

EFEITO DA MICROESTRUTURA NA RECUPERAÇÃO ELÁSTICA DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 NO DOBRAMENTO¹

Valmir Sales²
 Roberto Wagner de Oliveira Elias³
 Wellington Lopes²
 Maria Teresa Paulino Aguiar⁴
 Paulo Roberto Cetlin⁵
 Elaine Carballo Siqueira Corrêa²

Resumo

Um dos maiores defeitos geométricos observados nos processos de conformação de chapas é a recuperação elástica do material, também conhecida como efeito mola. O fenômeno é caracterizado pela variação dimensional da peça depois que a pressão da ferramenta de conformação é liberada. No caso específico do dobramento, podem ser mencionados como fatores de influência no retorno elástico as características do material, como limite de escoamento e o módulo de elasticidade, e os aspectos geométricos da peça e do processo, como a espessura e o raio da operação, dentre outros. Dentro deste contexto, o objetivo do trabalho foi analisar a ocorrência da recuperação elástica em chapas de aço inoxidável AISI 304 durante uma operação de dobramento com matriz em V. Em termos das características do metal, foram empregadas amostras no estado inicial e submetidas a dois tratamentos térmicos. Em termos dos parâmetros do processo, foram avaliados três ângulos e cinco raios de dobramento. Os resultados evidenciaram os efeitos das condições de operação e da microestrutura na recuperação elástica.

Palavras-chave: Dobramento; Retorno elástico; Aço AISI 304.

EFFECT OF MICROSTRUCTURE ON THE ELASTIC RECOVERY OF AISI 304 STAINLESS STEEL SHEETS IN BENDING

Abstract

One of the main geometric defects in sheet forming operations is the occurrence of elastic recovery in the materials, also known as springback. The phenomenon consists of dimensional and geometric changes of the workpiece after unloading. Considering sheet bending, the most important facts that affect elastic recovery are the material features, such as yield strength and Young's modulus, and the geometric parameters of the process, such as the die radius and the sheet thickness. The aim of this work is the analysis of the occurrence of elastic recovery in AISI 304 stainless steel sheets in V bending operations. In terms of the material characteristics, the evaluation was carried out in the as received metal and in heat treated specimens. In terms of process parameters, three bending angles and five bending radius were analyzed. The results showed the effects of the process conditions and the material microstructure in the elastic recovery phenomenon.

Key words: Bending; Springback; AISI 304 steel.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Dr., Professor, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil.

³ Aluno, Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET, MG, Brasil.

⁴ Dra., Professora, Departamento de Engenharia de Materiais e da Construção, UFMG, MG, Brasil.

⁵ Dr., Professor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores defeitos geométricos observados nos processos de conformação de chapas é a recuperação elástica do material, também conhecida como retorno elástico ou efeito mola.⁽¹⁾ Esse fenômeno é caracterizado pela variação dimensional da peça deformada depois que os esforços aplicados à ferramenta de conformação são aliviados,^(2,3) podendo introduzir ainda distorções superficiais, ambas as situações levando a alterações na forma do produto desejado e ainda a problemas de ajuste de um determinado componente aos demais em um sistema.⁽⁴⁾

Para o caso específico da operação de dobramento, nota-se que, após a retirada dos esforços, o raio final e o ângulo final são respectivamente maior e menor do que os originais.⁽⁵⁾ Essa alteração dimensional está relacionada à energia elástica armazenada no material durante o processo, sendo associada aos estados de tensão e de deformação desenvolvidos na operação de estampagem.

Em termos das características do material, uma série de parâmetros irão influenciar a ocorrência e a magnitude do retorno elástico, como o limite de escoamento, o módulo de elasticidade, a ductilidade e o expoente de encruamento do metal, esse último associado à equação de Hollomon.^(2,5-8) Neste caso, a princípio, quanto maior forem o limite de escoamento e a ductilidade e menor o módulo de elasticidade, mais acentuado será o efeito mola observado. Podem ser destacados ainda no estudo do fenômeno os seguintes aspectos associados ao material: anisotropia, magnitude de encruamento prévio, ou seja, da deformação conduzida anteriormente, e efeito Bauschinger.

Considerando as características geométricas da chapa e do processo, a espessura da amostra, as dimensões da matriz e o raio de dobramento também irão afetar a recuperação elástica. Observa-se que o efeito mola se torna mais acentuado à medida que aumenta o raio utilizado na operação, que a relação entre o raio e a espessura é elevada, assim como a abertura entre as faces opostas da matriz.^(5,7)

Há trabalhos que sugerem ainda que a força aplicada no processo e o período ou tempo no qual a mesma está atuando influenciam os resultados finais.⁽⁵⁾ Por outro lado, a velocidade da operação ou ensaio não seria um fator importante, contanto que o processo não seja realizado em níveis considerados como dinâmicos.⁽⁹⁾

Por fim, ainda que seja um fenômeno conhecido e amplamente investigado, em geral, a ocorrência de efeito mola nos materiais metálicos pode ser apenas controlada ou minimizada, uma vez que sua eliminação completa é considerada difícil.⁽¹⁾ Em termos práticos, o controle usual da recuperação elástica se dá através de modificações na magnitude dos esforços aplicados durante a operação, considerando tanto forças compressivas como eventuais forças de estiramento na chapa, e de alterações nas características geométricas do processo, atuando como uma espécie de compensação.⁽¹⁰⁾ Neste caso, costuma-se trabalhar com um raio de curvatura menor do que aquele desejado, de forma que, após o alívio dos esforços, o retorno elástico faz com que o raio final seja similar ao planejado, ou com um ângulo superior ao requerido.⁽²⁾

Dentro deste contexto, neste trabalho é analisada a ocorrência do fenômeno de retorno elástico em chapas de aço inoxidável AISI 304 durante uma operação de dobramento com matriz em V, considerando diferentes estados iniciais do material e condições de ensaio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

O material empregado no trabalho foi o aço inoxidável AISI 304, recebido na forma de chapas com 1,8 mm de espessura, cuja composição química (% em peso) é exibida na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em peso) do aço AISI 304 empregado

elemento	C	Cr	Ni	Mn	Si
% em peso	0,068	18,78	9,35	1,73	0,33

2.2 Corpos de Prova

Foram confeccionados dois tipos de corpos de prova para o trabalho, um para ser empregado nos ensaios de dobramento e outro para os testes de tração. O corpo de prova utilizado nos ensaios de dobramento consistiu em chapas com espessura de 1,8 mm, largura de 19 mm e comprimento de 49 mm. A confecção das peças foi conduzida através de duas operações: corte inicial em uma guilhotina e acerto final das dimensões através de retificação para evitar influência do acabamento nos resultados. O segundo tipo de corpo de prova, utilizado nos ensaios de tração, foi preparado de acordo com a Norma ASTM E8⁽¹¹⁾ também empregando um corte inicial das chapas com o uso de uma guilhotina e posterior confecção através de eletroerosão a fio. Neste caso, o diâmetro e o comprimento úteis das peças foram de 12,5 mm e 75 mm, respectivamente e a espessura utilizada foi a mesma da chapa, 1,8 mm.

Para cada situação, considerando os dois tipos de ensaio e todas as condições do material e de dobramento analisadas, três corpos de prova foram utilizados e uma média dos resultados de cada situação foi calculada.

2.2 Tratamentos Térmicos

Tratamentos térmicos foram realizados nos corpos de prova tanto de dobramento como de tração em um forno elétrico da marca *Magnus*. Duas condições de operação foram consideradas no trabalho, envolvendo um único valor de temperatura, 1.050°C, e dois tempos de encharque: 15 min e 60 min. Para todas as peças o resfriamento foi conduzido ao ar.

2.3 Caracterização Microestrutural e Mecânica

A caracterização microestrutural envolveu a análise do material no estado como recebido e após os dois tratamentos térmicos, através de microscopia óptica e difração de raios-X. O procedimento foi realizado para verificar a diferença entre as três condições investigadas no trabalho, de forma que a microscopia permitiu observar o efeito do tempo de encharque no tamanho dos grãos e a difração de raios-X possibilitou a avaliação da possível presença de martensita formada pelo processamento mecânico anterior (metal no estado como recebido) e se a mesma teria sido anulada com a realização dos tratamentos térmicos. Em relação ao procedimento metalográfico, a preparação das amostras consistiu no emprego da técnica convencional, com ataque químico conduzido com o reagente Água

Régia.⁽¹²⁾ As peças foram analisadas empregando um microscópio da marca *Fortel*. Já a difração de raios-X foi realizada em um difratômetro com alvo metálico de cobre da marca *Shimadzu*, com ângulo de varredura entre 30° a 100° e passo de 0,02s⁻¹. A caracterização mecânica consistiu em ensaios de tração conduzidos em uma máquina universal da marca *Instron* com sistema de controle e aquisição de dados *Blue Hill* e extensômetro eletrônico também da marca *Instron*. Neste caso, a velocidade de movimentação da garra superior da máquina em todos os testes foi de 4,5 mm/min. Através desses ensaios foram determinados os limites de escoamento, limites de resistência e alongamento % total do aço inoxidável AISI 304 nas situações estudadas no trabalho.

2.4 Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados em uma prensa hidráulica marca *Manley* com uma matriz em V. O trabalho envolveu a análise de quinze condições de operação, resultado do emprego de três ângulos e cinco raios de cutelo de dobramento. Dessa forma, os experimentos foram conduzidos considerando as seguintes características geométricas: largura da abertura da matriz de 20mm, ângulos de dobramento de 30°, 60° e 90°; e raios de cutelo de dobramento de 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8mm e 10mm. Em todos os testes, após o contato dos corpos de prova com a superfície interna das regiões em V da matriz, era aguardado um tempo de aproximadamente 5s antes do alívio dos esforços.

Os ângulos de dobramento finais de todos os corpos de prova, em todas as condições consideradas no trabalho, foram medidos empregando um goniômetro da marca *Helios*, sendo que o ângulo de retorno elástico foi calculado a partir da diferença entre o ângulo de dobramento desejado e o ângulo final obtido.

3 RESULTADOS

Nas Figuras 1 e 2 podem ser observadas as fotomicrografias e os difratogramas do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido e após os tratamentos térmicos.

As propriedades resistência mecânica, quantificada através do limite de escoamento e do limite de resistência, e ductilidade, avaliada através do alongamento % total, são exibidas na Tabela 1.

Na Figura 3 são apresentados os resultados relativos aos ângulos de retorno elástico (calculados pela diferença entre o ângulo de dobramento desejado e o ângulo final obtido) exibidos pelo aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido. Neste caso, foram consideradas as quinze condições geométricas de ensaio de dobramento analisadas no trabalho, organizados em função do raio do cutelo para cada ângulo inicial de operação. Nota-se que, em todas as situações, os resultados são associados a uma linha de tendência, cuja aproximação escolhida foi linear, servindo de referência para a análise apresentada a seguir. Na Figura 4 resultados similares são exibidos para o aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente considerando os dois tempos de encharque empregados.

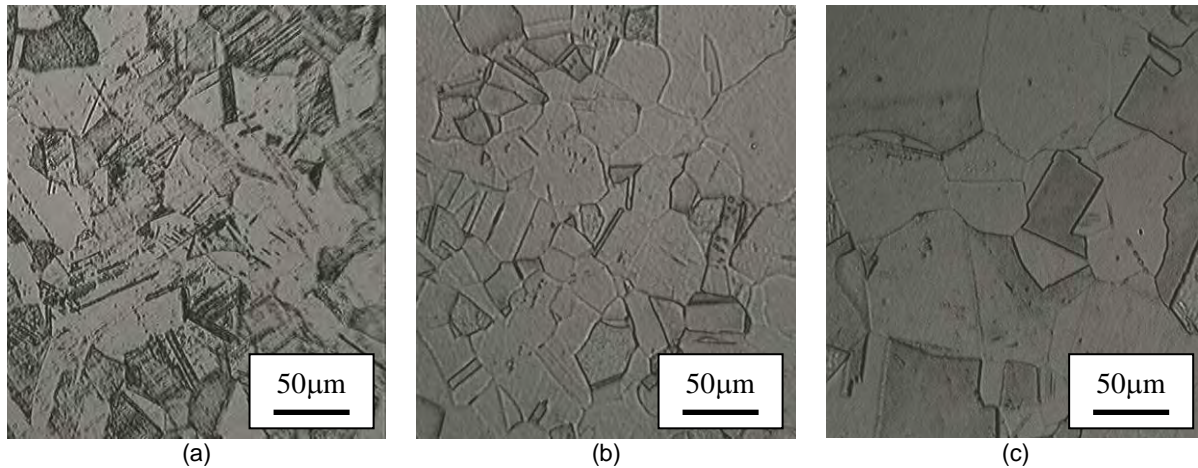


Figura 1. Micrografias do aço inoxidável AISI 304: (a) estado inicial, (b) tratado com temperatura de 1.050°C e tempo de encharque de 15min e (c) tratado com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60 min.

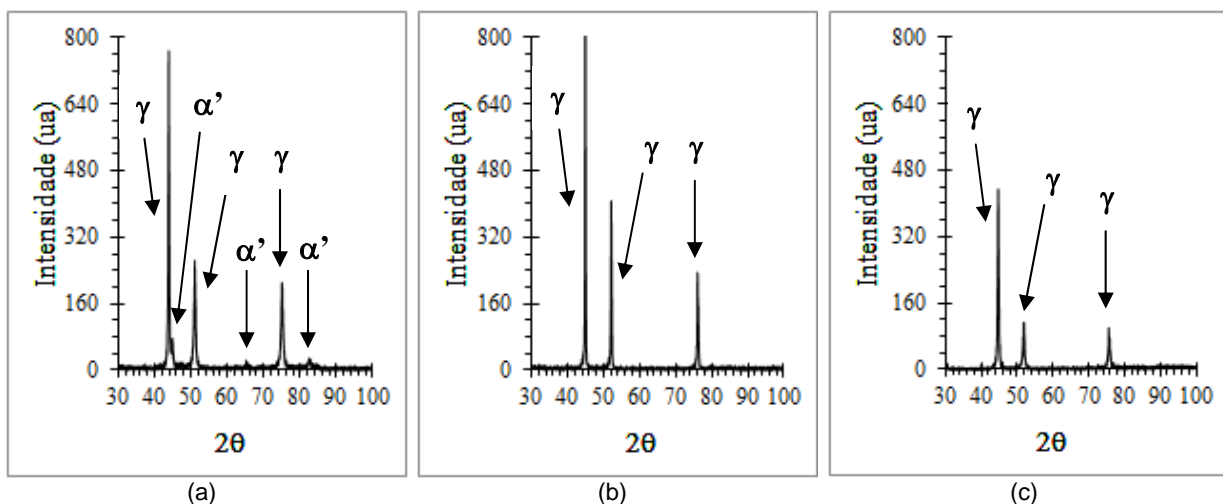


Figura 2. Difratogramas do aço inoxidável AISI 304: (a) estado inicial, (b) tratado com temperatura de 1.050°C e tempo de encharque de 15 min e (c) tratado com temperatura de 1050°C e tempo de encharque de 60min.

Tabela 1. Propriedades mecânicas determinadas no ensaio de tração do aço inoxidável AISI 304 como recebido e após os tratamentos térmicos

aço inoxidável AISI 304	limite de escoamento	limite de resistência	alongamento total
material recebido	272MPa	763MPa	90,5%
material tratado - 1050°C, 15min	250MPa	776MPa	96%
material tratado - 1050°C, 60min	215MPa	750MPa	95%

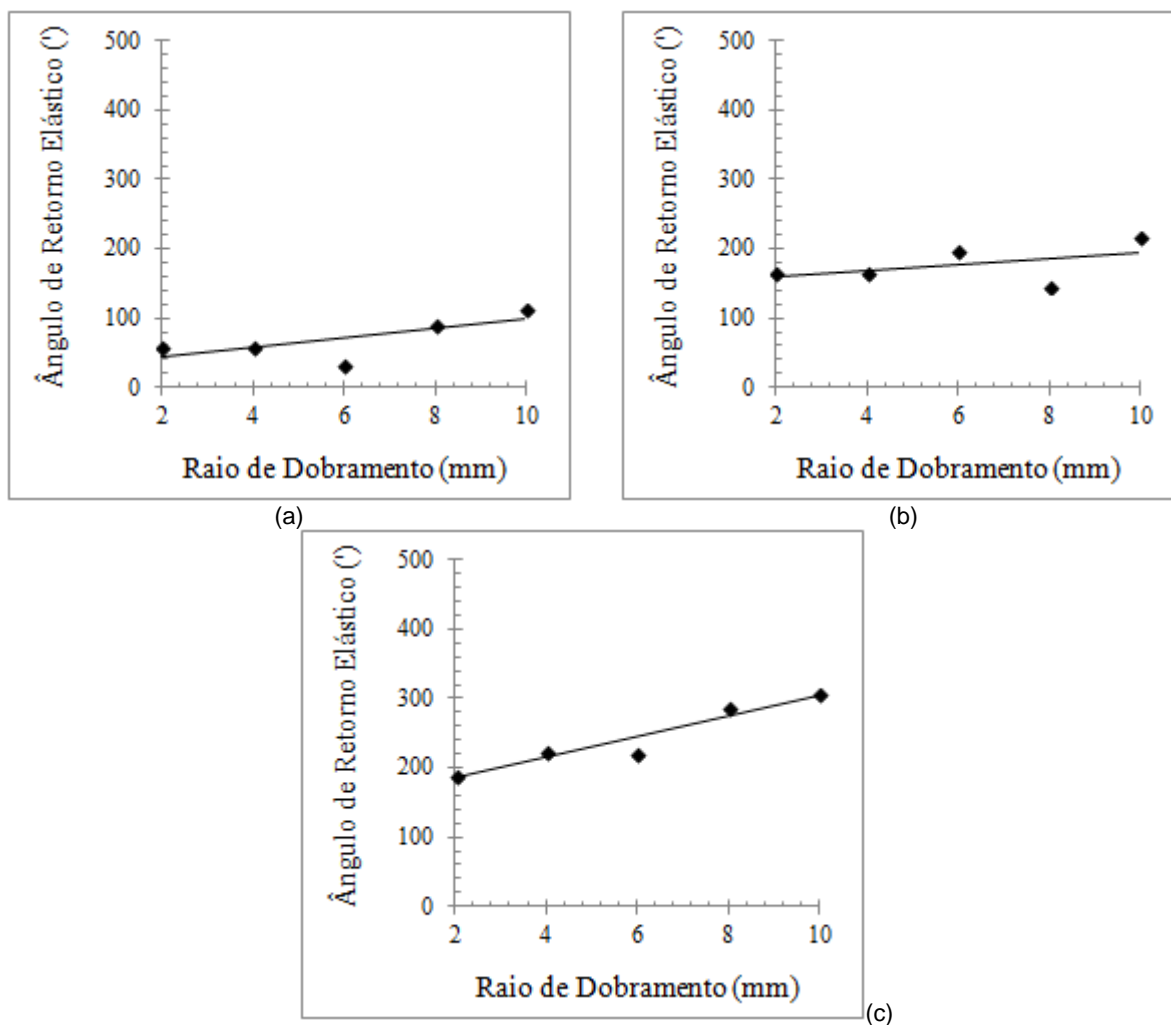


Figura 3. Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento do aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido: (a) dobramento a 30°, (b) dobramento a 60° e (c) dobramento a 90°.

4 DISCUSSÃO

Considerando inicialmente a caracterização microestrutural do aço inoxidável AISI 304, nota-se, para o material no estado como recebido, além da presença de grãos e maclas, a ocorrência de estrutura martensítica na micrografia (Figura 1a), cuja formação certamente está associada ao processo de fabricação das chapas conduzido anteriormente. Esse resultado é confirmado através da análise do difratograma (Figura 2a), no qual pode ser verificada a ocorrência de picos típicos de austenita γ e, de maneira menos acentuada, de martensita α' . Já para o material tratado termicamente, em ambas as condições, observa-se a presença apenas de grãos de austenita e maclas (Figuras 1b e 1c). Este fato também é confirmado através dos resultados obtidos por difração de raios-X, nos quais são notados picos de intensidade em função de 2θ associados apenas à estrutura austenítica γ (Figuras 2b e 2c).

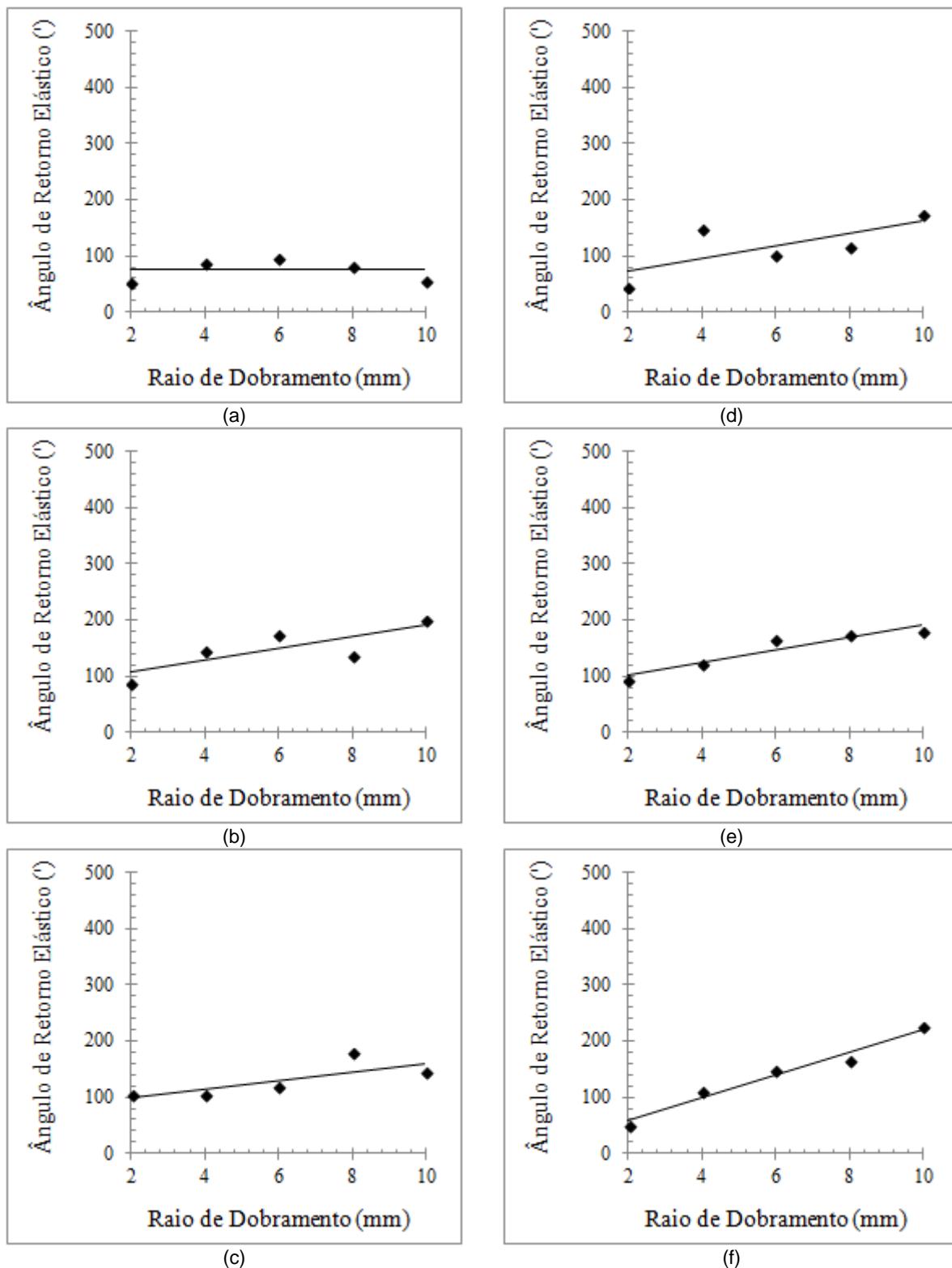


Figura 4. Ângulo de retorno elástico verificado no dobramento do aço inoxidável AISI 304 tratado termicamente a 1.050°C: (a), (b), (c) por 15 min – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente; (d), (e), (f) por 60min – dobramento a 30°, 60°, 90°, respectivamente.

Dessa forma, verifica-se que, a princípio, o tratamento térmico removeu a presença da martensita α' e, de acordo com o tempo de encharque empregado na operação, conforme esperado, tamanhos de grão distintos foram obtidos, fato observado de maneira apenas qualitativa.

Os resultados dos ensaios de tração realizados no aço AISI 304 mostram que o processamento térmico levou a uma diminuição da resistência mecânica do material e a um aumento na ductilidade, conforme o esperado, retirando os efeitos da deformação plástica anterior, como o encruamento e a transformação martensítica. A alteração na resistência foi mais pronunciada com o aumento do tempo de encharque, ou seja, com a elevação no tamanho de grão. Entretanto, não foi verificada diferença significativa em termos de ductilidade para os corpos de prova tratados termicamente, analisada através dos resultados de alongamento % total.

Considerando os resultados relativos à recuperação elástica do aço AISI 304 no estado como recebido (Figura 3), nota-se que, de maneira geral, o aumento no raio do cutelo levou à elevação do ângulo de retorno elástico. De forma similar, o efeito mola se tornou mais acentuado com o ângulo inicial de dobramento (de 30° para 60° e de 60° para 90°). O material tratado (Figura 4), analogamente ao comportamento verificado durante o processamento no estado como recebido, exibiu tendência à elevação do fenômeno de retorno elástico com o raio de dobramento, apresentando como exceção a situação associada ao ângulo inicial de 30° e tratamento térmico com tempo de encharque de 15min. Por outro lado, contrastando com os resultados mostrados na Figura 3, não foi verificada de maneira clara a disposição geral de aumento do ângulo de retorno elástico com a elevação do ângulo de dobramento inicial. Por fim, ainda comparando os resultados mostrados pelo aço inoxidável AISI 304 no estado como recebido com aqueles apresentados pelo material tratado termicamente, nota-se que o processamento térmico com tempo de encharque de 15 minutos levou, novamente com exceção do ângulo inicial de 30°, a um decréscimo nos ângulos de retorno elástico em relação à liga no estado original, assim como foi observado para os corpos de prova tratados com tempo de encharque de 60 minutos. Entretanto, essa tendência não foi verificada ao confrontar os dados relativos às peças apenas tratadas, sendo o comportamento (aumento ou queda no efeito mola com alteração do tempo de encharque) relativamente aleatório. A influência dos parâmetros de dobramento no fenômeno de recuperação elástica é um fato esperado, sendo continuamente investigado para diferentes materiais e situações. A espessura da chapa, o raio de dobramento, o ângulo de dobramento e a largura da abertura da matriz são apontados como as principais características geométricas da operação a afetar os resultados^(1,5,7). Considerando a abordagem do presente trabalho, de maneira em geral, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, uma vez que foi observado que o aumento no raio do cutelo levou à elevação na recuperação elástica, similarmente a estudos apresentados anteriormente.⁽⁵⁾

Em relação às características do material a ser conformado, o limite de escoamento e o módulo de elasticidade são, em geral, mencionados como os parâmetros mais significativos a afetar o fenômeno de retorno elástico no dobramento.^(1,3,5,7) Os trabalhos sugerem que uma diminuição na tensão limite de escoamento levaria a uma redução no efeito mola.^(2,3) Por outro lado, valores menores de módulo de elasticidade induziriam ao aumento na recuperação elástica.⁽²⁾ Os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4, em geral, estão de acordo com esses trabalhos. A comparação entre os dados obtidos para o metal como recebido, afetado pelo encruamento e pela ocorrência de transformação martensítica, associados à deformação plástica prévia relativa ao processo de fabricação das chapas, logo exibindo maior limite de escoamento (Tabela 1), com aqueles apresentados pelo material tratado termicamente, associado a menores valores limites de escoamento, sugere que o decréscimo na tensão citada levou à redução no retorno elástico.

5 CONCLUSÕES

De maneira geral, o aço inoxidável AISI 304 exibiu, independente da condição prévia ao ensaio, ou seja, das características microestruturais da liga, um aumento do fenômeno de recuperação elástica com a elevação do raio do cutelo, com exceção da situação associada ao ângulo inicial de dobramento de 30° e tratamento térmico com tempo de encharque de 15 min.

Para o material no estado como recebido, foi verificada ainda a tendência de aumento do retorno elástico com o ângulo da operação de dobramento.

A realização de tratamentos térmicos, que conduziu a uma diminuição na resistência mecânica do aço AISI 304, levou a um decréscimo nos ângulos de retorno elástico em relação à liga no estado original, exceto para as condições nas quais o ângulo inicial era de 30°.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Política Estudantil - CPE, do CEFETMG, pelo auxílio financeiro através da disponibilização da Bolsa de Complementação Educacional.

REFERÊNCIAS

- 1 ABDULLAH, A. B.; SAPUAN, S. M.; SAMAD, Z.; AZIZ, N. A. A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. **Advances in Natural and Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 195-205, 2012.
- 2 DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.
- 3 TEKINER, Z. 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, 2004.
- 4 PARSA, M. H.; NASHER AL AHKAMI, S.; PISHBIN, H; KAZEMI, M. Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming. **Materials and Design**, v. 41, p. 326–337, 2012
- 5 TEKASLAN, O.; SEKER, U.; OZDEMIR, A. Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5mm thickness in bending dies. **Materials and Design**, v. 27, p. 251-258, 2006.
- 6 GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 247p.
- 7 INAMDAR, M. V.; DATE, P. P.; SABNIS, S. V. 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, 2002.
- 8 TOROS, S.; ALKAN, M.; ECE, E.; OZTURK, F. Effect of pre-straining on the springback behavior of the AA5754-0 alloy. **Materials and Technology**, v. 45, n. 6, p. 613-618, 2011.
- 9 SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1982. 286p.
- 10 WAGONER, R. H.; LIM, H.; LEE, M. G. Advanced Issues in springback. **International Journal of Plasticity**, 2012. *In press*.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING METALS. **ASTM E8**: standard test method for tension testing of metallic materials. Pennsylvania, 2009.
- 12 ASM HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. Ohio: ASM International, 2004. 1184p.