Avaliação do retorno elástico do aço de alta resistência Quard 500

Evaluation of the spring back of Quard 500 high strength steel

DOI:10.34117/bjdv8n1-273

Recebimento dos originais: 07/12/2021
Aceitação para publicação: 15/01/2022

Josimar Teixeira dos Santos
Mestrando em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Escola de Engenharia, Centro de Tecnologia
Endereço: Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – setor 6 - CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS
E-mail: josimartsantos@gmail.com

Mateus Waikamp
Bacharel em Engenharia Mecânica na Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos)
Endereço: Av. Unisinos, 950 - Cristo Rei, CEP 93022-750 – São Leopoldo – RS
E-mail: mateus.waikamp@gmail.com

Cristian Luiz Onzi
Mestrando em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia (UFRGS), Centro de Tecnologia
Endereço: Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – setor 6 - CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS
E-mail: onzi.engenharia@gmail.com

Lirio Schaeffer
Prof. Dr
Dr. Pesquisador na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Escola de Engenharia, Centro de Tecnologia
Endereço: Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – setor 6
CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS
E-mail: schaefer@ufrgs.br

RESUMO
Aços de alta resistência têm sido cada vez mais utilizados na indústria em componentes com desgaste excessivo e/ou em equipamentos que necessitam de redução de peso, como: equipamentos agrícolas, máquinas usadas para mineração, carrocerias de caminhões e pá carregadeira de tratores. Embora a utilização desse tipo de material tenha aumentado nos últimos anos, poucos são os estudos voltados para a conformação destes. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o retorno elástico do aço de alta resistência Quard 500, com dureza de 500 HB e espessura de 4,76mm. Para este experimento foram

utilizados três punções diferentes com raios de 16, 18 e 20 mm com a finalidade de identificar o comportamento da recuperação elástica deste aço quando submetido ao processo de dobramento com diferentes Raios de Punções (Rp), a conformação foi realizada com o auxílio de uma matriz V com um ângulo de 90° e abertura da matriz (W) de 50 mm. Foram conformadas três amostras para cada punção utilizado, todas as peças foram dobradas transversalmente ao sentido de laminação.

Palavras-chave: Dobramento, alta resistência, 500 HB, retorno elástico.

ABSTRACTS

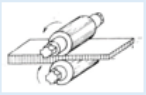
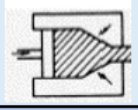
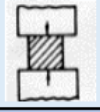
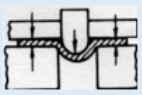
High strength steels have been increasingly used in the industry in components with excessive wear or in equipment that need weight reduction, such as: agricultural equipment, machines used for mining, truck bodies and buckets of tractor loader. Although the use of this type of material has increased in the last years, there are few studies focused on the forming of these materials. The present work aims to evaluate the elastic return of the high strength steel Quard 500, with 500 HB hardness and 4.76mm thickness. For this experiment three different punches with radii of 16, 18 and 20 mm were used with the purpose of identifying the behavior of the elastic recovery of this steel when submitted to the bending process with different punch radii (Rp), the forming was performed with the aid of a V matrix with an angle of 90° and matrix opening (W) of 50 mm. Three samples were formed for each punch used, all parts were bent transversal to the rolling direction.

Keywords: Bending; high strength; 500 HB; elastic return.

1 INTRODUÇÃO

A tabela 1 indica alguns dos principais processos de conformação empregados na indústria atualmente. Em geral, esses processos são realizados através de forças de compressão e/ou tração, a conformação também pode ocorrer em temperatura ambiente ou a quente.

Tabela 1 - Processos de conformação mais comuns [1].

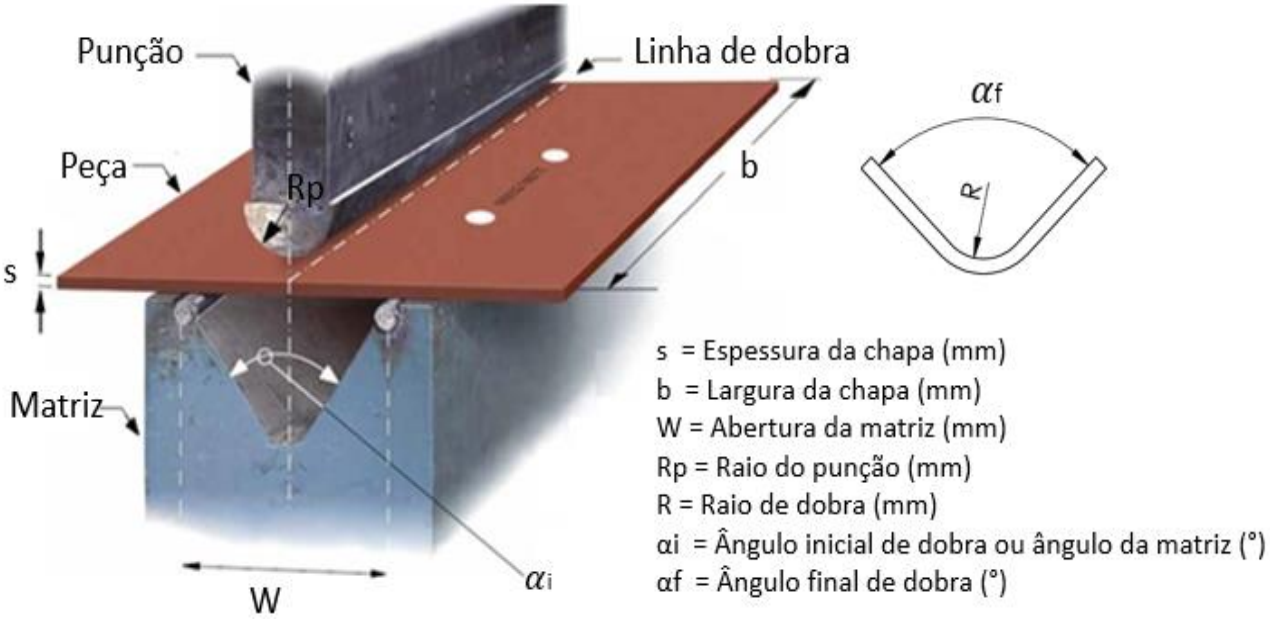
Processo		Laminação	Trefilação	Extrusão	Forjamento	Estampagem (profunda)	Dobramento
Força	Compressão	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
	Tração	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	SIM
Temperatura	Quente	SIM	NÃO	SIM	SIM	SIM	SIM
	Frio	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Ilustração							
Podutos		Placas Chapas Barras Perfis	Barras Arames Fios Tubos	Barras Tubos Perfis	Peças pequenas e grandes forjadas	Peças de chapas estampadas	Peças de chapas e tiras dobradas

Entre os processos indicados na (tabela 1), destaca-se o Processo de Dobramento (figura 1), geralmente realizado por dobradeiras com auxílio de uma matriz e um punção, onde é preciso considerar alguns parâmetros: o raio de dobra ou curvatura (R) , a elasticidade do material, ângulo de dobra (α), espessura da chapa (s) entre outros [2]. O processo de dobramento pode ser dividido em duas categorias: dobramento a frio e dobramento a quente, sendo o primeiro mais usual na indústria, já o processo a quente é indicado para chapas com espessuras maiores que 4,76 mm ou para materiais com maior resistência [2].

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O Processo de Dobramento (figura 1) vem sendo aplicado na indústria há muitos anos, trata-se de uma técnica comum, porém os estudos realizados nessa área, voltados aos aços de alta resistência, são relativamente recentes [3].

Figura 1 – Processo de dobramento de uma chapa [4].



O dobramento ocorre através da deformação plástica que um determinado material sofre. Entre os métodos de estampagem, este apresenta grande versatilidade podendo obter peças com ângulos que variam de 180° até o ângulo dimensionado para a abertura da matriz [5]. O dobramento continua sendo o processo de conformação mais comum dentro do domínio de chapas metálicas, porém com o desenvolvimento de novos materiais com maior resistência e menor conformabilidade, se torna ainda mais difícil a fabricação de peças dobradas a frio, exigindo um raio de punção (Rp) muito maior do que

geralmente é utilizado para aços de menor resistência ou até processos secundários como soldagem de dois elementos separados para formar um com ângulo. [5] [6].

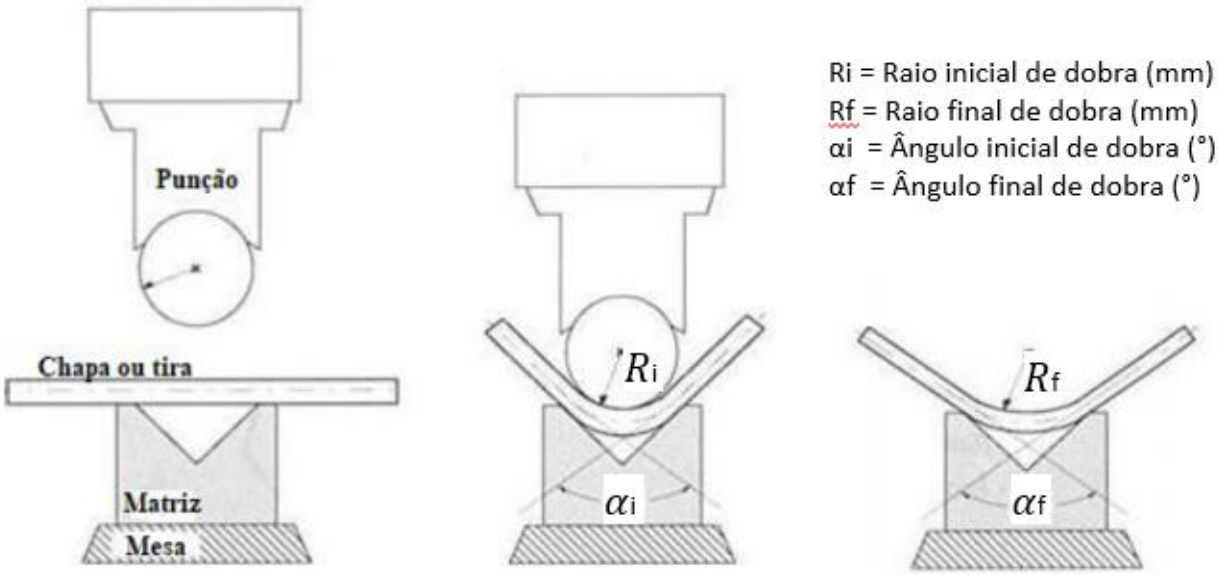
O processo de dobramento se caracteriza quando a chapa é dobrada através da força exercida pela prensa em decorrência da força empregada pelo punção, sendo a chapa pressionada contra a matriz, assumindo assim, a sua forma final [7]. Entre as dificuldades encontradas no processo de dobramento, uma das mais recorrentes é o fenômeno do retorno elástico (*springback*) ocasionando mudança na geometria final da peça conformada.

2.1 RETORNO ELÁSTICO

Atingir a precisão dimensional através do processo de dobramento é um grande desafio, devido ao surgimento das tensões na região elástica quando o material é conformado, e do descarregamento dessas tensões quando o punção é removido. É importante salientar que a chapa dobrada sofre uma deformação plástica, porém quando o ferramental é removido a peça tende a voltar a sua condição inicial (plana), essa tendência de o material retornar a sua forma plana é conhecido como retorno elástico "K" (*SpringBack* ou efeito mola) [7][6]. Este fenômeno tem sido o mais estudado na área de conformação dos metais [6].

Quando a força de dobramento é interrompida a secção com tensões inferiores ao limite de escoamento do material dobrado, que permaneceu dentro da zona elástica, tem a tendência a retornar à posição inicial, causando o retorno elástico. Este efeito acontece em praticamente todos os processos de conformação, porém é no dobramento que este é mais evidente [8], conforme ilustrado na figura 2 [9]. O efeito elástico causado após o dobramento promove algumas alterações significativas na geometria final da peça, dentre eles é possível destacar o raio de dobramento e o ângulo de dobra, onde ambos podem aumentar com a liberação da força exercida pelo punção, devido à componente elástica do material [10].

Figura 2 – Retorno elástico [9].



.

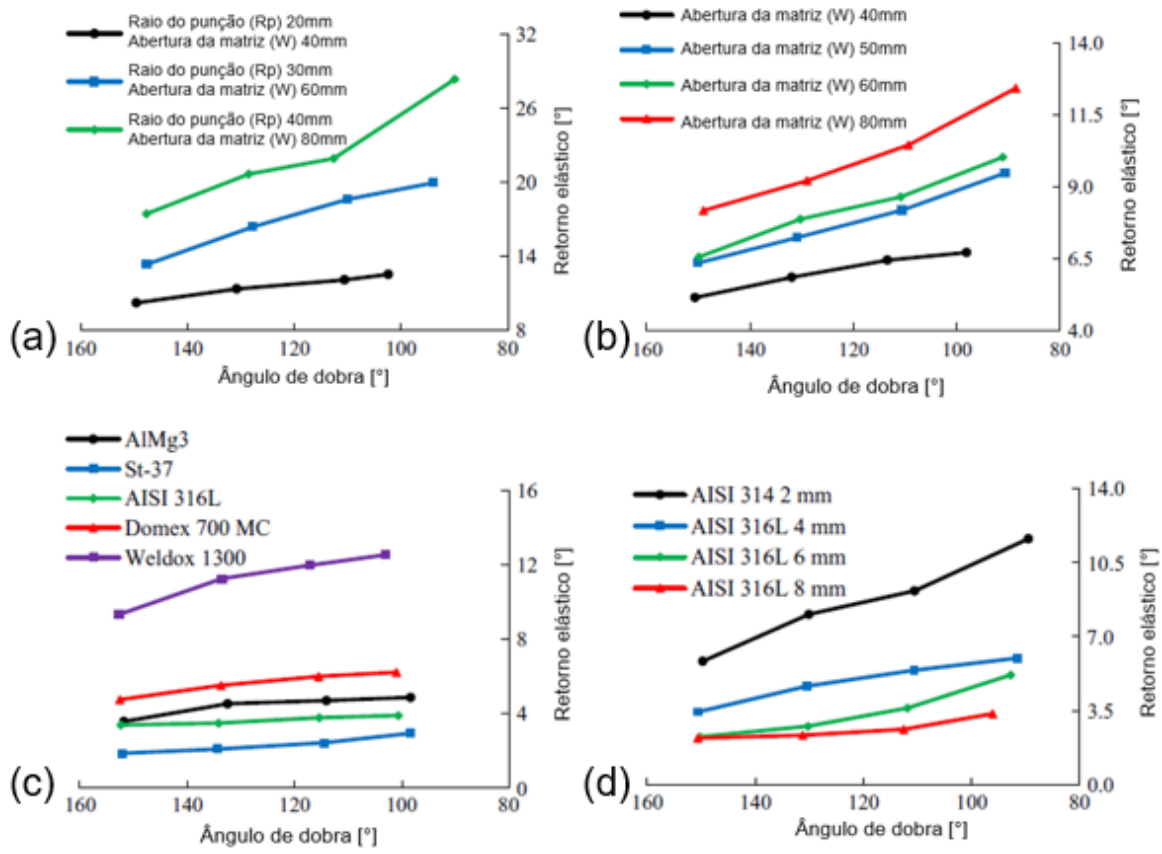
Quanto maiores o limite de escoamento e a deformação plástica do material e menor o módulo de elasticidade, maior será o retorno elástico [11]. O encruamento possui também uma grande influência na recuperação elástica [12], bem como a anisotropia e o efeito Bauchinger também podem ter influência neste processo [13].

Fatores como a temperatura, a força exercida através do punção e o tempo que esta permanece aplicada sobre a peça também precisam ser levados em conta quando se requer ter um retorno elástico menor, além disso, quanto maior o raio de dobra (R) e a abertura da matriz (W), maior também será o efeito mola da chapa conformada [14].

Dentre os parâmetros já citados os que mais influenciam no retorno elástico são: Raio do punção, abertura da matriz, espessura e resistência do material. Alguns estudos foram realizados considerando esses parâmetros, onde os resultados podem ser vistos da figura 3. De acordo com esses experimentos foi possível determinar que quanto maiores forem as aberturas da matriz e o raio do punção, maior também será o efeito mola causado no material conforme evidenciado na figura 3 (a), neste experimento foi utilizado o material Weldox 1300 com espessura de 4mm. Um experimento similar foi realizado para o aço Domex 700 MC, também com espessura de 4 mm, porém neste caso o raio do punção se manteve constante (20mm), alterando apenas a abertura da matriz. Os resultados indicam que esta característica tem grande influência no efeito mola uma vez que o maior retorno elastico encontrado na figura 3 (b) foi justamente para as peças conformadas na matriz com maior abertura (80mm). O mesmo autor realizou ainda outro experimento desta vez alterando apenas o material e mantendo a mesma abertura de

matriz (60mm), raio de punção (30mm) e espessura do material (6mm), os resultados podem ser observados na figura 3 (c). Os resultados mostram que o material tem forte influência no retorno elástico, indicando que quanto maior for a resistência do material maior também deverá ser o efeito mola. Por fim o autor realizou um novo experimento alterando apenas a espessura do material, desta vez os resultados indicados na figura 3 (d), comprovam que quanto maior for a espessura do material maior será o retorno elástico após o dobramento [6].

Figura 3 – (a) Influência do raio do punção e abertura da matriz; (b) Influência da abertura da matriz; (c) Influência da resistência do material; (d) Influência da espessura do material [6].].



Para Dieter (1981) é possível prever o efeito mola de acordo com a equação 1, para isso é preciso conhecer o ângulo final (α_f) e inicial (α_i) ou o raio de curvatura (Ri) antes da liberação da carga exercida pelo punção, o raio encontrado após a liberação do punção (Rf) e a espessura do material (s). Quanto maior o resultado para K (fator de retorno elástico), menor será o retorno elástico, ou seja, quando mais o resultado se aproxima de 1, menor será o efeito mola do material.

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_0} = \frac{R_0 + s/2}{R_f + s/2} \quad (1)$$

Uma forma bastante usada para minimizar o retorno elástico é dobrar a chapa com um raio de curvatura menor que o especificado no projeto. Ao utilizar um raio de dobra menor, maior será a zona plástica, assim as forças elásticas que atuam sobre o material são menores, fazendo com que o retorno elástico seja reduzido [11] [4]. Para aços de alta resistência o retorno elástico tende a ser maior.

2.2 AÇO QUARD 500

A família de aço Quard é conhecida pela sua alta resistência ao desgaste que proporciona ao produto um acréscimo relevante de sua vida útil, muito utilizado em equipamentos de britagem e moagem, peneiras, pás carregadeiras, entre outros. Além disso, o uso desse aço especial permite uma redução significativa no peso final do componente em relação ao mesmo componente fabricado em um material comum. Para este trabalho será utilizado o Quard 500 fabricado pela NLMK, a tabela 2 apresenta a composição química deste material [15].

Tabela 2 – Composição química do Quard 500 [14].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,28	0,80	1,60	0,025	0,01	1,00	1,00	0,50	0,005

Quanto à dureza, o fabricante informa que toda linha Quard possui um controle apurado, sendo realizados ensaios a cada corrida de 40 toneladas. Para o aço utilizado neste trabalho a faixa de dureza que a NLMK indica em seu catálogo varia de 470 a 530 HB, ou seja, o Quard 500 possui uma tolerância quanto à dureza de +/-30 HB. Na tabela 3, a fabricante apresenta a relação para o raio mínimo de dobra (Rmin), assim como, a abertura da matriz (W) de acordo com a espessura (s) para que ele seja conformado [15].

Tabela 3 – Relação para dimensionamento do raio de dobra e abertura da matriz [15].

Espessura (mm)	Transversal à laminação Rmin=	Longitudinal à laminação Rmin=	Abertura transersal W=	Abertura longitudinal W=
s < 8	s x 3.5	s x 4.5	s x 10	s x 12
8 ≤ s ≤ 20	s x 4.5	s x 5	s x 12	s x 14
s > 20	s x 7	s x 8	s x 16	s x 18

A NLMK através de seu catálogo ainda indica outras propriedades importantes a respeito do Quard 500 conforme indicado na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas [14].

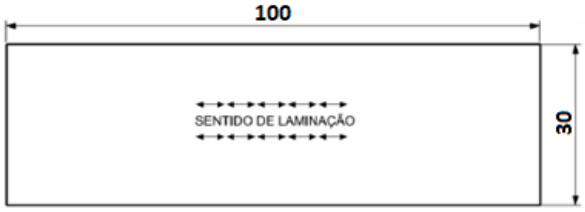
Limite de escoamento [Mpa]	Limite de ruptura Transversal [Mpa]	Alongamento [%]	Efeito mola [°]
1500	1700	8	12 a 18

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O DOBRAMENTO

A elaboração dos corpos de prova (figura 4) com dimensão de 4,76 x 30 x 100 mm (espessura x largura x comprimento), seguiu os parâmetros determinados na ABNT NBR ISO 7438 [16]. Para que todas as dobras pudessem ser efetuadas perpendiculares ao sentido de laminação, foi inserida uma nota no desenho.

Figura 4 – Corpo de prova utilizado no processo de dobramento.



3.2 FERRAMENTAL UTILIZADO PARA O DOBRAMENTO EM V

A matriz utilizada neste trabalho possui um ângulo de 90° e uma abertura (W) de 50 mm, foram utilizados três punções diferentes, a fim de avaliar o retorno elástico para diferentes raios de dobras. Os punções utilizados possuem um Rp (Raio do punção) de 16, 18 e 20 mm. A matriz assim como os punções utilizados no dobramento do Quard 500 podem ser vistos na figura 5.

Figura 5 – Ferramental utilizado no dobramento

3.3 DOBRAMENTO DAS AMOSTRAS

Todas as peças foram dobradas no sentido perpendicular à laminação, sendo que a velocidade de dobramento foi determinada de acordo com a ABNT NBR 7438 [16], igual a 1 mm/s. A matriz V foi fixada na mesma máquina utilizada no ensaio de tração, assim como os punções conforme indicado na figura 6. Para cada raio de dobra foram dobrados três corpos de prova. A matriz foi marcada com um traço com a finalidade de manter a centralização das amostras visualmente e na mesma posição.

Figura 6 – Ferramental utilizado para o dobramento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ângulo final (αf) foi medido com o auxílio do projetor de perfil (figura 7) presente no laboratório de metrologia da Unisinos a fim de obter o ângulo final de dobramento de todas as amostras. Foi possível então analisar o retorno elástico para cada uma delas conforme observado na tabela 5.

Figura 7 –Projetor de perfil utilizado para medição das amostras

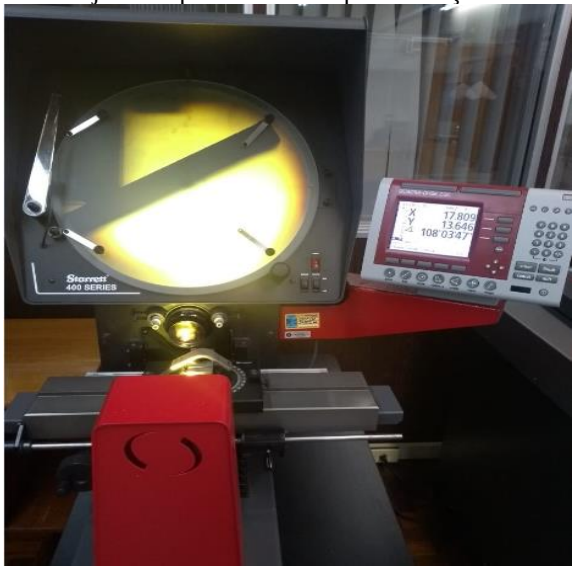


Tabela 5 – Resultados obtidos com auxílio do projetor de perfil.

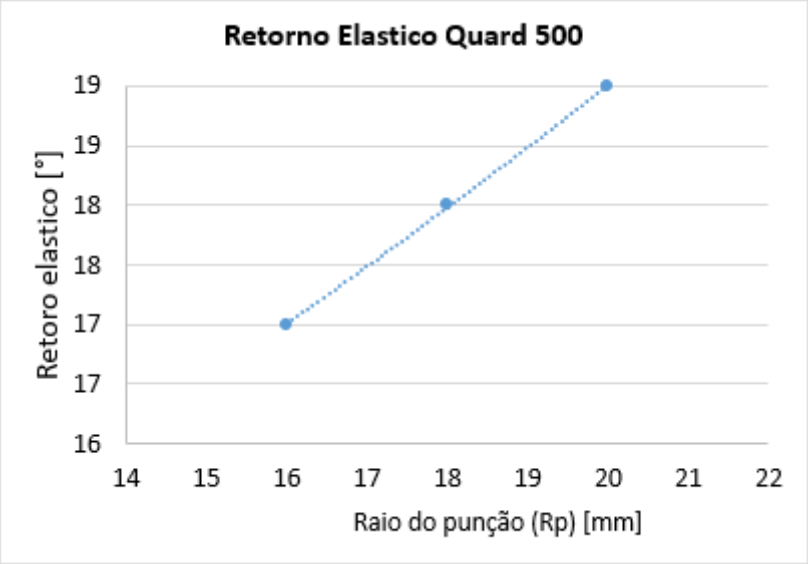
Corpo de prova (CP)	Raio do punção [mm]	Ângulo de dobra inicial [°]	Ângulo de dobra final [°] (tolerancia +/- 30')	Média do Ângulo de dobra final [°] (tolerancia +/- 30')	Média do retorno elastico [°] (tolerancia +/- 30')	Equação 1 (Coeficiente k) Dieter (1981) [-]
CP1	20	90	109	109	19	0,79
CP2		90	109			
CP3		90	108			
CP4	18	90	108	108	18	0,80
CP5		90	107			
CP6		90	108			
CP7	16	90	108	107	17	0,81
CP8		90	108			
CP9		90	105			

Conforme indicado na tabela 5, é notório que quanto maior o raio do punção utilizado durante a conformação do Quard 500 maior também será o retorno elástico encontrado, este resultado confirma o que a literatura informa pois quanto menor o raio do punção maior é a deformação plástica causada no material e menor é o retorno elástico causado durante o dobramento. Os resultados encontrados para a equação 1 são coerentes com os resultados práticos, uma vez que quanto mais o coeficiente k se aproxima de 1, menor deverá ser o retorno elástico.

Para o punção com Rp de 16 mm foi encontrado o menor retorno elástico (17º +/- 30') entre as ferramentas utilizadas neste trabalho, em paralelo foi onde o coeficiente k (0,81) foi o maior. De forma inversa, através do punção com Rp de 20 mm se obteve o maior retorno elástico (19° +/- 30') e o menor coeficiente k (0,79).

O retorno elástico encontrado neste trabalho para o Quard 500 aproxima-se dos valores indicados na tabela 4 onde o fabricante indica que para este material o retorno elástico é de 12° a 18°. Com o auxílio da figura 8 se torna evidente que à medida que o raio do punção aumenta, o retorno elástico também será maior.

Figura 8 – Retorno elástico Quard 500 com 4,7mm de espessura



5 CONCLUSÃO

É evidente a necessidade de se estudar materiais de alta resistência para suprir as demandas atuais da qual os equipamentos são submetidos a esforços extremos por grandes períodos. Existem artifícios relativamente simples para que o retorno elástico proveniente da conformação destes materiais seja reduzido como a redução do raio do punção, no entanto a utilização deste método pode trazer a fragilização da região e possível colapso da dobra.

O trabalho evidenciou a relação clara entre o raio do punção e o retorno elástico de materiais de alta resistência, mostrando que a relação entre estas duas caraterísticas são ligadas de forma direta, ou seja, quanto menor o raio do punção menor é o retorno da dobra advinda do processo produtivo, necessitando nestes casos efetuar um esforço além do necessário para que seja descontado o retorno na peça final.

A equação que traz o coeficiente K se mostrou performar de forma interessante para as amostras selecionadas, devendo ser estudada para casos extremos como espessuras de chapas extremamente pequenas ou grossas em demasia.

REFERÊNCIAS

[1] FILHO, ETTORE BRESCIANI; DA SILVA , IRIS BENTO; BATALHA, GILMAR FERREIRA; BUTTON, SÉRGIO TONINI. CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS. 6. ed. São Paulo: Unicamp, 2011. 254 p. ISBN 978-85-86686-64-1. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf. Acesso em: 15 jul. 2020.

[2] MARCOS, F. Corte e dobragem de chapas. Ed Hemun 2007.

[3] SCHAEFFER, LIRIO. MANUFATURA POR CONFORMAÇÃO MECÂNICA. PORTO ALEGRE: IMPRENSA LIVRE, 2016.

[4] SSAB. HARDOX. DUREZA E RESISTÊNCIA, [s. l.], ca. 2019.

[5] FREES, MONIQUE VALENTIM DA SILVA. AVALIAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO NBR 6656 LNE 380. Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/163428. Acesso em: 19 ago. 2020.

[6] VORKOV, Vitalii et al. Experimental investigation of large radius air bending. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 92, n. 9, p. 3553-3569, 2017.

[7] SANTOS, RICARDO ADRIANO DOS. INFLUÊNCIA DA FORÇA PÓS DOBRA E DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO RETORNO ELÁSTICO EM PROCESSOS DE DOBRAMENTO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA. 2013.

[8] PALMEIRA, Alexandre. PROCESSOS DE DOBRAMENTO & CALANDRAGEM. UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: [s. n.], 2005. Disponível em: https://pt.slideshare.net/Thrunks/cap-7-dobramento. Acesso em: 15 maio 2019

[9] PAOLINELLI, Ana Luiza Golçalves Salomé. Análise do retorno elástico no dobramento de chapas de aço com baixo teor de carbono. 2017.

[10] BARBOSA, GERALDO MAGELA. PROCESSO DE DOBRAMENTO DE CHAPAS METÁLICAS. VOL. 7, NÚM. 1. ED. SÃO PAULO: EXACTA, 2009. DISPONÍVEL EM: HTTPS://WWW.REDALYC.ORG/PDF/810/81012760011.PDF. ACESSO EM: 19 ABR. 2019.

[11] DIETER, GEORGE E. Metalurgia Mecânica, 2ª edição. Ed Guanabara, Rio de Janeiro, 1981.

[12] GUSEL, L. Analysis of elastic recovery phenomena in bending process. DAAAM International, v. 22, p. 39-40, 2011.

[13] OLIVEIRA, M. C.; ALVES, J. L.; CHAPARRO, B. M.; MENEZES, L. F. Study on the influence of work-hardening modeling in springback prediction. International Journal of Plasticity, v. 23, p. 516-543, 2007.

[14] 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.

[15] NLMK. Aços de alta resistência ao desgaste Quard 500, [s. l.], ca. 2019. Disponível em: https://innova.vix.br/wp-content/uploads/2018/09/Ficha-tecnica_QUARD-500-1.pdf. Acesso em: 22 out. 2019.

[16] ABNT, NBR ISO. 7438.(2016). Materiais metálicos: Ensaio de Dobramento.