H.; LEE J.; KIM S.; HAN H. N., New approach to hole-expansion ratio in complex phase and martensitic steels: Understanding the role of punching damage. *Journal of Materials Research and Technology* 2023; 26: 837–849. doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.253
2. Catálogo USIMINAS, acessado em 24/05/2024 <https://usiminas.com/wp-content/uploads/2024/04/CatalogoEletro galvanizados EG.pdf>.
3. PRAMANICK A. K.; DAS H.; LEE J. W.; JUNG Y.; CHO H. H.; HONG S. T.; SHOME M.; PRAMANICK A.K., Texture analysis and joint performance of laser-welded similar and dissimilar dual-phase and complex-phase ultra-high-strength steels. *Materials Characterization* 174 (2021) 111035. doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111035
4. WAN Y.; JIANG W.; LI H., Cold bending effect on residual stress, microstructure and mechanical properties of Type 316L stainless steel welded joint. *Engineering Failure Analysis* 117 (2020) 104825. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104825>
5. LIU B.; VILLAVICENCIO R.; C.; SOARES C. G., Experimental and numerical analysis of residual stresses and strains induced during cold bending of thick steel plates. *Marine Structures* 57 (2018) 121–132. dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.10.005
6. WANG Z. AND GONG B., *Residual Stress in the Forming of Materials*. University of Toronto, Canada, 2002.
7. MACHERAUCH E.; KLOOS K.H., “Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology”, Ed. By E. Macherauch, V. Hauk, DGM Verlag, 1987.
8. THIAGO V.L., CINDRA FONSECA M.P, REBELLO J.M.A., CHUVAS T.C., “Avaliação de integridade de dutos com danos de deformação plástica causados por sobrecarga do solo”. Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica- CIBEM 10, Porto, Portugal, 2011.

BEHAVIOR OF RESIDUAL STRESSES GENERATED IN THE BENDING OF CP1000 STEEL USED IN THE AUTOMOBILE INDUSTRY

ABSTRACT

Sheet metal forming is widely used in the production of various components in the automotive industry. Cold bending involves loading the metal into the plastic strip, followed by elastic unloading, affecting the mechanical properties of the material. These large induced inelastic deformations result in residual stresses, which can potentially affect the structural integrity and service life of the structure. In this work, the residual stresses generated in cold bending operations in Complex Phase CP1000 steel sheets (1000 MPa yield stress) were analyzed. Bending was carried out at different angles and residual stresses were measured after each bending by X-ray diffraction, using the $\sin^2\psi$ method. The residual stresses were almost uniform and all compressive for the different bending angles and can positively impact the service life of the manufactured components. Hardness analysis using ultrasonic contact impedance (UCI) complements the present study.

Keywords: residual stresses, bending, CP1000 steel, X-ray diffraction.