

## AVALIAÇÃO DO RETORNO ELÁSTICO NO DOBRAMENTO DE CHAPAS DE AÇO TRIP 800 E AÇO BAIXO CARBONO

Roberta Silveira Santiago, atreborsantiago83@gmail.com<sup>1</sup>  
Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Daiane Cristine Santana Resende, daianecsresende@gmail.com<sup>1</sup>  
Aline Silva Magalhães, alinemagalhaes@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Felipe Fonseca Weked, lipe612@yahoo.com.br<sup>2</sup>  
Benedito Carneiro de Andrade Junior benedito.andrade40@gmail.com<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG

**Resumo:** O dobramento é uma das mais importantes operações de conformação de chapas, aparecendo de forma isolada ou como uma das etapas de deformação plástica em outros processos. Essa operação envolve a deformação do material em torno de um eixo, mudando sua forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes. Algumas irregularidades podem ser observadas no dobramento de chapas, como o desenvolvimento de trincas e a ocorrência de retorno elástico, também conhecido como efeito mola. Esse último consiste na alteração dimensional do componente quando os esforços aplicados à ferramenta de conformação são aliviados. Nesse caso, os fatores mais importantes são as características do material, como o limite de escoamento e o módulo de elasticidade, e os parâmetros geométricos do processo, como o ângulo e o raio de dobramento. O objetivo do presente trabalho foi comparar a ocorrência da recuperação elástica durante uma operação de dobramento em matriz em V de dois aços empregados em elementos estruturais na indústria automotiva, o aço TRIP 800, com estrutura multifásica, e um aço de baixo teor de carbono, com matriz predominantemente ferrítica. Foram avaliadas a influência da aplicação de pré-deformação por tração e ainda as seguintes características do processo: ângulo de dobramento e raio do cutelo. Os resultados mostraram que o retorno elástico, para todas as situações investigadas, foi mais elevado para o aço TRIP 800. Foi observada ainda a elevação, em geral, do efeito mola com o ângulo e com o raio de dobramento.

**Palavras-chave:** Dobramento, RetornoElástico, Aço TRIP 800, Aço Baixo Carbono.

### 1. INTRODUÇÃO

O fenômeno conhecido como retorno elástico, recuperação elástica ou ainda, efeito mola, consiste na recuperação de parte da deformação sofrida após a remoção das cargas impostas durante um processo de conformação mecânica. Tal fato possibilita a ocorrência de desvios dimensionais dos componentes, exigindo retrabalho e, muitas vezes, inutilizando a peça fabricada.

O retorno elástico é influenciado por diversos fatores. Considerando os aspectos relacionados à operação, podem ser destacados o atrito, as condições de lubrificação, as características geométricas do processo de conformação, a força aplicada e o período de tempo na qual essa carga está atuando (Dieter, 1986; Tekaslan et al., 2006; Inamdar et al., 2002). Em termos das características do material a ser deformado, uma série de parâmetros irão influenciar a ocorrência e a magnitude do retorno elástico, como: limite de escoamento, módulo de elasticidade, ductilidade, expoente de encruamento. (determinado por meio da aproximação da curva tensão-deformação obtida em um ensaio de tração para a equação de Hollomon) e anisotropia, dentre outros (Dieter, 1986; Inamdar et al., 2002; Tekiner, 2004; Abdullah et al., 2012).

Em geral, componentes fabricados em aços avançados de alta resistência (advanced high strength steels) AHSS apresentam maior retorno elástico do que aqueles fabricados em aços carbono (Carden et al., 2002; Lim et al., 2012). Nos AHSS esse fenômeno é um grande problema, uma vez que esses materiais apresentam resistência mecânica mais elevada e o efeito mola está relacionado a esta propriedade. Além disso, a elevação da utilização desses aços tem visado promover a redução de peso dos componentes, implicando no emprego de chapas de espessuras cada vez menores e estas, por consequência, apresentam maior dificuldade em manter a geometria esperada após as operações de conformação. Tal fato resulta em variações dimensionais e deficiências durante a montagem dos componentes, originando problemas de qualidade nos produtos.

Nesse contexto, no presente trabalho a ocorrência da recuperação elástica durante uma operação de dobramento em matriz em V de dois aços empregados em elementos estruturais na indústria automotiva, o aço TRIP 800, um aço avançado de alta resistência com estrutura multifásica, e um aço de baixo teor de carbono, com matriz

predominantemente ferrítica, foi analisada. Foram observadas a influência da aplicação de pré-deformação por tração e ainda as seguintes características do processo: ângulo de dobramento e raio do cutelo.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais e Métodos

Neste trabalho foram estudados dois materiais: o aço TRIP 800 e um aço de baixo teor de carbono microligado (BC). Ambos os aços foram adquiridos no formato de chapas com 525 mm de comprimento, 625 mm de largura e 1,5 mm de espessura. As composições químicas, obtidas por meio de ensaios de espectrometria de emissão óptica realizados em um equipamento Shimadzu modelo Foundry Master Xpert, são apresentadas na Tab. (1) e Tab. (2).

**Tabela 1. Composição química do aço baixo carbono (% em peso).**

|           |       |       |       |       |         |       |         |         |
|-----------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|---------|---------|
| elemento  | C     | Mn    | Si    | Ni    | S       | Cr    | Al      | P       |
| % em peso | 0,120 | 0,643 | 0,030 | 0,003 | 0,006   | 0,018 | 0,033   | 0,016   |
| elemento  | Cu    | Nb    | Ti    | V     | W       | Pb    | Sb      | Fe      |
| % em peso | 0,010 | 0,030 | 0,002 | 0,001 | < 0,010 | 0,004 | < 0,003 | balanço |

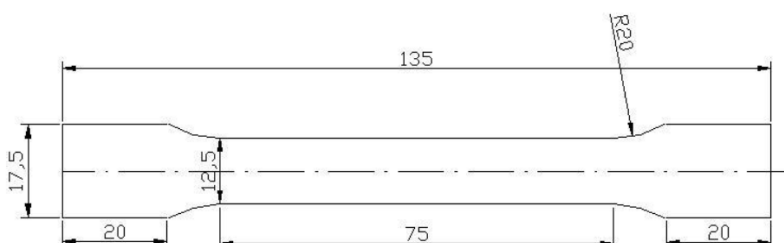
**Tabela 2. Composição química do aço TRIP 800 (% em peso).**

|           |       |       |       |       |       |       |       |         |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| elemento  | C     | Mn    | Si    | Ni    | S     | Cr    | Al    | Mo      |
| % em peso | 0,229 | 1,880 | 1,560 | 0,014 | 0,013 | 0,029 | 0,097 | 0,015   |
| elemento  | Cu    | Nb    | Ti    | V     | W     | Pb    | Sn    | Fe      |
| % em peso | 0,026 | 0,009 | 0,007 | 0,004 | 0,019 | 0,014 | 0,004 | balanço |

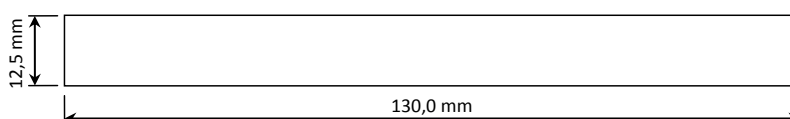
### 2.2. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados para a determinação das propriedades resistência mecânica e ductilidade, por meio dos limites de escoamento e de resistência e alongamento uniforme. Foram conduzidos dois ensaios para cada material investigado. Em adição à obtenção das propriedades mecânicas, os testes de tração foram empregados para realização de pré-deformação nas amostras a serem submetidas ao dobramento em distintas condições. Nesse caso, três valores de pré-deformação convencional foram empregados: 5%, 10% e 15%, cuja escolha se deu em função do alongamento uniforme máximo total que o baixo carbono exibiu.

Os testes foram realizados a uma velocidade de 4,5 mm / min, em uma máquina universal de marca Instron modelo 5982 com sistema de controle e aquisição de dados Blue Hill e extensômetro eletrônico de marca Instron modelo 2630-100. Nessa etapa, dois tipos de corpos de prova foram empregados, um para a determinação das propriedades, conforme Fig. (1), e outro para posteriormente (após o corte) ensaios de dobramento, conforme Fig. (2), a partir do qual duas amostras de dobramento foram obtidas. Os corpos de prova de tração foram confeccionados por meio de eletroerosão a fio em um equipamento da marca Charmilles modelo Robofil 240.



**Figura 1. Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração (dimensões em mm).  
Fonte: ASTM E8 (2009).**



**Figura 2. Corpo de prova utilizado nos ensaios de tração para posterior dobramento.**

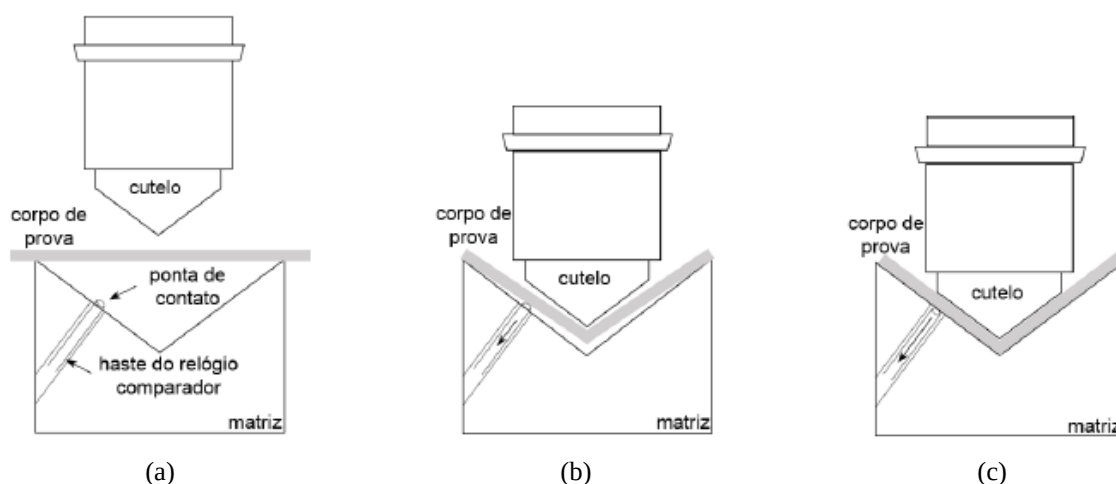
### 2.3. Dobramento

As operações de dobramento foram realizadas em dois corpos de prova para cada condição estudada, empregando uma matriz em V com dois ângulos distintos: 30° e 90°. Essas operações foram conduzidas nos materiais no estado inicial e após a tração nas três condições de pré-deformação. Os corpos de prova para dobramento confeccionados para os dois materiais no estado inicial exibiram 45 mm de comprimento, 12,5 mm de largura e 1,5 mm de espessura. As amostras pré-deformadas por tração submetidas ao dobramento posterior exibiram antes desses ensaios uma pequena alteração na largura e na espessura em função da deformação prévia. Nesse caso, para o aço BC, foram consideradas larguras médias de 12,28 mm, 12,02 mm e 11,75 mm e espessuras médias de 1,50 mm, 1,46 mm e 1,43 mm após pré-deformação por tração de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Para as amostras de aço TRIP 800, larguras médias de 12,32 mm, 12,00 mm e 11,76 mm e espessuras médias de 1,49 mm, 1,49 mm e 1,47 mm após pré-deformação por tração de 5%, 10% e 15%, respectivamente, foram obtidas.

Para o caso das amostras submetidas apenas aos ensaios de dobramento, a preparação dos corpos de prova foi realizada empregando um centro de usinagem da marca Romi modelo Discovery 560 e comando Fanuc 21i com refrigeração. Especificamente para as amostras previamente tracionadas, a preparação dos corpos de prova para o dobramento consistiu no corte do comprimento, conduzido em uma cortadeira metalográfica da marca AROTEC modelo COR 80/2 com sistema de refrigeração, de forma a minimizar eventual influência do corte nos resultados.

Para os corpos de prova no estado inicial foram utilizados raios de cutelo de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm e 10 mm. Já para os corpos de prova previamente tracionados foram utilizados raios de cutelo de 2 mm, 6 mm e 10 mm. Os testes foram realizados em uma prensa manual Dake modelo 1-3/4, com capacidade de 3 toneladas, empregando os dispositivos desenvolvidos por Sales (2013) e Magalhães (2015).

Uma representação esquemática do procedimento experimental dos ensaios de dobramento é mostrada na Fig. (3). Nesse caso, um relógio comparador analógico marca Mitutoyo modelo 2046F foi fixado à matriz de dobramento, cujo objetivo foi controlar a posição do corpo de prova em relação a essa matriz. Dessa forma, os ensaios de dobramento realizados no presente trabalho não foram conduzidos considerando um valor de força único, mas sim o posicionamento da amostra durante a operação, ou seja, quando essa estivesse totalmente em contato com a matriz, a operação era considerada completa. Inicialmente, a amostra era apoiada sobre a matriz Fig. (3a). De acordo com o deslocamento do cutelo em direção à matriz, e a consequente deformação progressiva do corpo de prova, este entrava em contato com a ponta do dispositivo de medição, causando o deslocamento da haste do relógio comparador, conforme a Fig. (3b). O deslocamento do cutelo era cessado no momento em que o corpo de prova entrava totalmente em contato com a matriz, de maneira o indicador do relógio comparador marcava a posição final estabelecida, Fig. (3c). Após atingir a posição estipulada no leitor do relógio comparador, um tempo de 10 s era aguardado e, então, o contato do corpo de prova com o cutelo era interrompido e o ensaio finalizado.



**Figura 3. Representação do procedimento dos ensaios de dobramento: (a) posição inicial, (b) posição intermediária e (c) posição final.**

**Fonte: Magalhães (2015).**

Após o dobramento, o ângulo final de cada corpo de prova foi medido utilizando um goniômetro Mitutoyo, a fim de se determinar o retorno elástico apresentado por ambos os aços avaliados. Nesse caso, o ângulo de retorno elástico foi considerado como a diferença entre o ângulo da matriz (30° ou 90°) e o ângulo efetivamente obtido após a operação de dobramento. Por fim, a superfície externa de todos os corpos de prova foi avaliada visualmente e com o auxílio de uma lupa Metrimplex considerando todas as condições ensaiadas, inclusive suas respectivas réplicas, a fim de se observar a ocorrência de descontinuidades oriundas do processo de dobramento, como trincas.

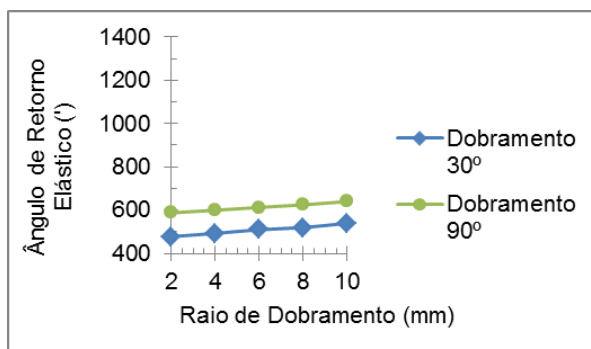
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são mostrados os resultados médios de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento uniforme. Quando comparado ao aço com baixo teor de carbono, conforme esperado, observa-se que o aço TRIP 800 apresenta propriedades mecânicas consideravelmente superiores, com resistência mecânica mais elevada e maior ductilidade, nesse caso representada pelo alongamento uniforme, quase o dobro do valor médio verificado.

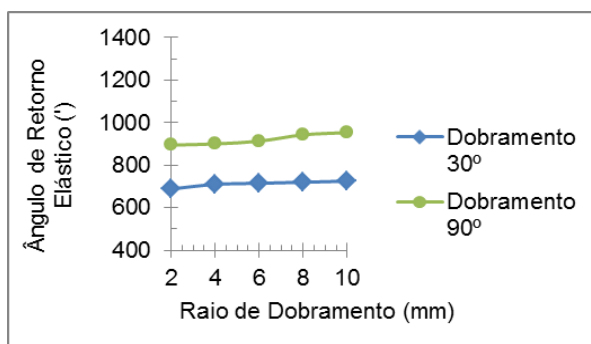
**Tabela 3. Propriedades mecânicas dos aços BC e TRIP 800.**

| aço      | limite de escoamento (MPa) | limite de resistência (MPa) | alongamento uniforme (%) |
|----------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| BC       | $365 \pm 2$                | $471 \pm 1$                 | $18 \pm 2$               |
| TRIP 800 | $511 \pm 1$                | $814 \pm 14$                | $34 \pm 1$               |

Na Figura (4) e na Figura (5) são apresentados os valores obtidos para o fenômeno do retorno elástico em função dos raios do cutelo para cada ângulo avaliado após operações simples de dobramento para os dois aços investigados. Para o aço baixo carbono, para todos os ângulos de dobramento, observam-se valores mais elevados de retorno elástico para raios de dobramento também mais elevados. De forma análoga, Tekaslan et al. (2006) e Wang et al. (2011) verificaram ao estudar o retorno elástico em um aço carbono com manganês e um aço avançado de alta resistência, respectivamente, que este fenômeno varia de forma proporcional ao raio de dobramento. Verifica-se também que, o aumento do ângulo de 30° para 90° promove a elevação do retorno elástico.



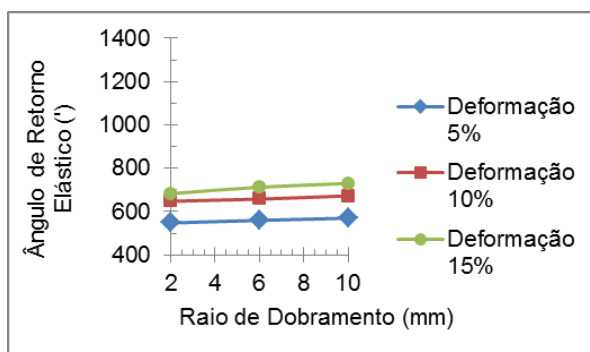
**Figura 4. Ângulos de retorno elástico do aço baixo carbono no dobramento em matriz em V.**



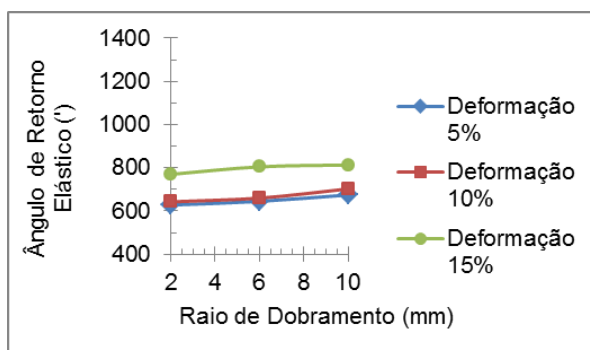
**Figura 5. Ângulos de retorno elástico do aço TRIP 800 no dobramento em matriz em V.**

Resultados semelhantes ao do aço baixo carbono são observados para o aço TRIP 800. No entanto, para todas as condições, observa-se que o retorno elástico é superior e que o efeito do ângulo de dobramento ao passar de 30° para 90° é mais acentuado (no aço baixo carbono esse aumento chega a atingir 23% e no aço TRIP 800 31%). Kim e Lee (2011), ao investigarem os efeitos da presença de austenita retida em aço TRIP e do ângulo em relação à direção de laminação, em operações de dobramento com matriz fechada em V (ângulo de dobramento de 90°), similarmente ao presente trabalho, observaram que a elevação do raio do cutelo levou ao aumento do efeito mola. Lim et al. (2012) verificou, por meio da técnica de elementos finitos, também em uma operação de dobramento, que o retorno elástico do aço TRIP (nesse caso aço TRIP 780) foi superior ao retorno elástico apresentado por um aço de baixo teor de carbono.

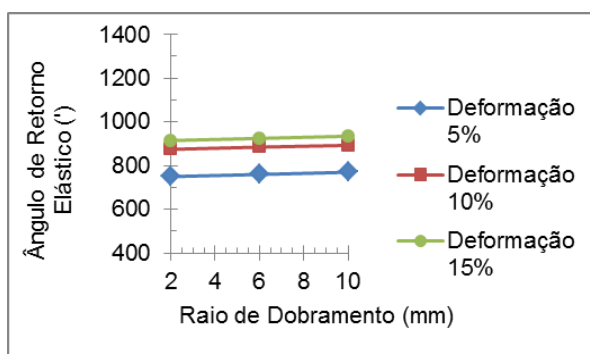
Na Figura (6) a Figura (9) são apresentados os valores obtidos para o retorno elástico em função dos raios de dobramento para cada ângulo avaliado após operações de tração seguida de dobramento. Considerando inicialmente o aço baixo carbono, conforme Fig. (6) e Fig. (7), verifica-se o aumento do retorno elástico com o aumento do raio de dobramento. Esse comportamento é semelhante àquele observado para o material apenas dobrado. Em relação ao ângulo de dobramento, observa-se uma tendência de aumento da recuperação elástica de 30° para 90°. Novamente esse comportamento é análogo ao aço não tracionado. Considerando o efeito da pré-deformação, observa-se o aumento da recuperação elástica em comparação ao aço somente dobrado. Esse fenômeno se torna mais evidente à medida que se aumenta o valor da pré-deformação. A elevação da pré-deformação implicaria na ocorrência de encruamento de forma mais acentuada no material, que levaria ao aumento do limite tensão de escoamento.



**Figura 6. Ângulos de retorno elástico no dobramento com ângulo de 30° do aço baixo carbono após tração.**



**Figura 7. Ângulos de retorno elástico no dobramento com ângulo de 90° do aço baixo carbono após tração.**

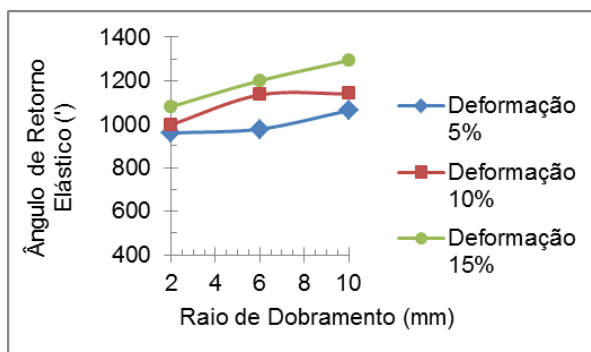


**Figura 8. Ângulos de retorno elástico no dobramento com ângulo de 30° do aço TRIP 800 após tração.**

A tensão limite de escoamento, de acordo com a literatura, é considerada uma das características de maior influência no retorno elástico (Tekiner, 2004; Inamdar et al., 2002; Abadullah et al., 2012) e quanto maior o seu valor, maior será o retorno elástico apresentado pelo material (Bresciani Filho, 2011; Tekiner, 2004; Toros et al., 2011; Dieter, 1986).

Por meio da Figura (8) e Figura (9), verifica-se que a análise para o aço TRIP 800 é semelhante à avaliação do aço baixo carbono, entretanto, os valores encontrados são maiores, uma vez que o TRIP 800 apresenta maior limite de escoamento e ainda maior capacidade de encruamento. Considerando o efeito do raio do cutelo da operação, para o

ângulo de 90°, essa influência parece ser mais acentuada. No aço TRIP 800, o aumento do retorno elástico ao se passar do ângulo de 30° para 90° chegou a atingir 38%, 28% e 38%, para pré-deformações de 5%, 10% e 15%, respectivamente. No aço BC esse gradiente foi de 18%, 5% e 13%, para pré-deformações de 5%, 10% e 15%, respectivamente.



**Figura 9. Ângulos de retorno elástico no dobramento com ângulo de 90° do aço TRIP 800 após tração.**

## 4. CONCLUSÕES

Por meio desse estudo verificou-se que o retorno elástico no dobramento em matriz em V presente nos aços TRIP 800 e baixo carbono foi mais elevado com o aumento do ângulo de dobramento, do raio do cutelo e do valor da pré-deformação na tração.

Para o aço TRIP 800, a ocorrência de retorno elástico dobramento em matriz em V foi mais acentuada que no aço baixo carbono em todas as condições de operação e de estado inicial do material avaliadas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG pelo apoio na realização do trabalho, à FINEP pelo apoio financeiro por meio da compra de equipamentos, à CAPES pela concessão de Bolsa de Mestrado e à Secretaria de Política Estudantil do CEFET-MG pela concessão da Bolsa de Complementação Educacional.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abdullah, A. B.; Sapuan, S. M.; Samad, Z.; Aziz, N. A., 2009, "A Comprehensive Review of Experimental Approaches used in the Measurement of Springback", *Advances in Natural and Applied Sciences*, v. 6, p. 195-205.
- Bresciani Filho, Ettore, 2011, "Conformação Plástica dos Metais", 6. ed., São Paulo: EPUSP, 254p.
- Carden, W. D.; Geng, L. M.; Matlock, D. K.; Wagoner, R. H., 2002, "Measurement of Springback", *Int. J. Mech. Sci.*, v. 44, p. 79-101.
- Dieter, G. E., 1986, "Mechanical Metallurgy", 3 ed., Columbus: McGraw-Hill, 800p.
- Inamdar, M.V.; Date, P.P.; Sabnis, S.V., 2002, "On the Effects of Geometric Parameters on Springback in Sheets of Five Materials Subjected to Air Vee Bending", *Journal of materials processing technology*, v. 123, p.459-463.
- Kim, S.; Lee, Y., 2011, "Effect of Retained Austenite Phase on Springback of Cold-rolled TRIP Steel Sheets", *Materials Science & Engineering A*, v. 530, p. 218-224.
- Lim, H.; Sung, J. H.; Kim, J. H.; Wagoner, R., 2012, "Time-dependent Springback of Advanced High Strength Steels", *International Journal of Plasticity*, v. 29, p. 42-59.
- Magalhães, A. S., 2015, "Efeito da Temperatura Intercrítica na Microestrutura e no Comportamento de Aços Bifásicos", Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Sales, V., 2013, "Análise do Comportamento dos Aços Inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em Diferentes Condições de Dobramento, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Tekaslan, O.; Seker, U.; Ozdemir, A., 2006. "Determining Springback Amount of Steel Metal Has 0,5 mm thickness in Bending Dies". *Materials and Design*, v. 27, p. 251-258.

- Tekiner, Z., 2004, “An Experimental Study on the Examination of Springback of Sheet Metals with Several Thicknesses and Properties in Bending Dies”, Journal of Materials Processing Technology, v. 145, p. 109-117.
- Toros, S.; Alkan, M.; Ece, R. E.; Ozturk, F., 2011, “Effect of Pre-straining on the Springback Behavior of the AA5754-0 alloy”, Materials and Technology, v. 45, p. 613-618.
- Wang, W.; He, C.; Zhao, Z.; Wei, X., 2011, “The Limit Drawing Ratio and Formability Prediction of Advanced High Strength Dual-phase Steels”, Materials and Design, v. 32, p. 3320-3327.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### EVALUATION OF THE ELASTIC RECOVERY IN BENDING OF TRIP 800 STEEL AND LOW CARBON STEEL

Roberta Silveira Santiago, atreborsantiago83@gmail.com<sup>1</sup>  
Elaine Carballo Siqueira Corrêa, elaine@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Wellington Lopes, wellingtonlopes@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Daiane Cristine Santana Resende, daianecsresende@gmail.com<sup>1</sup>  
Aline Silva Magalhães, alinemagalhaes@deii.cefetmg.br<sup>1</sup>  
Felipe Fonseca Weked, lipe612@yahoo.com.br<sup>2</sup>  
Benedito Carneiro de Andrade Junior benedito.andrade40@gmail.com<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG

**Abstract:** Bending is one of the most important operations of sheet forming, isolated or as one of the stages of plastic deformation processes. This operation involves deformation of the material around an axis, changing its shape from a flat surface to two competing surfaces. Some irregularities can be observed in sheet forming, such as the development of cracks and the occurrence of elastic recovery, also known as springback. The latter consists of the dimensional change of the component when the stresses applied to the forming tool are relieved. In this case, the most important factors are the characteristics of the material, such as the yield strength and the Young's modulus, and the geometric parameters of the process, such as angle and bending radius. The aim of the present work was to compare the occurrence of the elastic recovery in V bending operations of two steels used in structural elements in the automotive industry, TRIP 800 steel with multiphase structure and a low carbon steel, with ferritic matrix. The influence of pre-strain in tension was also evaluated, as well as the following characteristics of the process: bending angle and radius. The results showed that the elastic recovery angle, for all the investigated situations, was higher for TRIP 800 steel. It was also observed the increase, in general, of the springback effect with the angle and the bending radius.

**Key-words:** Bending, Elastic recovery, TRIP 800 steel, Low carbon steel.