



## **Análise da influência do raio do punção e do sentido de laminação na deformação de chapas de aço no processo de dobra**

### **Analysis of the influence of puncture radius and direction of lamination on the deformation of steel sheets in the bending process**

Cassiano Rodrigues Moura<sup>1</sup>

Gilberto Schwengber Both<sup>2</sup>

**Resumo:** O processo de dobra de chapas metálicas é relativamente simples e vem sendo muito utilizado na indústria para dar forma nas peças das mais diversas formas. Durante esse processo a chapa é exposta a esforços de tração e compressão simultaneamente, o que pode gerar defeitos. O objetivo deste trabalho é analisar essas deformações em chapas de aço carbono ASTM A-36 provenientes do processo de dobra. Esta pesquisa foi classificada como experimental, e para ser desenvolvidas foram utilizadas chapas de aço dobradas em paralelo e em perpendicular ao sentido de laminação, sendo estas dobradas através de valores mínimos de dobra normalizados pela Norma DIN 6935 e com raios mínimos não normalizados pela referida norma. Dessas chapas foram extraídas amostras que passaram por caracterização através de ensaio metalográfico e avaliação de micro-dureza, tanto no raio interno como externo da dobra. Foram encontradas deformações em todas as amostras analisadas, sendo que, nas amostras fabricadas com raios não normalizados houve excesso de deformações. Foi possível perceber que essas deformações podem ser potencializadas de acordo com o raio do punção utilizado, o que acarreta no surgimento de trincas, o encruamento e o endurecimento na seção dobrada da chapa.

**Palavras-chave:** Processo de dobra; Chapa metálica; Deformação; Punção.

<sup>1</sup> Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

<sup>2</sup> Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

**Abstract:** The process of folding sheet metal is relatively simple and has been used extensively in the industry to give shape to the most diverse pieces. During this process the sheet is exposed to tensile and compression forces simultaneously, which can lead to defects. The purpose of this work is to analyze these deformations in ASTM A-36 carbon steel sheets from the bending process. This research was classified as experimental, and to be developed, steel plates folded parallel and perpendicular to the rolling direction were used, being folded through minimum bend values normalized by DIN 6935 and with minimum radii not normalized by said standard . From these plates were extracted samples that underwent characterization through a metallographic test and microhardness evaluation, both in the internal and external radius of the fold. Deformations were found in all analyzed samples, and in the samples made with non-normalized rays there was excess deformation. It was possible to notice that these deformations can be potentialized according to the radius of the punch used, which.

**Keywords:** Folding process; Sheet metal; Deformation; Puncture.

---

## 1. Introdução

O processo de dobra também conhecido como quinagem é um processo relativamente simples, muito utilizada na indústria metal mecânica para dar formas a chapas metálicas, podendo ser aplicado em peças com geometria simples como para peças com geometrias mais complexas.

As operações de dobramento, também conhecida como quinagem, são amplamente empregadas na indústria, apresentando-se de fundamental importância para dar forma a chapas metálicas, seja para peças com geometrias simples ou peças com geometrias mais complexas, o processo de dobra pode ser definido como a deformação de uma chapa metálica ao longo de uma linha reta. Trata-se de um processo de conformação plástica gerado pelo surgimento de esforços de tração e compressão simultâneos nos lados contrários da chapa sendo dobrada (MORAES e BORGES 2010). De acordo com Benson (2002) o dobramento é um processo de estampagem versátil e econômico, devido à sua possibilidade de executar qualquer ângulo entre 180° até a medida do ângulo da matriz utilizada no equipamento. Durante o processo de dobramento a chapa sofre uma deformação por flexão em prensas, estas transferem a energia e os movimentos necessários para o desenvolvimento do método, sendo que, a forma desejada é conferida mediante o emprego de punção e matrizes (SANTOS, 2013; MESQUITA e RUGANI, 1997).

Estes processos podem ser classificados em seis tipos, dobra no ar, dobra em V, dobra em U, dobra a fundo, dobra de flange com cunho de arraste e dobra rotativa. Dentre estes os mais utilizados em prensas dobradeira é a dobra no ar. O processo de dobra no ar é amplamente utilizado na indústria, por não exigir máquinas ferramentas com grandes capacidades, uma vez que a chapa não toca o fundo do canal da matriz durante o processo e o atrito entre a chapa e a matriz é mínimo, exigindo uma força menor para realizar o trabalho. Por exigir menor força de trabalho, o desgaste e o risco de inutilização das ferramentas é menor e permite a fabricação de peças com diferentes ângulos com o mesmo conjunto punção/matriz, reduzindo o custo com preparação de máquinas (RODRIGUES, 2010).

O raio mínimo de dobra é expresso geralmente em múltiplos da espessura da chapa, ou seja, um raio de dobramento de  $3T$  indica que o metal pode ser dobrado formando um raio de 3 vezes a sua espessura, sem que haja aparecimento de trincas. O raio mínimo, portanto é um limite de conformação, que indica o mínimo para o material não romper, no entanto, alguns metais muito dúcteis apresentam um raio mínimo igual à zero, ou seja, as peças podem ser achatadas sobre si mesmas sem romper, mas este processo não é muito utilizado por expor as ferramentas a grandes esforços. O raio do punção de dobra também pode ser definido levando em consideração o sentido de laminação e a espessura da chapa, conforme a norma DIN 6935 - Dobragem a Frio de Aços Planos Laminados. Segundo Rodrigues (2010) o raio de dobra é um

ponto muito importante no processo de fabricação, uma vez que a chapa sofrerá vários esforços durante o processo.

Empresas que trabalham com o processo de dobra de chapas metálicas, frequentemente encontram problemas ao efetuar o seu trabalho. Quando uma chapa é dobrada, ela é submetida a esforços de tração e compressão, o que causa deformações em sua micro-estrutura, sendo que essas deformações podem proporcionar fenômenos indesejados. Entre os defeitos que podem ocorrer estão o surgimento de trincas macroscópicas e microscópicas, alteração da dureza, alongamento e redução da espessura da chapa.

Um dos principais agravantes para o surgimento de defeitos é a escolha de raio de dobra, a composição química do aço escolhido e o sentido de laminação da chapa. A escolha incorreta de algum destes parâmetros pode ocasionar defeitos nas peças, que muitas vezes não visíveis a olho nu, podendo comprometer o bom funcionamento de componentes ou afetar a resistência mecânica de estruturas, o que pode gerar falhas e até mesmo culminar em graves acidentes, inclusive colocando a vida de pessoas em risco. Na literatura existem poucos estudos sobre as deformações que relacionadas ao processo de dobra. Os que existem são recentes, esses autores apenas citam os procedimentos como raio mínimo para a quinagem; abertura de matriz; dimensão de aba mínima; recuperação elástica e defeitos existentes no processo de dobra.

Com isso o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do raio do punção e do sentido de laminação na deformação em chapas de aço carbono ASTM A-36 proveniente do processo de dobra.

## **2. Materiais e método**

### **2.1 Materiais**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Chapa de aço ASTM A-36: Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram fabricados através de chapas com espessura de 7,9mm de aço ASTM A-36, com dimensão de 100x300mm.
- Tesoura guilhotina: As chapas utilizadas neste trabalho foram cortadas em uma tesoura guilhotina, marca Newton modelo DHN 3050;
- Prensa dobradeira: Neste trabalho foi utilizada uma prensa dobradeira da marca Sorg modelo DHS 250/35;
- Punções de dobramento: O punção de dobramento é a ferramenta que fica fixa na parte móvel da prensa dobradeira, também conhecida como avental superior, o punção se move verticalmente e ao mover-se para baixo empurra a chapa para dentro da matriz de dobramento, efetuando a dobra. Para a fabricação dos

corpos de prova deste trabalho foram utilizados punções com raios de 5mm, 12mm e 16mm;

- Matriz de dobramento: Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizado uma matriz com abertura em V de 80mm.

## 2.2 Método

O fluxo metodológico adotado nesta pesquisa se inicia com a preparação para a o processo de dobras nas chapas metálicas. Posteriormente serão extraídas as amostras para por fim desenvolver sua caracterização por meio da avaliação da micro-dureza, propagação de trincas e deformação na estrutura cristalina.

### 2.2.1 Processo de dobra

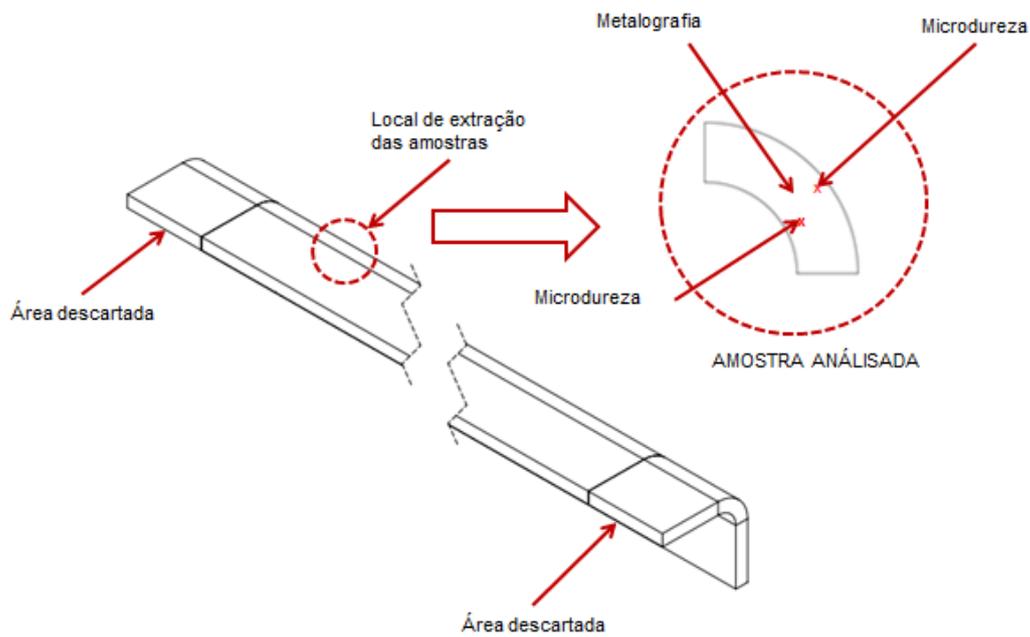
Durante o processo de dobra foram preparadas 4 chapas de aço ASTM A-36 que ao final formaram um perfil em L. A Tabela 1 apresenta a configuração das dobras, bem como o sentido de laminação e raio de dobra utilizada. A chapa 1 foi dobrada em paralelo ao sentido de laminação com o raio de 16mm (PL 16), conforme recomendado pela norma DIN 6935. A chapa 2 foi dobrada perpendicular ao sentido de laminação, com raio de 12mm (PR 12) conforme a recomendação da norma. As chapas 3 e 4 foram dobradas com raio de 5mm, diferente do recomendado pela norma, sendo que um em paralelo ao sentido de laminação (PL 5) e o outro perpendicular ao sentido de laminação (PR 5).

**Tabela 1:** Configuração das dobras e sentido de laminação.

Corpo de Prova	Chapa	Espessura	Sentido de Laminação	Raio de Dobra	Abertura da Matriz	Ângulo de Dobra	Raio Normalizado
PL 16	A S T M	7 , 9 m m	Paralelo	16mm	80mm	90°	Sim
PR 12			Perpendicular	12mm	80mm	90°	Sim
PL 5	A 3 6		Paralelo	5mm	80mm	90°	Não
PR 5			Perpendicular	5mm	80mm	90°	Não

### 2.2.2 Extração e Preparação das amostras

Para a extração das amostras foram descartados os primeiros 50mm da chapa, evitando assim que a análise metalográfica sofresse interferência das bordas, local onde os defeitos são potencializados, conforme mostra Figura 1. As amostras foram extraídas das chapas com o auxílio de uma serra manual e embutidas em baquelite. Estas passaram por análise microscópica e posteriormente ensaio de micro dureza.



**Figura 1:** Processo de extração das amostras.

### 2.2.3 Caracterização

A caracterização foi realizada em termos de dureza, surgimento de trincas, e estiramento da chapa na área de atuação da dobra. Para a comparação foram realizados testes de micro dureza e ensaios metalográficos para avaliar a existência de trincas, dureza, encruamento dos grãos e alongamento na área dobrada. Com esta comparação, foi possível avaliar os danos e desvios causados nas chapas dobradas com o raio não recomendado pela norma, bem como verificar qual dos materiais apresentou menor deformação após o processo de dobra.

Para o processo de lixamento foram utilizadas lixas d'água, fixadas em discos rotativos com refrigeração à água constante. O processo de lixamento começou com lixas com granulometria 80 e seguida pelas lixas 320, 400, 600, 800 e 1200.

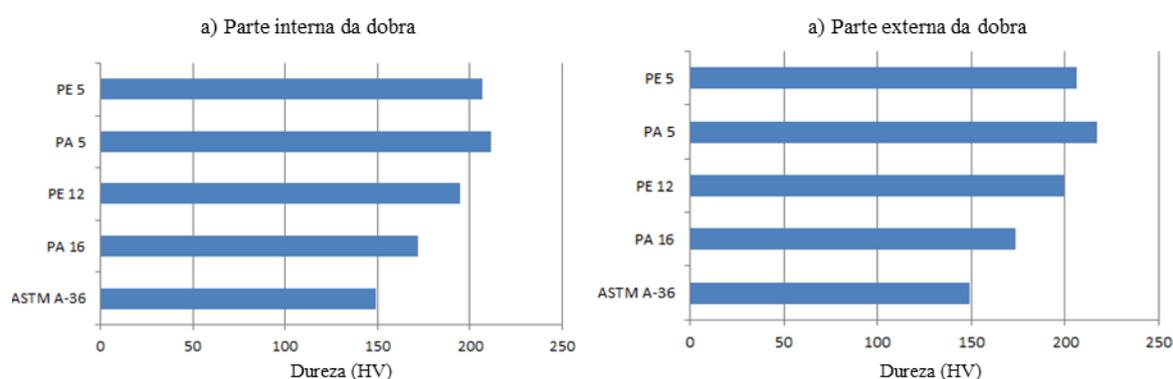
O polimento foi realizado através de panos especiais, presos a um disco giratório em uma lixadeira e politriz modelo PFL da marca Fortel, sobre estes panos foram acrescentadas pequenas quantidades de abrasivos, os abrasivos mais utilizados são o óxido de alumínio (alumina) e a pasta de diamante. Durante o polimento as amostras foram utilizadas a alumina.

Os microscópios utilizados nos ensaios metalográficos foram: Microscópio da marca Diagtech modelo XYM 404 com software *Toupview* com lente de 40X; Estereoscópio da marca Zeiss-Stemi modelo 2000-C com câmera Axio cam ERC 5s.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Ensaio de micro dureza

Na parte interna da dobra a chapa de aço foi submetida a esforços de compressão, já na parte externa foi submetida a esforços de tração. A Figura 2 apresenta um comparativo dos resultados obtidos através do ensaio de micro dureza na área interna (a) e na área externa da dobra. Pode-se perceber o aumento na dureza em todos os corpos de prova que sofreram deformação, sendo que, os corpos de prova que foram fabricados em desacordo com a norma obtiveram um maior percentual de aumento da dureza.



**Figura 2:** Resultados dos ensaios de micro dureza das amostras.

A amostra de chapa de aço ASTM A-36 que não sofreu deformação apresentou uma dureza de 149,2HV, todas as outras amostras que sofreram deformações pelo processo de dobra apresentaram uma maior dureza. Este endurecimento já era esperado, o aço tende a endurecer por encruamento quando sofre deformação plástica, no entanto é importante ressaltar o grande aumento de dureza nas amostras fabricadas com raio de 5mm, onde a dureza em ambas as amostras ultrapassaram os 207HV, conforme mostra a Tabela 2 onde são apresentados os resultados das medições da área interna da dobra.

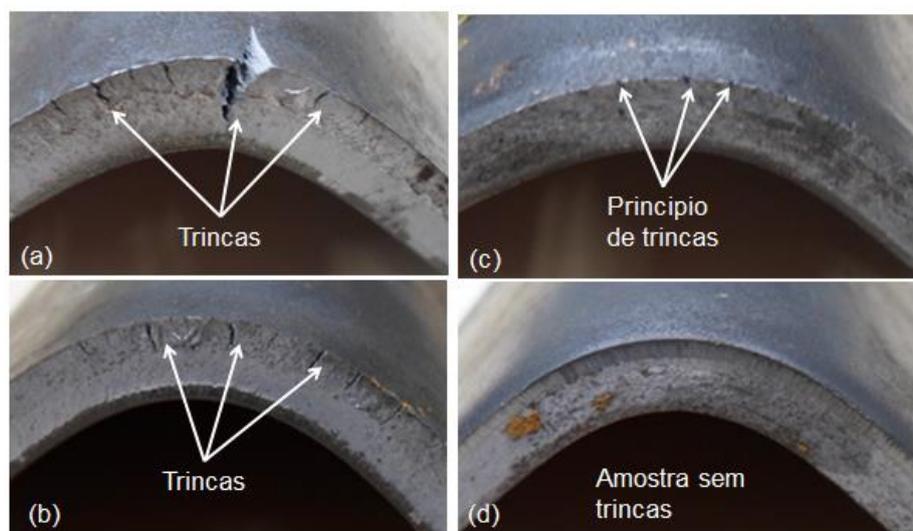
**Tabela 2:** Dureza na área interna da dobra

Amostra	Valor	Unidade
Aço ASTM A-36	149,2	HV
PA 16	172,2	HV
PE 12	194,6	HV
PA 5	211,5	HV
PE 5	207,2	HV

#### 3.2 Propagação de trincas

Ao dobrar as chapas, notou-se o surgimento de trincas em alguns corpos de prova, provenientes dos esforços de tração e compressão ao quais as chapas foram submetidas,

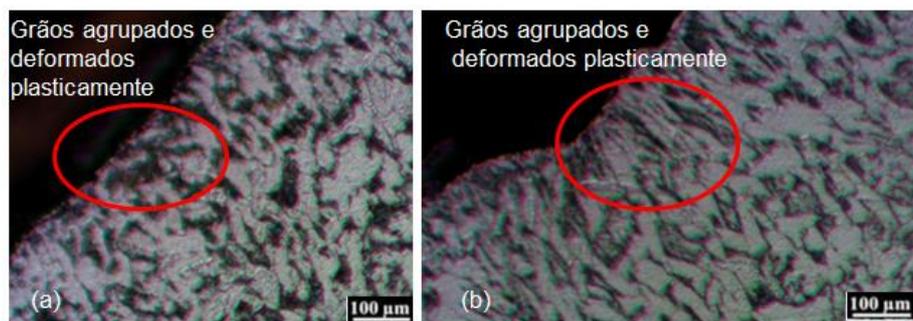
conforme apresentado por SCHAEFFER (2004). Estas trincas surgiram nas extremidades das chapas, onde a concentração de tensões é maior, estas trincas são consideradas macroscópicas e podem ser observadas na Figura 3. A Figura 3(a) apresenta a amostra dobrada com raio de 5mm em paralelo ao sentido de laminação, esta apresentou trinca macroscópica excessiva, sendo que uma delas ocupa quase toda a espessura da chapa, estas trincas são resultado das tensões que a chapa sofreu durante o processo de dobra. Esta amostra foi dobrada em paralelo ao sentido de laminação com raio de dobra de 5mm, quando a norma DIN 6935 indica para este material, considerando a espessura e sentido de laminação um raio de 16mm. Esta diferença no raio aumentou as tensões de tração e compressão gerando as trincas na amostra.



**Figura 3:** Análise macroscópica: a) PA5 b) PE5 c) PA16 d) PE12.

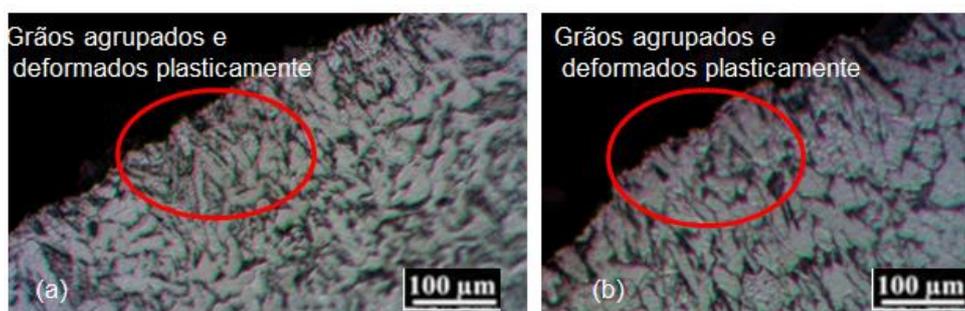
### 3.3 Deformação na estrutura cristalina

Para analisar as consequências desses esforços na chapa de aço, foram realizados ensaios microscópicos em cada uma das 4 amostras para análise comparativa das deformações existentes na estrutura cristalina do material. A Figura 4(a) representa a microscopia da amostra fabricada com raio 16mm e a Figura 4(b) representa a microscopia da amostra fabricada com raio de 5mm em paralelo ao sentido de laminação. É possível perceber que os grãos que compõem a estrutura do material sofreram uma pequena deformação plástica durante o processo de dobra conforme apresentado por (CALIISTER,2013).



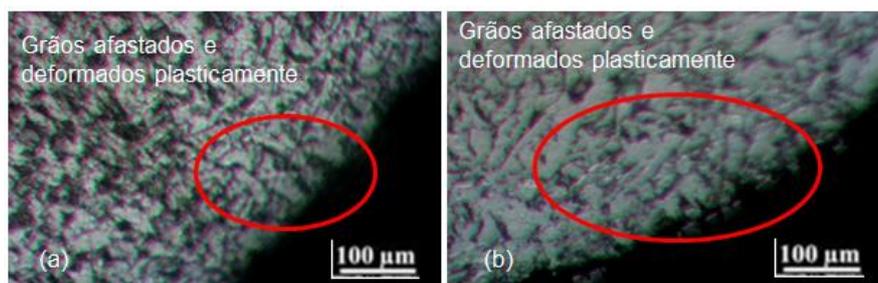
**Figura 4:** Microscopia no Raio interno das amostras: (a) PA 16; (b) PA 5.

A Figura 5(a) apresenta a microscopia do raio interno da amostra fabricado com raio de 12mm e perpendicular ao sentido de laminação e a Figura 5(b) representa uma amostra dobrada em perpendicular ao sentido de laminação com raio de 5mm. Nesta microscopia é possível observar os grãos deformados plasticamente, sendo que durante o processo de dobra as tensões resultantes desse processo forçaram os grãos da estrutura do material, fazendo com que esses ficassem agrupados.



**Figura 5:** Microscopia no Raio interno das amostras: (a) PE 12; (b) PE 5.

A Figura 6(a) apresenta a micrografia do raio externo de uma amostra dobrada com raio de 16mm em paralelo ao sentido de laminação, e a Figura 6(b) representa uma amostra dobrada em paralelo ao sentido de laminação com raio de 5mm. Nestas amostras é possível visualizar os grãos deformados plasticamente, tendendo a se afastarem. É importante ressaltar que este fenômeno também foi observado nas amostras PE 12 e PE 5.



**Figura 6:** Microscopia no Raio externo das amostras: (a) PE 12; (b) PE 5.

#### 4. Conclusões

Pode-se concluir que o processo de dobra pode causar deformações consideráveis na estrutura das chapas e estas podem ser potencializadas de acordo com o raio do punção de dobra, bem como o sentido de laminação da chapa, o que compromete a qualidade das peças fabricadas.

Nos ensaios metalográficos foram identificados deformações em todas as amostras analisadas, sendo que as amostras fabricadas em desacordo com a norma DIN 6935 e em paralelo ao sentido de laminação sofreram deformações mais severas. Essas amostras apresentaram trincas visíveis a olho nu, apesar de não apresentarem trincas durante a análise microscópica.

As amostras analisadas também apresentaram deformação plástica em seus grãos, fazendo com que esses se agrupassem no raio interno da dobra e se afastassem no raio externo. Pelo o ensaio de micro-dureza foi possível perceber o aumento da dureza em todas as amostras, sendo que as amostras fabricadas em desacordo com a norma DIN 6935 tiveram um aumento considerável de sua dureza, o que o torna material mais frágil.

Através da metodologia aplicada neste trabalho e baseado nos resultados obtidos através dos ensaios e caracterizações aplicadas, pode-se afirmar que durante o processo de fabricação de chapas dobradas é imprescindível à aplicação da norma DIN 6935, uma vez que a não utilização da mesma pode resultar no surgimento de trincas nas extremidades das peças, encruamento dos grãos que formam a estrutura cristalina e endurecimento do material na seção dobrada da chapa.

#### 5. Referências

BENSON, S. D. *Reviewing bottom bending and nested parts*, April 2002, thefabricator.com, 2002.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, DAVID G. *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução*. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares, Revisão Técnica José Roberto Moraes d' Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. *Estampagem dos aços inoxidáveis*. ACESITA S. A., 1997.

MORAIS, W. A. de; BORGES, H. C. Adequações nas práticas dos novos processos de corte e dobra para otimizar o desempenho de aços planos. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 7, n. 1-2, p. 54-60. 2010.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. *Tecnologia da Deformação Plástica Vol.II*. Lisboa: Escolar Editora, 2010.

SCHAEFFER, L. *Conformação de chapas metálicas*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SANTOS, R. A. dos. *Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 2013.