

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

PEDRO LUIZ FARIA PERDIGÃO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO  
AISI 444 EM FUNÇÃO DOS MODOS DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA

Belo Horizonte

2015

PEDRO LUIZ FARIA PERDIGÃO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO  
AISI 444 EM FUNÇÃO DOS MODOS DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Wellington Lopes

Coorientador: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Belo Horizonte

2015

PEDRO LUIZ FARIA PERDIGÃO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO  
AISI 444 EM FUNÇÃO DOS MODOS DE SOLICITAÇÃO MECÂNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2015

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Wellington Lopes - Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa - Coorientadora

---

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

---

Prof. Dr. Frederico de Castro Magalhães

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado o dom da vida

Ao professor Wellington Lopes, por toda dedicação, pela orientação durante execução deste e de outros trabalhos.

Ao departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG e departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG, por me proporcionar estrutura para que o trabalho fosse realizado.

Aos meus pais e irmã, pelo apoio incondicional.

A Jessica por todo amor companheirismo e confiança.

Aos meus amigos, pela torcida.

E a todos os demais que fizeram parte desta importante etapa e tornaram a concretização deste trabalho possível.

“As dificuldades são o aço estrutural que entra na construção do caráter”.

(Carlos Drummond de Andrade)

## RESUMO

O estudo do comportamento mecânico dos diferentes tipos de materiais depende de diversas variáveis, dentre as quais, as condições adotadas para a solicitação termomecânica aplicada aos mesmos. Neste caso, as mudanças subestruturais ocasionadas pelos respectivos modos de deformação plástica, assim como a própria ordem de execução dos ensaios, vêm sendo investigadas há muitos anos a partir do que se conhece pelo estudo da influência do caminho ou da trajetória de deformação na resposta mecânica dos materiais. Considerando esse aspecto, esse trabalho apresenta o estudo do comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 444 após o mesmo ser submetido a mudanças no modo de deformação plástica mediante a execução de ensaios monotônicos em cisalhamento, ensaios com inversão do modo de deformação plástica (cisalhamento direto acompanhado por cisalhamento reverso) e após o dobramento de chapas previamente deformadas em cisalhamento direto tendo seu comportamento mecânico caracterizado por meio de micro dureza Vickers. Os resultados indicaram a influência do modo e da quantidade de deformação plástica na habilidade do aço AISI 444 de sofrer deformação plástica, exibindo amaciamento.

**Palavras-chave:** aço AISI 444, encruamento, efeito Bauschinger e dobramento

## **ABSTRACT**

The study of the mechanical behavior of different materials depends of many variables such as the conditions used for the termomechanical efforts applied in them. This manner, substructural changes occasioned by the mode of the plastic deformation and the order that these efforts are applied has been investigated for many researchers using the subject strain path. Considering this aspect, this work presents the study of the mechanical behavior of the ferritic stainless steel: AISI 444 after changes in the mode of plastic deformation under the conduction of monotonic shear tests, strain reversal tests (forward and reverse shearing) and after the bending of sheets prestrained by forward shearing the mechanical behavior will be evaluated by Hardness Vickers. The results indicated the influence of the amount and the mode of the plastic deformation on the formability of the AISI 444 steel, exhibiting softening.

**Keywords:** AISI 444 sttel, hardening, Bauschinger effect and bending.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática de uma curva tensão deformação ilustrando o efeito Bauschinger .....	12
Figura 2 - Diagrama de Schaeffler de diversas classes de aços inoxidáveis .....	14
Figura 3 - Diagrama de equilíbrio Fe-Cr.....	16
Figura 4 -Formação da fase sigma em aços inoxidáveis ferríticos .....	17
Figura 5 - Parâmetros geométricos de uma chapa dobrada.....	21
Figura 6 - Curva tensão-deformação cíclica.....	22
Figura 7 - Dispositivo adaptado à máquina de ensaios universal para cisalhamento .....	27
Figura 8 - Dobradeira manual de chapas.....	29
Figura 9- A – Chapa após dobramento a 90° B- Chapa embutida em Acrílico e lixada .....	29
Figura 10- Pontos de Microdureza Vickers igualmente espaçadas pelo raio de curvatura da chapa dobrada.....	30
Figura 22- Micrografia do aço AISI 444 com aumento de 400x.....	31
Figura 11- Curva tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento monotônico .....	31
Figura 12 - Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 em carregamento cíclico. ....	32
Figura 13 - Curva tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico de uma amostra pré-deformada em 10%. ....	32
Figura 14 - Curva tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico até uma deformação efetiva de 0,30 .....	33
Figura 15 - Curva tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico até uma deformação efetiva de 0,30 .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 16 - Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após pré-deformação de 30% .....	33
Figura 17 - Curva rebatida de tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após sofrer uma pré-deformação.....	34
Figura 18- Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico com amplitude de 10% .....	34
Figura 19 - Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento .....	35



Figura 20 - Curva rebatida de tensão efetiva em função de deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico. ....	35
Figura 21 - Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após sofrer uma pré-deformação de 30% .....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e designação AISI de algumas ligas de aço inoxidável austeníticos e ferríticos.....	15
Tabela 2 - Valores de $\Delta\sigma$ e do Efeito Bauschinger para diferentes modos de solicitação mecânica.....	36
Tabela 3 - Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 444 para diferentes condições de solicitação mecânica. ....	37

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 OBJETIVO .....	13
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos .....	13
3 AÇOS INOXIDÁVEIS .....	14
3.1 Composição Química e Estrutura dos Aços Inoxidáveis .....	15
3.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos .....	16
3.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos .....	17
3.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos .....	18
3.5 Aços Inoxidáveis Duplex ou Austeno-ferríticos .....	18
3.6 Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação .....	19
4 DOBRAMENTO .....	20
5 CARREGAMENTO CÍCLICO .....	22
5.1.1 Mecanismo do efeito Bauschinger .....	23
5.1.1.1 Teoria das Tensões Internas .....	23
5.1.1.2 Teoria do Deslocamento .....	23
5.1.1.3 Modelo Composto .....	24
5.1.2 Quantificação do efeito Bauschinger .....	24
6 MATERIAL e MÉTODOS .....	26
6.1 Material .....	26
6.2 Ensaio de Cisalhamento .....	26
6.2.1 Confecção dos Corpos de Prova .....	26
6.2.2 Metodologia do ensaio .....	26
6.3.1 Carregamento monotônico em cisalhamento.....	28
6.3.2 Cisalhamentos direto e reverso (carregamento do tipo Bauschinger).....	28
6.4 Dobramento de Chapas .....	29

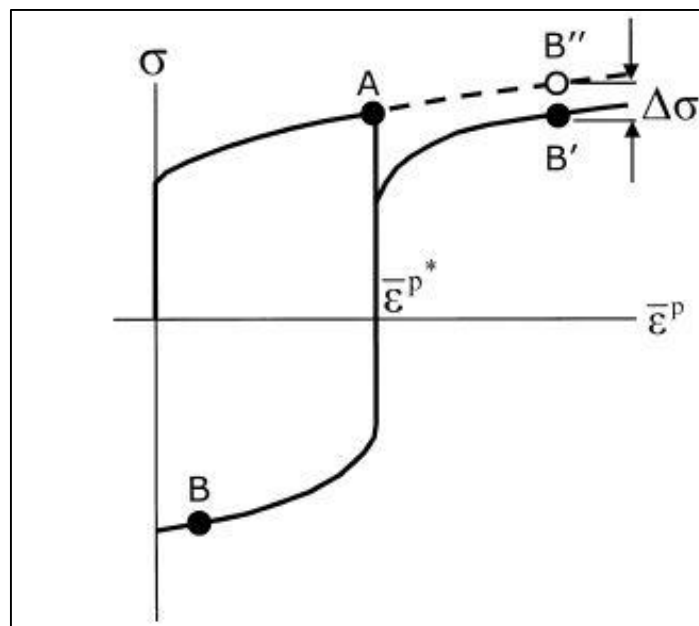
6.5 Caracterização Mecânica Pós Dobramento.....	29
6.6 Caracterização Microestrutural .....	30
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
7.1 Caracterização Microestrutural .....	31
7.2 Carregamento Monotônico .....	31
7.3 Determinação do Amaciamento/Endurecimento e Efeito Bauschinger .....	34
7.4 Caracterização mecânica das chapas dobradas .....	37
CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS .....	39

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Chun *et al.* (2001), em um processo de conformação mecânica de chapas metálicas, pontos do material podem ser submetidos a carregamentos cíclicos de dobramento-desdobração na matriz e, em seguida, um processo inverso no punção (CHUN *et al.*, 2001).

A Figura. 1 ilustra o fenômeno conhecido como Efeito Bauschinger, no qual ocorre a redução da tensão de escoamento quando o material é submetido a um carregamento cíclico, seja ele tração-compressão ou cisalhamento-cisalhamento reverso.

**Figura 1 - Representação esquemática de uma curva tensão deformação ilustrando o efeito Bauschinger**



Fonte: CHUN; JINN; LEE, 2001

O aço AISI 444, produzido nacionalmente pela siderúrgica Aperam S/A, é um dos representantes da família de aços inoxidáveis ferríticos, muito utilizados em indústria de açúcar e álcool, sendo aplicado em praticamente todos os sistemas das usinas além de produtos da linha branca, com peças obtidas por estampagem. Dessa maneira, é de fundamental importância ter conhecimento sobre o comportamento desses aços sob um carregamento cíclico, no que diz respeito ao fenômeno de redução da tensão de escoamento por efeito Bauschinger.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho consiste em estudar a resposta mecânica do aço inoxidável ferrítico AISI 444 mediante mudanças sucessivas no modo de deformação plástica, envolvendo deformação monotônica com mudança da taxa de deformação, deformação com reversão do modo de deformação plástica (carregamento do tipo Bauschinger) e dobramento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

O estudo do comportamento mecânico do aço AISI 444 será feito de modo submeter o material a condições semelhantes a uma operação de estampagem de chapas, executando-se ensaios mecânicos para investigar a influência de diferentes tipos de variáveis no comportamento mecânico desse material, como:

- a) o efeito do modo de deformação plástica: carregamento monotônico em cisalhamento, carregamento com reversão do modo de deformação (carregamento do tipo Bauschinger, a partir da combinação dos carregamentos sob cisalhamento direto e reverso) e dobramento das chapas;
- b) a quantidade de deformação plástica: neste caso, os materiais foram deformados de 0,10 e de 0,30 de deformação cisalhante nos ensaios de cisalhamento com reversão do modo de deformação plástica, no carregamento monotônico antes do dobramento das chapas;
- c) o ângulo de dobramento: 30° e 90°, executado após a pré-deformação em cisalhamento direto.

### 3 AÇOS INOXIDÁVEIS

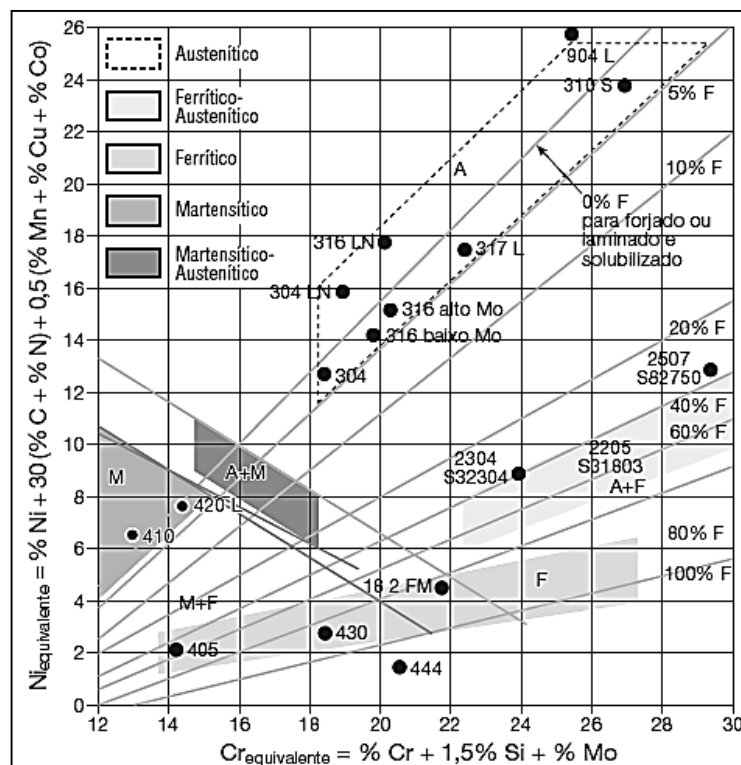
Segundo Padilha (2004), o surgimento dos aços inoxidáveis data de 1912, na Inglaterra, onde o pesquisador Harry Brearley, em dois trabalhos não publicados, descreveu novas ligas resistentes à corrosão, contendo 12,8% de cromo e 0,24% de carbono. Anteriormente, em 1911, nos Estados Unidos, o pesquisador Christian Dantsizen realizou experiência com ligas contendo entre 14 a 16% de cromo e carbono entre 0,007 e 0,015%, caracterizando-o como um aço inoxidável de microestrutura ferrítica (PADILHA; GUEDES, 2004).

Atualmente, o significado moderno para aço inoxidável é, segundo Silva e Mei (2010), ligas de ferro carbono com um percentual de cromo acima de 12%. Apesar de outras bibliografias, como Wayman (1995), colocarem o percentual de cromo ainda menor, na faixa de 11,5%.

A grande diversidade de composição química dos aços inoxidáveis confere características metalúrgicas, mecânicas e químicas distintas. Sua classificação se dá de acordo com a sua estrutura cristalina, sendo divididos em 5 classes: Aços inoxidáveis Martensíticos, Aços inoxidáveis Ferríticos; Aços inoxidáveis Austeníticos; Aços inoxidáveis Duplex; Aços inoxidáveis Endurecidos por Precipitação (SILVA; MEI. 2010).

A Figura 2 indica as regiões de composição química de diferentes classes de aços inoxidáveis.

**Figura 2 - Diagrama de Schaeffler de diversas classes de aços inoxidáveis**



Fonte: COLPAERT, 2008

### 3.1 Composição Química e Estrutura dos Aços Inoxidáveis

Segundo Souza (1995), as ligas de ferro, carbono, alto percentual de cromo e, podendo ou não haver a presença de níquel, são denominados aços inoxidáveis. Os mesmos podem apresentar uma estrutura cristalina matensítica, ferrítica, austenítica ou ainda mais de um constituinte, como no caso dos aços inoxidáveis Duplex.

A microestrutura destes aços é definida pelo potencial que certos elementos de ligas possuem em alterar o diagrama de fase ferro-carbono. Esses elementos podem possuir um potencial alfacêneo, isto é, restringem o campo de austenita  $\gamma$  e estabilizam a fase  $\alpha$  (ferrita). Já elementos como o níquel e manganês possuem potencial gamagêneo, ampliando o campo austenita no diagrama ferro-carbono, estabilizando-o à temperatura ambiente. A Tabela 1 a seguir ilustra os principais tipos de aços inoxidáveis e suas respectivas composições químicas.

**Tabela 1 - Composição química e designação AISI de algumas ligas de aço inoxidável austeníticos e ferríticos**

Designação AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Outros
304	0,08	2,0	1,0	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304H	0,04-0,010	2,0	1,0	18,0-20,1	8,0-10,6	0,045	0,03	
310	0,25	2,0	1,5	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
316	0,08	2,0	1,0	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0 Mo
316L	0,03	2,0	1,0	16,0-18,1	10,0-14,1	0,045	0,03	2,0-3,0 Mo
430	0,12	1,0	1,0	16,0-18,0		0,04	0,03	
405	0,08	1,0	1,0	11,5-14,5		0,04	0,03	0,10-0,30 Al
444	0,025	1,0	1,0	17,5-19,5	1,0	0,04	0,03	1,75 -2,5 Mo; 0,025 N 0,2 + 4 (%C, %N) min 0,8 max (Ti +Nb)

Fonte: ASM, 1992

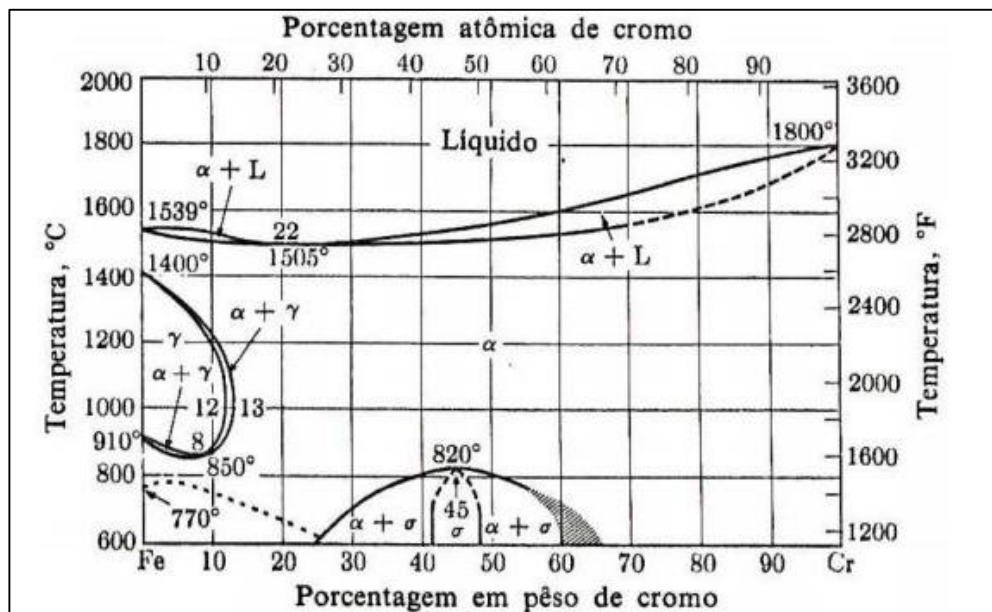


### 3.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

De uma maneira geral, Souza (1995) classifica os aços ferríticos como aços que apresentam alta resistência a corrosão, seja ela por meio líquido, por oxidação a altas temperaturas, por pitting ou por corrosão sob tensão. Além disso, apresentam boa conformabilidade a frio, o que o torna um aço com custo menor quando comparado a outros tipos de aços inoxidáveis.

Silva e Mei (2010) definem os aços inoxidáveis ferríticos como aços cuja composição de constituintes se situa à direita do campo austenítico no diagrama Fe-Cr, com uma microestrutura constituinte, essencialmente, de ferrita em todas as temperaturas até sua fusão. A Figura 3 a seguir ilustra o diagrama Fe-Cr e as regiões de diferentes microestruturas.

**Figura 3 - Diagrama de equilíbrio Fe-Cr**



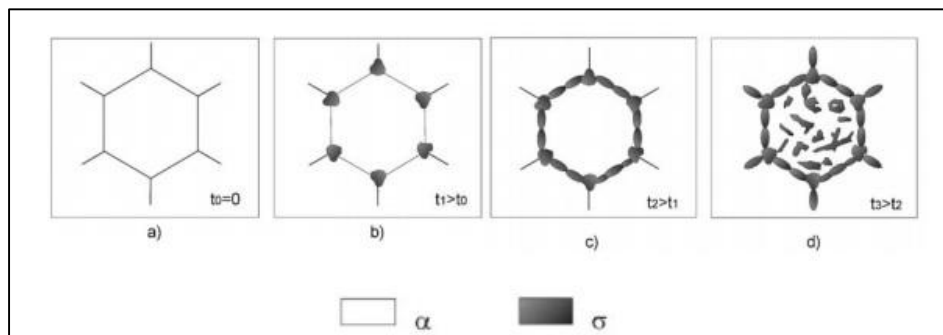
Fonte: ASM, 1992

Apesar da definição de Silva e Mei, Colpaert (2008) adverte que a maioria dos aços denominados ferríticos não apresentam somente ferrita. Como exemplo, o aço AISI 430, pode apresentar de 30 a 50% de austenita em temperaturas superiores a 800°C. Dessa maneira, dependendo dos parâmetros de resfriamento, a estrutura bruta de forjado desse material pode apresentar uma microestrutura constituída de ferrita e martensita. Porém, segundo Silva e Mei (2008), aços inoxidáveis ferríticos são normalmente comercializados em sua forma recozida, geralmente tratados a temperaturas acima de 750°C, temperatura na qual a martensita se decompõe.

De acordo com Souza (1995), um grande problema que deve ser evitado nos aços de microestrutura ferrítica é a possível precipitação da fase  $\sigma$ , que reduz a tenacidade e a resistência à corrosão do material. A fase  $\sigma$  apresenta uma estrutura cristalográfica tetragonal de corpo centrado (TCC) com 30 átomos por célula unitária, rica em elementos alfacêneos, como cromo, molibdênio e silício (Oliveira, 2011).

Para Oliveira (2011), o percentual de cromo na fase  $\sigma$  pode variar de 45 a 50% em peso, sendo que a precipitação dessa fase ocorre de modo preferencial nos pontos triplos do contorno de grão da ferrita- $\delta$ . Para ligas contendo entre 20 a 70% de cromo, sua formação se dá na faixa de temperatura entre 600 e 900 °C. O diagrama de equilíbrio Fe-Cr da Figura 4 ilustra a reação eutetoide de decomposição da ferrita- $\delta$  em uma fase  $\sigma$  e austenita secundária, que, por sua vez, é pobre em elementos anticorrosivos, como cromo, molibdênio e nitrogênio, portanto, susceptível à corrosão.

**Figura 4 -Formação da fase sigma em aços inoxidáveis ferríticos**



Fonte: Oliveira, 2011

### 3.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Segundo Silva e Mei (2010), os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns, apresentando elevada resistência a corrosão e tenacidade, além de boa soldabilidade. Os aços de microestrutura austenítica, por possuírem uma estrutura cristalina do tipo cúbica de faces centradas (CFC), não apresentam uma transição dúctil-frágil, sendo preferidos em relação às demais classes de aço inoxidáveis para aplicações criogênicas, bem como para trabalho a altas temperaturas, devido à resistência a deformação a quente.

A microestrutura austenítica dessa classe de aços só é possível a temperatura ambiente devido ao potencial gamagêneo do Níquel, presente em teores que variam de 6 a 22%, com valores médios entre 18 e 8% (CHIAVERINI, 2005).

O mecanismo de endurecimento dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser obtido de duas maneiras: trabalho mecânico a frio e adição de elementos que promovem um acréscimo nos valores de resistência mecânica, como carbono, nitrogênio, manganês, além de silício,

vanádio, tungstênio, nióbio, titânio ou alumínio (SOUZA, 1995).

No que diz respeito a trabalho mecânico a frio, Silva e Mei (2010) classificam os aços inoxidáveis austeníticos em duas categorias: os austeníticos estáveis e os austeníticos metaestáveis. Nos aços com austenita estável, mesmo após grandes quantidades de deformação, ocorre a retenção da austenita. Já nos aços metaestáveis com trabalho a frio, ocorre uma transformação de fase para martensita  $\alpha'$  e  $\epsilon$ . Diferentemente da martensita dita "comum", que é uma solução supersaturada de carbono com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC), a martensita  $\alpha'$  apresenta-se na forma cúbica de corpo centrado (CCC) e a martensita  $\epsilon$ , na forma de cristais hexagonais compactos (HCP) (SALES, 2013).

### **3.4 Aços Inoxidáveis Martensíticos**

Os aços inoxidáveis martensíticos são ligas metálicas ferrosas com teores de cromo variando entre 12% e 17% de carbono, em geral, superior a 0,1%, podendo chegar a 1,0%. (COUTINHO, 1992)

Os aços inoxidáveis martensíticos são aços capazes de serem endurecidos através do tratamento térmico de beneficiamento, isto é, têmpera e revenimento. Essa classe dos aços inoxidáveis, assim como os aços carbono, são subclassificadas, de acordo com o teor de carbono, em aços de baixo, médio e alto teor de carbono. A temperatura de austenitização dos aços martensíticos varia entre 925 a 1070°C de modo a obter completa solubilização dos carbonetos. (COLPAERT, 2008)

### **3.5 Aços Inoxidáveis Duplex ou Austeno-ferríticos**

Os aços inoxidáveis duplex são ligas de aço resistentes à corrosão que possuem microestruturas que consistem em frações semelhantes das fases ferrita e austenita. Sendo assim, também são chamados de aços ferríticos-austeníticos.

Essa microestrutura peculiar, formada por esses dois constituintes, é alcançada devido ao aumento do teor de cromo, molibdênio e nitrogênio. Este último, devido ao seu pequeno raio atômico, atua como soluto intersticial aumentando a resistência mecânica dessas ligas. Já o cromo e molibdênio atuam elevando a resistência a corrosão dos aços duplex. Porém, essas alterações de composição aceleram a cinética de precipitação da fase  $\sigma$ , além de outras fases intermetálicas como a fase  $\chi$  (chi) de composição química  $\text{Fe}_{30}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_4$  (COLPAERT, 2008).

Krauss (1990) afirma que, em termos de composição química, os teores de cromo e níquel nos aços austenoferríticos variam entre 17 e 30% e 3 e 13%, respectivamente. Apesar de possuir propriedades favoráveis de ambas as fases presentes em sua microestrutura, como elevada resistência mecânica e tenacidade e boa resistência à corrosão, a composição química

das ligas duplex apresentam limitações quanto a possibilidade de precipitação de fases secundárias como, carbonetos, nitretos e compostos intermetálicos (FARGAS et al., 2009).

### **3.6 Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação**

Segundo Colpaert (2008), os aços inoxidáveis endurecidos por precipitação são classificados em 3 subclasses: austeníticos, semi-austeníticos e martensíticos.

Essa classe de aços inoxidáveis geralmente contém um teor reduzido de carbono, variando entre 0,04 e 0,10%, teores de manganês, cromo e silício entre 0,40 a 0,75%, 15 a 17% e 0,25 a 0,50%, respectivamente, além de outros elementos como o cobre, nióbio e alumínio. (CHIAVERINI, 2005)

O endurecimento desses aços se dá através do tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. O material é resfriado a uma velocidade suficientemente rápida, a fim de evitar o aparecimento de compostos intermetálicos. A vantagem desse tipo de endurecimento é a temperatura de envelhecimento relativamente baixa, o que diminui problemas como distorções, trincas e descarbonetação pós tratamento térmico. (COLPAERT, 2008)

## 4 DOBRAMENTO

O manual de Estampagem dos Aços Inoxidáveis da Acesita define estampagem como:

Um conjunto de operações de conformação a frio (corte, furação, dobramento e repuxo), realizadas na região plástica de deformação dos materiais, pela imposição de uma deformação permanente de uma chapa, com o objetivo de produzir peças com determinada forma.

(MESQUITA, RUGANI, 1997, p.11).

De acordo com Schaeffer (2009), a norma DIM 8580 divide o processo de estampagem em dois grupos principais:

Processos de conformação;

Processos de separação.

O grupo de conformação está relacionado a processos que resultem na modificação da geometria de uma determinada peça, sem variação no volume inicial da peça, ou seja, sem perda de material. Como exemplo, pode-se citar a operação de estampagem profunda e o dobramento de chapas. Já o grupo de processos de separação está relacionado a procedimentos em que há perda de material. Pertence a esse grupo o corte por cisalhamento, por exemplo.

Dieter (1981) classifica os processos de estampagem como operações unitárias:

- Dobramento;
- Cisalhamento;
- Estiramento;
- Embutimento.

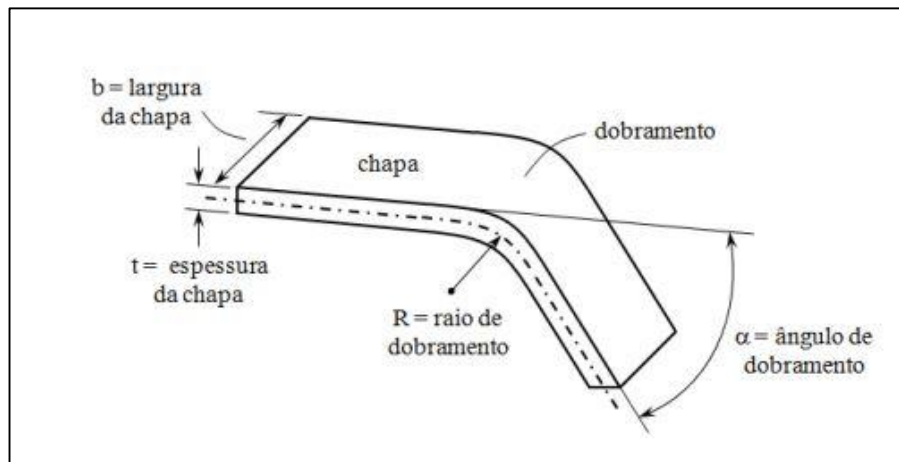
A operação de dobramento pode ser responsável por uma parte da deformação em outros processos de deformação. Por isso, é o tipo de mais comum de operação de estampagem de chapas (DIETER, 1981).

Segundo Dieter (1981), no processo de dobramento ocorre a aplicação forças que geram momentos fletores à chapa, que promove o desenvolvimento do chamado raio de dobramento, ou seja, o raio de curvatura da superfície interna da chapa. Através de um mecanismo de deformação plástica, as fibras da superfície externa da chapa estão sujeitas a esforços de tração, enquanto as fibras da superfície interna estão sujeitas a esforços compressivos.

Bresciani Filho et. al. (2011) ressaltam que, devido à atuação de esforços de tração na região externa da chapa e de compressão na interna, existe um ponto perpendicular à chapa, na direção do raio, em que as tensões são nulas chamado de linha neutra.

Com relação a parâmetros geométricos do processo de dobramento, Sales (2013), define o raio de dobramento  $R$  como o raio de curvatura interna da peça e o ângulo  $\alpha$  como o ângulo entre as duas superfícies internas da chapa, após a operação de dobramento conforme Figura 5. A espessura da chapa a ser processada por dobramento é um parâmetro de controle de processo extremamente importante, já que durante a conformação ocorre uma mudança no valor da espessura de maneira inversamente proporcional ao raio de dobramento, isto é, quanto menor for o raio, maior redução irá ocorrer.

**Figura 5 - Parâmetros geométricos de uma chapa dobrada**



Fonte: SALES, 2013

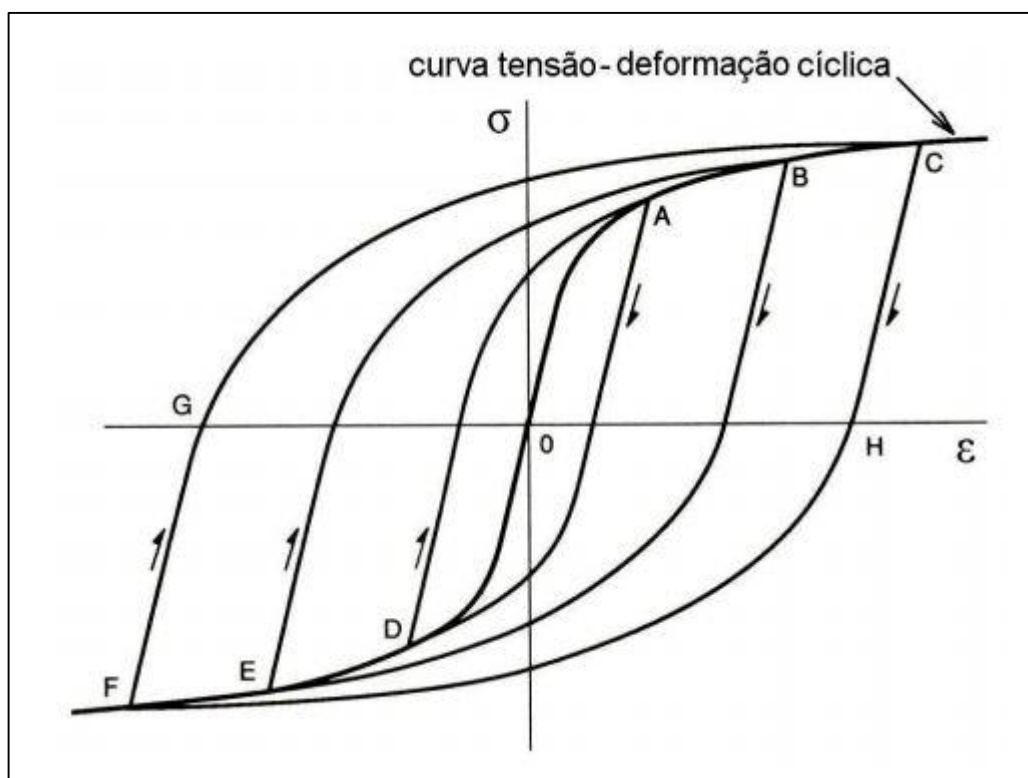
## 5 CARREGAMENTO CÍCLICO

De acordo com Souza (2012), o comportamento mecânico do material em resposta a um esforço cíclico pode variar de duas maneiras: endurecimento ou amaciamento cíclico, a depender de variáveis como estado inicial do material, tipo de tratamento térmico ou processamento mecânico anterior e as condições de ensaio e/ou processamento mecânico.

Conforme Buciumeanu et al (2011), as curvas tensão deformação de um material submetido a um ciclo de carregamento em uma direção e, em seguida, revertido para direção contrária, frequentemente resultam em um fenômeno denominado histerese elástica. Isto é, as curvas de carregamento e descarregamento ou carregamento reverso não coincidem.

Esse comportamento, segundo Dieter (1981), é observado em carregamentos mecânicos, no qual o material possui um comportamento distinto, dependendo do sentido do carregamento, conforme ilustrado pela Fig.6.

**Figura 6 - Curva tensão-deformação cíclica**



Fonte: SOUZA, 2012

### 5.1 Efeito Bauschinger

Segundo Dieter (1981), o comportamento mecânico real dos materiais, como anisotropia plástica, histerese elástica e efeito Bauschinger, não é tratado de forma precisa pela teoria da plasticidade, sem que haja um aumento considerável no nível de complexidade.

Esse fenômeno foi percebido pela primeira vez em 1881, pelo engenheiro alemão Johann Bauschinger (THIAGO, 2009). O efeito anisotrópico é gerado por um ciclo de deformação, no qual, após sofrer deformação plástica e encruamento em um sentido e ao se inverter o sentido de carregamento, o material apresentará uma tensão de escoamento menor que a tensão inicial.

Weinmann et al. (1998), em seu trabalho sobre a influência do efeito Bauschinger no dobramento de chapas, reconhecem a importância do estudo para o entendimento do efeito em operações de estampagem, principalmente em operações de dobramento na quais o material passa por três sequências de dobramento e desdobramentos, além de mais um ciclo durante o movimento de entrada da chapa na cavidade da matriz.

### **5.1.1 Mecanismo do efeito Bauschinger**

Segundo Haus (2011), o efeito Bauschinger pode ser explicado por duas teorias principais, teoria das tensões internas e teoria do deslocamento, além de uma terceira, que é um modelo composto pelas duas teorias anteriores.

#### **5.1.1.1 Teoria das Tensões Internas**

De acordo com Haus (2011) a teoria das tensões internas é baseada em 3 princípios fundamentais:

- O material é composto de elementos de volume infinitesimal, cuja curva tensão-deformação possui um comportamento ideal, isto é, sem o efeito do mecanismo de endurecimento por encruamento:
- As tensões de escoamento dos elementos infinitesimais não são iguais.
- O módulo do limite de elasticidade é independente da tensão de deformação, seja ela em compressão ou em tração.

A partir desses fundamentos teorizou-se que durante a deformação plástica ocorre uma não homogeneidade na distribuição de tensões sobre o material, gerando, após a descarga, tensões residuais responsáveis pela redução da elasticidade em um carregamento reverso.

#### **5.1.1.2 Teoria do Deslocamento**

Para Haus (2011), a Teoria das Tensões Internas se torna insuficiente frente ao grande número de estudos que demonstram a ocorrência do efeito Bauschinger em monocristais. Foi desenvolvida uma teoria diferente das tensões internas, que sugere que durante a primeira fase de um carregamento cíclico, uma extensa faixa de tensões é produzida por meio do empilhamento de discordâncias em obstáculos, tais quais: contornos de grão, micro inclusões e etc.



Esses obstáculos bloquearão o movimento de discordâncias, gerando tensões centrais, denominadas por Haus (2011) como back stresses, que irão auxiliar o movimento na direção oposta.

Segundo Kassner (2009), as discordâncias durante o encruamento encontram obstáculos e, conforme o carregamento prossegue, a energia necessária para sobrepassá-las aumenta (encruamento). Em um carregamento reverso, as discordâncias irão facilmente superar esses obstáculos devido à energia absorvida no primeiro carregamento. Dessa maneira, a tensão de deformação inicial em um carregamento cíclico é geralmente maior que a tensão reversa.

### **5.1.1.3 Modelo Composto**

O modelo composto explica, segundo Kassner (2009), o efeito Bauschinger por meio do princípio que o material é composto por regiões que, apesar de apresentarem a mesma constante elástica, apresentam diferentes limites de escoamento. Essas regiões podem ser chamadas de Hard, ou duro, região de alta densidade de paredes de discordâncias, ou Soft (macio), regiões de baixa densidade de discordâncias, por exemplo, interiores de contornos de grão.

Dessa maneira, em um carregamento cíclico, na primeira fase, após o carregamento, uma fase terá tensão de residual de tração enquanto a outra terá de compressão. Dessa maneira, durante o carregamento reverso, as tensões residuais do componente macio irão gerar uma deformação plástica prematura, caracterizando como o efeito Bauschinger.

### **5.1.2 Quantificação do Efeito Bauschinger**

Segundo Zang et al. (2014), o comportamento mecânico de uma chapa submetida a um carregamento cíclico é extremamente importante para definição de parâmetros de processos. Existem vários métodos de investigação do comportamento ciclo-mecânico dos materiais, porém, é possível dividi-los em três categorias principais: tração-compressão monotônica, ciclo de cisalhamento simples monotônico e ciclo de dobramento-dobrimento reverso.

Os ensaios do tipo tração-compressão monotônica são utilizados para medir o comportamento sobre um carregamento cíclico uniaxial, porém são limitados na medida em que ocorre o fenômeno de flambagem do corpo de prova. Como forma de contornar esse problema, foi proposta a utilização de duas placas de estabilização lateral para prevenir a flambagem do corpo de prova. Entretanto, a utilização destes dispositivos gera uma tensão de fricção e um estado biaxial de tensões que levam a um aumento na complexidade do ensaio (YOSHIDA, 2002).

Para atingir altos níveis de deformação em um carregamento cíclico, um método que desde última década tem sido muito utilizado é o carregamento cisalhante simples. Nessa técnica um corpo de prova retangular é deformado de maneira perpendicular a uma de suas arestas, no comprimento, de forma que um lado permanece fixo (ZANG et al., 2014). Porém, segundo Bouvier et al. (2006), essa técnica apresenta como desvantagem o fato que a deformação por cisalhamento simples pode não ser homogênea e que o estado de tensões cisalhantes simples é complexo, o que resulta na influência da anisotropia planar na medição da tensão cisalhante (Thuillier e Manach, 2009).

Segundo Zang et al. (2014), o procedimento de dobramento-dobramento reverso é inapropriado para investigação do mecanismo de endurecimento unidirecional das amostras, sendo, portanto, mais apropriado utilizar este método como um procedimento auxiliar na investigação do efeito Bauschinger.

## **6 MATERIAL E MÉTODOS**

### **6.1 Material**

Neste trabalho foram utilizadas chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 444 cedidas pela empresa Aperam South America, com espessura nominal 1,0 laminadas a frio.

Este aço foi escolhido para a realização deste trabalho por ser utilizado em diversas operações de estampagem de chapas, principalmente na indústria de açúcar e álcool, sendo aplicado em todos os sistemas das usinas, exceto os sistemas de sulfitação, no qual se deve empregar o aço inoxidável austenítico 316L, ideal para fermentadores.

### **6.2 Ensaios de Cisalhamento**

#### **6.2.1 Confeção dos Corpos de Prova**

Foram cortados, a partir de uma chapa do material no estado como recebido, 22 corpos de prova para ensaio de cisalhamento, cortados na direção de laminação da chapa.

Apesar de não haver uma sistematização normativa a respeito das dimensões dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento planar simples, Rauch (1992) sugere que as dimensões mínimas devem possuir uma razão entre comprimento e largura efetiva ao cisalhamento maior que 10, de forma a assegurar uma distribuição de tensão e deformação homogênea durante o ensaio, garantindo a correta fixação do corpo de prova no equipamento.

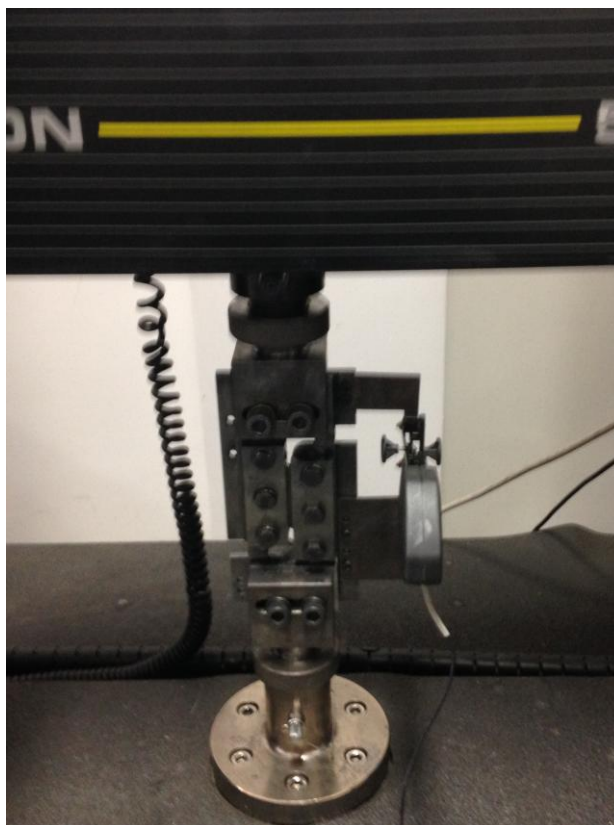
A largura efetiva da garra do dispositivo de ensaio é 3,5mm de largura, de forma que o comprimento mínimo do corpo de prova deve ser de 35mm.

Os corpos de prova foram cortados em uma guilhotina modelo Newton TM 10 disponibilizada pelo laboratório de caldeiraria do departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT).

#### **6.2.2 Metodologia do ensaio**

Os ensaios de cisalhamento foram executados de dois modos: cisalhamento monotônico e cisalhamentos direto e reverso para execução do carregamento do tipo Bauschinger e quantificação do amaciamento/endurecimento. Para realizar o ensaio, foi utilizado um dispositivo desenvolvido por Lopes (2009), adaptado à máquina de ensaios universais Instron 5582 e o extensômetro Instron, Modelo 2630-100 com 25 mm de abertura, conforme Figura 7:

**Figura 7 - Dispositivo adaptado à máquina de ensaios universal para cisalhamento**



Fonte: Autor

A taxa de deformação aplicada ( $\epsilon_{\text{cisalhante}}$ ) foi de  $0,005 \text{ s}^{-1}$ , sendo a velocidade do cabeçote da máquina de ensaios ( $v$ ) determinada de acordo com a equação (1):

$$v = \epsilon_{\text{cisalhante}} \times 60 \times b \times F \quad (1)$$

Sendo  $b$  a largura efetiva do corpo de prova e  $F$  uma estimativa da razão dos fatores de Taylor para esforços de tração e cisalhamento.

Os dados fornecidos pelo software de aquisição de dados Blue Hill 2 foram trabalhados de forma a se obter o valor de deformação cisalhante. Baseado no valor máximo de abertura do extensômetro de 25mm e na largura efetiva de cisalhamento que é padrão do equipamento, foi possível chegar a uma função de conversão entre a deformação em tração/compressão fornecido pelo software para um valor de deformação cisalhante, conforme as equações (2) e (3).

$$\gamma = \frac{\Delta L}{\Delta X} \quad (2)$$

$$\Delta L = \frac{\text{Strain } 1\% \times 25\text{mm}}{100\%} \quad (3)$$

Sabendo que  $\Delta X$  é um valor fixo da largura efetiva de cisalhamento que é padrão do equipamento sendo igual a 3,5mm. Associando-se as equações (2) e (3), tem-se a equação (4):

$$\gamma = \frac{\text{strain}1\%}{4*3,5} \quad (4)$$

Após a determinação da deformação cisalhante, foi utilizado o fator de correção de Taylor de 1,84, conforme Lopes (2009), para determinar o valor da tensão e da deformação efetiva. Desta maneira, para cálculo da deformação efetiva dividiu-se o valor da deformação cisalhante por 1,84 e para determinação da tensão efetiva multiplicou-se o valor da tensão cisalhante por 1,84.

### 6.3.1 Carregamento monotônico em cisalhamento

As amostras foram deformadas monotonicamente de 0,10 e de 0,50 de deformação efetiva.

### 6.3.2 Cisalhamentos direto e reverso (carregamento do tipo Bauschinger)

Neste caso, as amostras foram deformadas sob taxa de deformação de 0,005/s até 0,10 e 0,30 de deformação efetiva sob cisalhamento direto e, em seguida, foram submetidas ao cisalhamento reverso para as mesmas quantidades de deformação praticadas durante o carregamento em cisalhamento direto.

Para a determinação do grau de amaciamento/endurecimento das amostras, os dados foram manipulados de forma a transformar os valores negativos de tensão do ciclo reverso em positivos e eliminar o efeito do retorno elástico nos dados de forma a somente trabalharmos com a porção plástica da curva tensão-deformação efetiva.

O grau de amaciamento foi determinado utilizando o valor de  $\Delta\sigma$  que é calculada conforme equação (5).

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx cis direto}} - |\sigma_{\text{máx cis reverso}}| \quad (5)$$

Sendo que para  $\Delta\sigma > 0$  indica que houve um amaciamento e para  $\Delta\sigma < 0$ , endurecimento.

O efeito Bauschinger foi calculado da seguinte maneira: a diferença entre o maior valor de tensão no carregamento cíclico e o primeiro valor de tensão do regime plástico do carregamento conforme equação 6.

$$\text{Efeito Bauschinger} = \sigma_{\text{máx cis direto}} - \sigma_{\text{mín cis reverso regime plástico}} \quad (6)$$

#### 6.4 Dobramento de Chapas

Os ensaios de dobramento foram realizados na dobradeira mecânica WPM, disponibilizada pelo laboratório de caldeiraria do DEMAT, conforme Figura 8, para as amostras pré-deformadas em cisalhamento direto de 0,10 e de 0,30 de deformação efetiva, sendo escolhidos dois ângulos de dobramento: 30° e 90°.

**Figura 8 - Dobradeira manual de chapas**



Fonte: Autor

#### 6.5 Caracterização Mecânica Pós Dobramento

Depois de realizado o dobramento das chapas, conforme Figura 9, as amostras dobradas foram aparadas, por meio de uma guilhotina manual, deixando somente uma região próxima ao raio de dobramento. As amostras dobradas foram embutidas em acrílico autopolimerizante e tiveram uma preparação metalográfica utilizando lixadeiras Struers, iniciando com uma lixa de # 200, #320, #400 e #600.

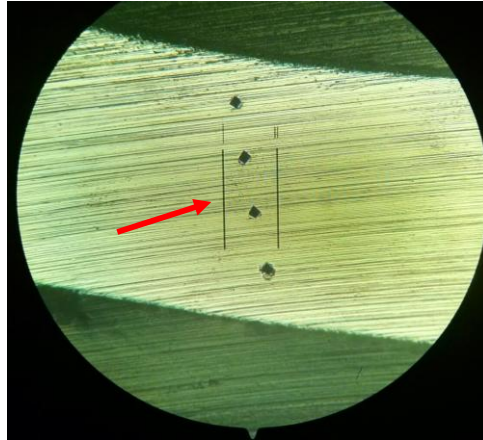
**Figura 9– A – Chapa após dobramento a 90° B- Chapa embutida em Acrílico e lixada**



Fonte: Autor

Em seguida, as amostras foram analisadas no microdurômetro Shimadzu, modelo HMV, com carga de indentação de 300gf e tempo de aplicação do esforço mecânico de 15 segundos. Foram feitas 4 medidas de dureza espaçadas igualmente 0,190 mm pelo raio de curvatura das chapas dobradas. A figura a 10 ilustra os pontos de indentação.

**Figura 10– Pontos de Microdureza Vickers igualmente espaçadas pelo raio de curvatura da chapa dobrada**



Fonte: Autor

### **6.6 Caracterização Microestrutural**

A caracterização microestrutural do aço AISI 444 no estado como recebido foi feita a partir da realização de ensaios metalográficos, sendo feito o corte das amostras com uso de um cortadora metalográfica (sem identificação), embutimento a frio com resina de acrílico autopolimerizante, lixamento com uso de lixas de 240, 320, 400 e 600 mesh em lixadeiras Struers, com posterior polimento em pasta de diamante com granulometria de  $9\mu\text{m}$  e de  $3\mu\text{m}$  com a utilização de politrizes Struers. Por fim, as amostras foram atacadas com uso do reativo químico Vilella modificado: 1g de ácido pícrico, 5ml de ácido clorídrico (HCl) e 100ml de álcool etílico (etanol) para serem digitalizadas em um microscópio Fortel com sistema de aquisição de imagens.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Caracterização Microestrutural

O aspecto microestrutural do aço AISI 444 no estado como recebido pode ser visualizado na Figura 21, por meio das imagens obtidas com o microscópio óptico.

**Figura 11- Micrografia do aço AISI 444 com aumento de 400x**



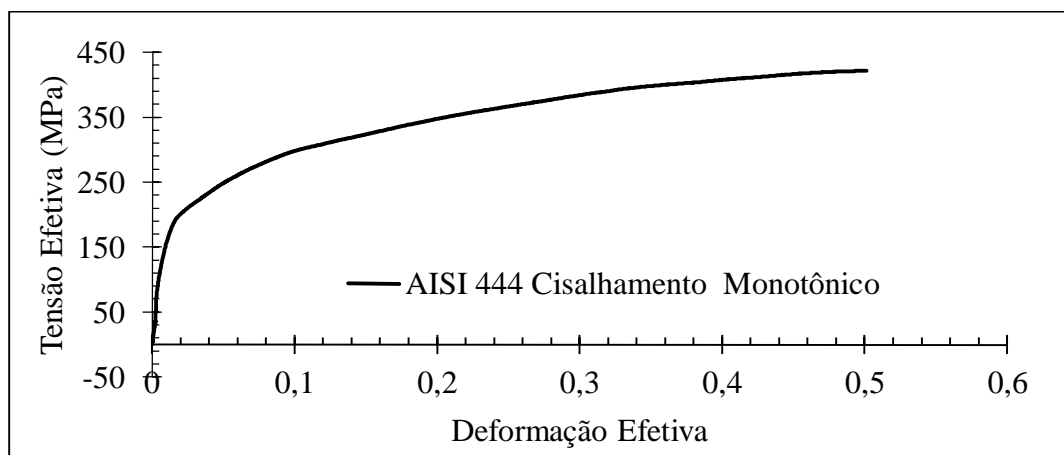
Fonte: Autor

Percebeu-se que a amostra se apresenta com uma microestrutura composta por grãos de ferrita equiaxial, conforme esperado para esse tipo de aço. Os pontos pretos visíveis na imagem são provavelmente pontos de maior corrosão durante o ataque químico com o reagente Vilella.

### 7.2 Carregamento Monotônico

A figura 11 mostra a curva de tensão em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado como recebido após carregamento cisalhante monotônico.

**Figura 12- Curva tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento monotônico**



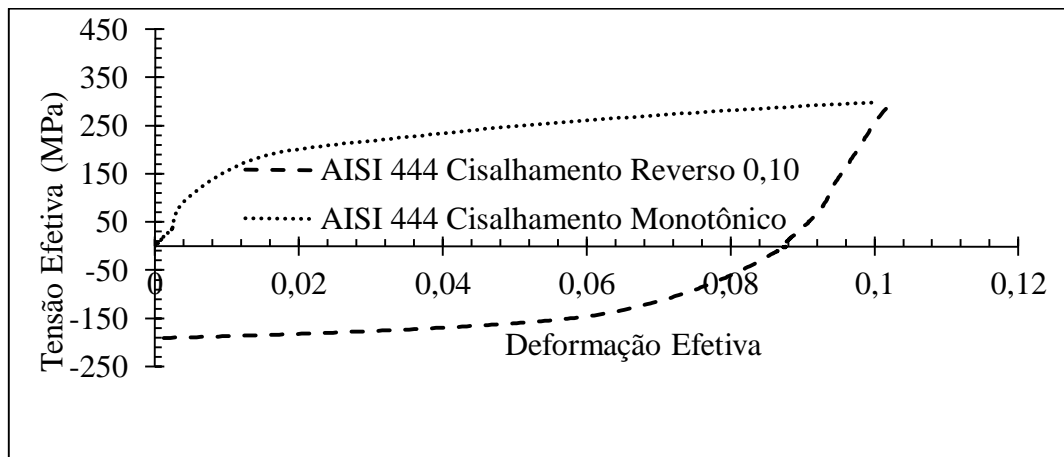
Fonte: Autor



Para esta condição, o aço apresentou uma tensão efetiva máxima de 421,78 MPa para uma deformação efetiva de 0,50.

Na figura 12 são apresentadas as curvas de tensão-deformação efetiva após o carregamento cíclico com amplitude de 0,10 de deformação efetiva, sendo exibido ainda o carregamento monotônico para mesma quantidade de deformação efetiva apenas para servir de referência.

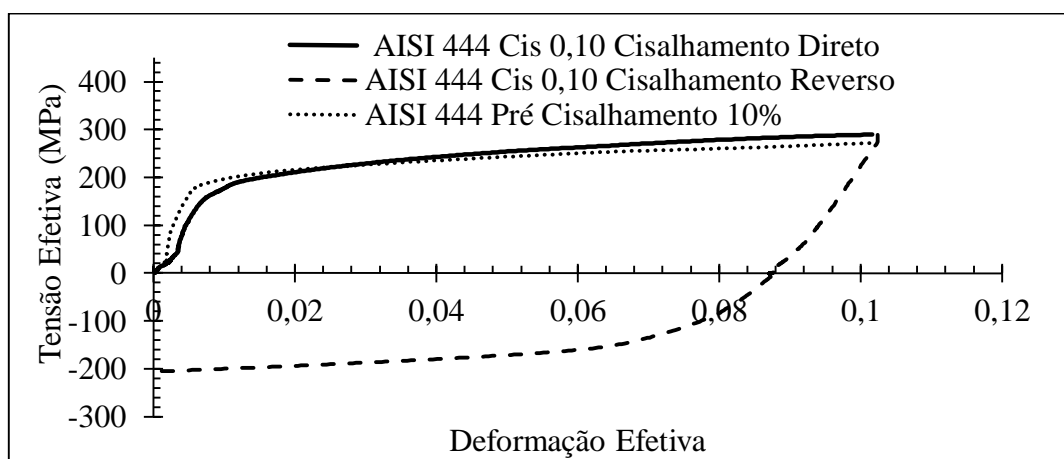
**Figura 13 - Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 em carregamento cíclico.**



Fonte: Autor

A evolução ilustrada na Figura 13 foi, inicialmente, pré-deformado 0,10 e, em seguida, sofreu um ciclo de cisalhamento direto e reverso com uma deformação de 0,10.

**Figura 14 - Curva tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico de uma amostra pré-deformada em 10%.**

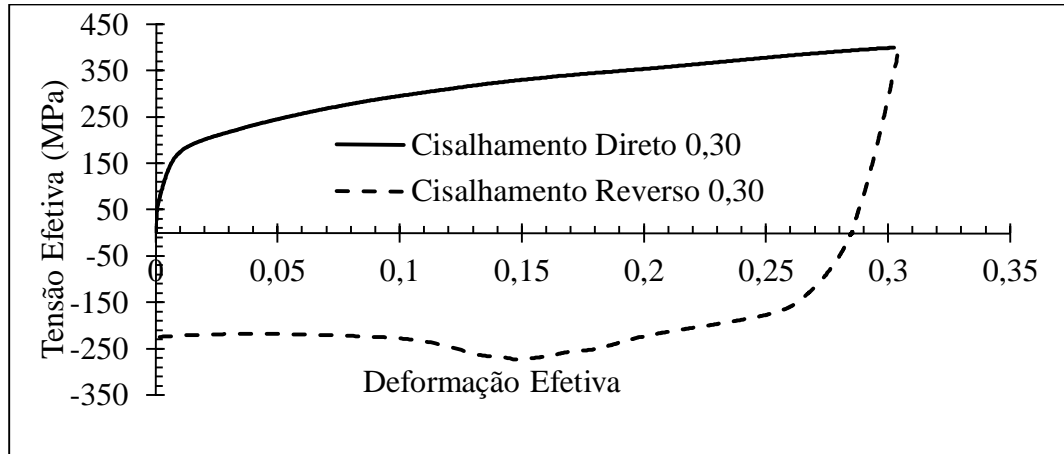


Fonte: Autor

Verificou-se pela análise da figura 13 o endurecimento por deformação a frio (encruamento) ocorrido quando se compara o posicionamento da curva de cisalhamento direto acima da curva de pré-cisalhamento.

As Figuras 14 abaixo ilustra ciclo de cisalhamento direto e reverso para uma deformação de 30%. Percebeu-se que o comportamento da amostra do carregamento direto teve um comportamento muito semelhante ao carregamento monotônico.

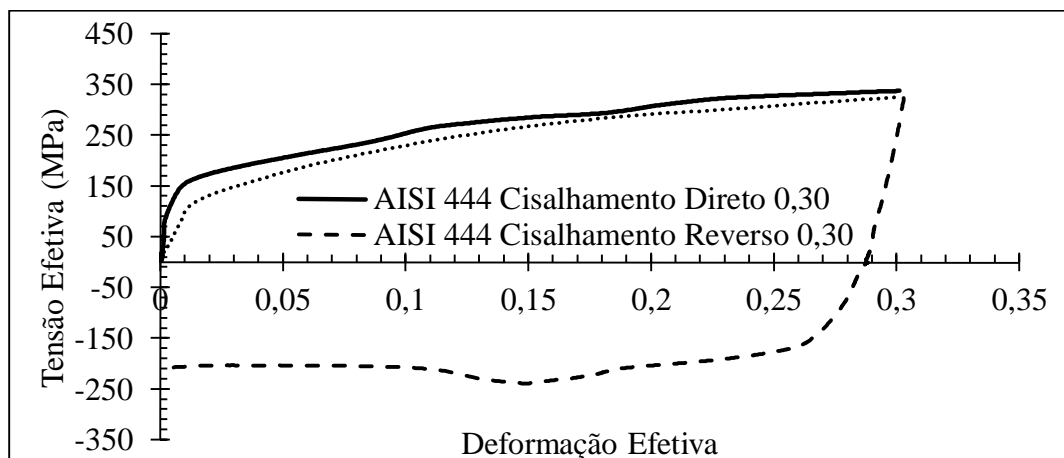
**Figura 15 - Curva tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico até uma deformação efetiva de 0,30**



Fonte: Autor

Na Figura 15 a seguir foi realizado um pré-cisalhamento até 30% de deformação efetiva e, em seguida a amostra foi submetida a um ciclo de carregamento direto e reverso. Observou-se que houve um aumento no valor da resistência mecânica entre a pré-deformação e o carregamento direto, consequência do efeito endurecedor do encruamento, sendo este maior que o observado para deformação de 0,10.

**Figura 165 - Curva tensão efetiva em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após pré-deformação de 30%.**



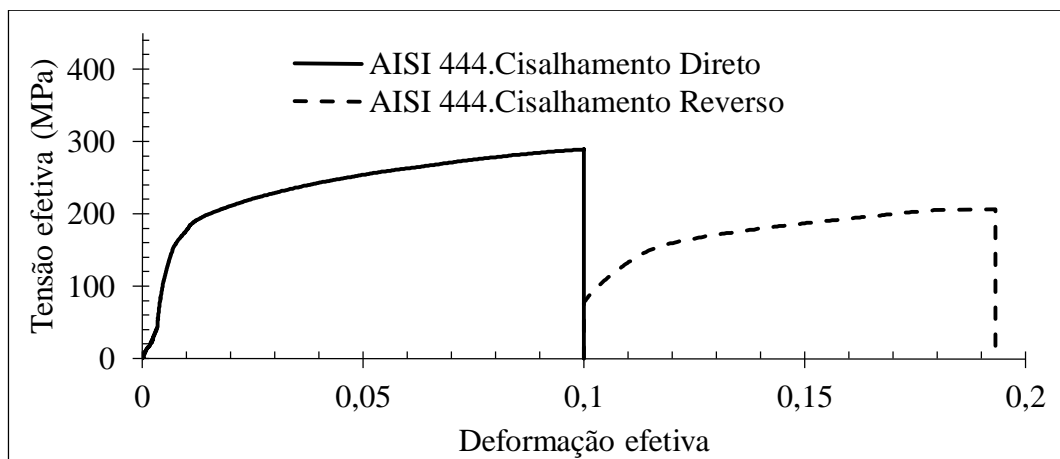
Fonte: Autor

### 7.3 Determinação do Amaciamento/Endurecimento e Efeito Bauschinger

Para determinar o comportamento do aço quando submetido a diferentes modos de solitação mecânica e quantificar tanto o amaciamento dito comum, variação da tensão após a mudança do modo de deformação, quanto o efeito Bauschinger, as curvas do cisalhamento reverso foram rebatidas para permitir a comparação com a curva do cisalhamento direto de forma a tornar clara o comportamento de cada amostra.

A Figura 16 ilustra o comportamento do aço inoxidável ferrítico AISI 444 quando submetido a um carregamento cíclico com amplitude de 10% de deformação efetiva, porém, após sofre um pré-carregamento de 10%.

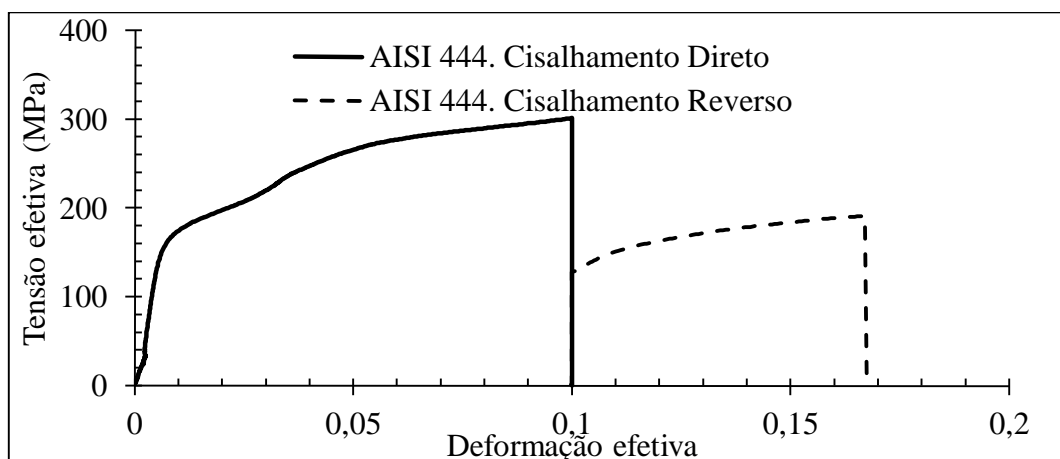
**Figura 16- Curva rebatida de tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após sofrer uma pré-deformação**



Fonte: Autor

A Figura 17 ilustra o comportamento mecânico do aço quando submetido a um carregamento cíclico com 0,10 de amplitude de deformação.

**Figura 17- Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico com amplitude de 10%**

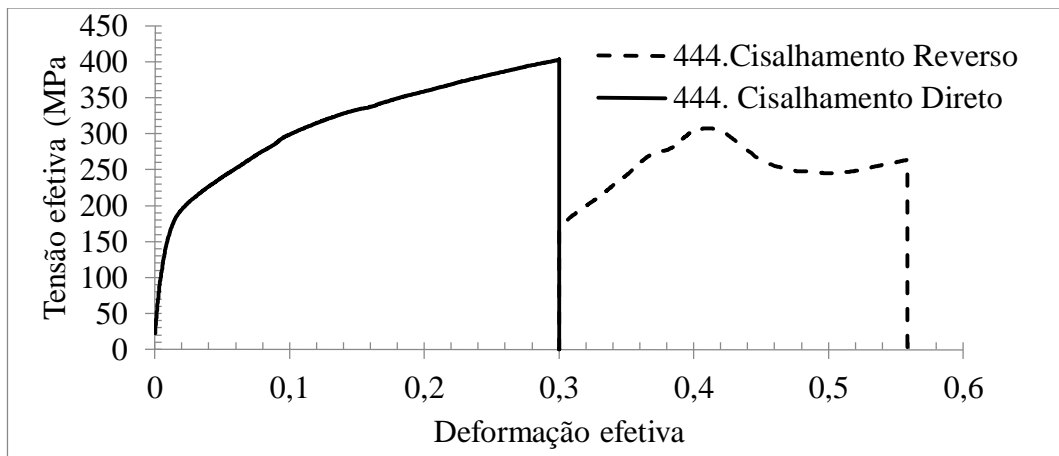


Fonte: Autor

Com uso do gráfico, é perceptível que houve um amaciamento que pode ser explicado de acordo com os modelos propostos por Haus (2011), e Kassner (2009) para o fenômeno conhecido como efeito Bauschinger. Visto que o início do carregamento reverso no regime plástico, apresentou-se com valor de tensão bem mais baixo do que o final do carregamento direto.

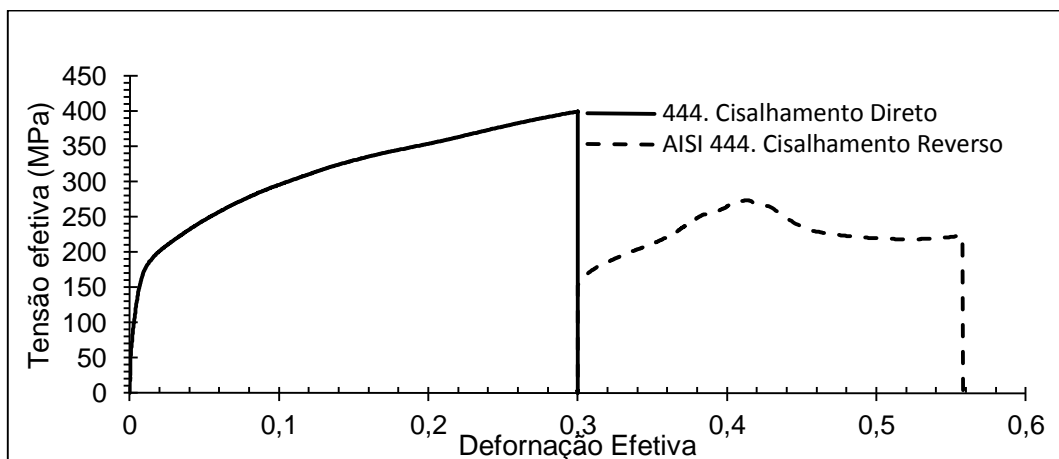
Quando submetido a um ciclo de cisalhamento, porém, finalizando em um valor de deformação maior, o aço continua apresentando um comportamento semelhante aos ensaios anteriores, conforme Figuras 18 e 19.

**Figura 18 - Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento**



Fonte: Autor

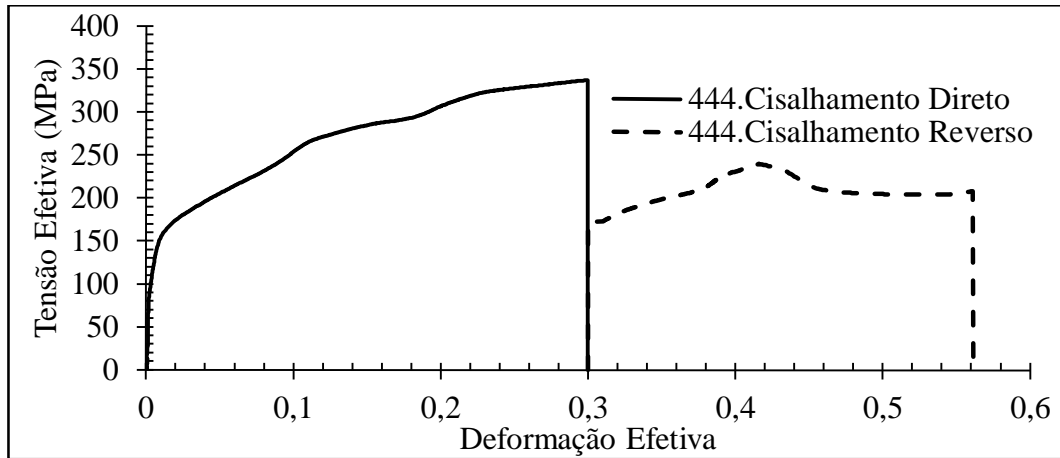
**Figura 19 - Curva rebatida de tensão efetiva em função deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico.**



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 20 é referente a uma amostra pré-deformada de 30% e, em seguida, submetida a um ciclo de cisalhamento.

**Figura 20 - Curva rebatida de tensão efetiva – deformação efetiva para o aço AISI 444 em cisalhamento cíclico após sofrer uma pré-deformação de 30%**



Fonte: Autor

Os valores de variação da tensão após a mudança do modo de deformação e de efeito Bauschinger calculados para cada situação citada acima foram organizados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Valores de  $\Delta\sigma$  e do Efeito Bauschinger para diferentes modos de solicitação mecânica**

Condição	$\Delta\sigma$ (MPa)	Efeito Bauschinger (MPa)
AISI 444 Pré. 10% Cisalhamento Cíclico 0,10	83,5	212,1
AISI 444 Pré. 30% Cisalhamento Cíclico 0,30	97,9	164,4
AISI 444 Cisalhamento Cíclico 0,10	110,4	172,5
AISI 444 Cisalhamento Cíclico 0,30	96,4	239,4

Fonte: Autor

Percebeu-se que a variação de tensão de todas as amostras foi maior que zero, o que indica que houve um processo de amaciamento, isto é, redução da resistência mecânica entre os ciclos direto e reverso. Esse resultado foi condizente com a teoria de amaciamento de Bauschinger, conforme Viega (2009).

Verificou-se que o valor de  $\Delta\sigma$  tende a ser menor que o efeito Bauschinger, pois considerando que este foi calculado no início do carregamento reverso momento este o qual ainda não existe a influência do encruamento que aumenta a resistência mecânica ao longo do carregamento mecânico reverso, reduzindo o efeito do amaciamento.

#### 7.4 Caracterização mecânica das chapas dobradas

Os resultados de dureza Vickers para diferentes tipos de solicitação mecânica são mostrados na tabela 3.

**Tabela 3 - Dureza Vickers do aço inoxidável AISI 444 para diferentes condições de solicitação mecânica.**

Condição	Ângulo (°)	HV- 1	HV- 2	HV- 3	HV- 4	Média (HV)
Como recebido	0	225	239	257	250	243
Pré Cis. 30%	90	275	273	267	286	275
Pré Cis. 30%	30	254	267	268	277	267
Pré Cis. 10%	90	242	239	257	247	246
Pré Cis. 10%	30	238	234	240	243	239
Cis. Cíclico 30%	90	261	266	263	293	271
Cis. Cíclico 30%	30	260	249	251	276	259
Cis. Direto/Reverso 10%	90	260	258	233	252	251
Cis. Direto/Reverso 10%	30	258	262	260	257	259

Fonte: Autor

Observa-se que condições em que as solicitações mecânicas são mais severas, isto é, maiores deformações e maior ângulo de dobramento, as durezas são maiores. Esse fenômeno tem como causa o processo de endurecimento a frio, ou seja, esse aumento nos valores de dureza é causado pelo encruamento.

Dessa maneira, fica evidente que o processo de dobramento gera, de maneira geral, uma redução do amaciamento gerado pelo efeito Bauschinger.

## CONCLUSÃO

A imposição de um carregamento mecânico do tipo cíclico composto por cisalhamento direto e reverso em um aço inoxidável ferrítico AISI 444 revelou a influência dos diferentes modos de solicitação mecânica em seu comportamento mecânico, isto é, a resistência mecânica ao final do carregamento e o amaciamento que ocorre entre a porção direta e a reversa. Os resultados obtidos ao término deste trabalho revelaram:

- O efeito do fenômeno de encruamento é facilmente perceptível em amostras previamente deformadas. Resultando em um aumento da resistência mecânica do material;
- O pré-cisalhamento, neste trabalho, não pareceu exercer uma influência clara no valor de amaciamento, porém essa relação carece de maiores estudos;
- O valor do amaciamento Bauschinger é maior do que os valores da variação da tensão após a mudança do modo de deformação, provavelmente pela influência do encruamento ao longo do carregamento reverso, fato que não é levado em consideração quando se calcula o efeito Bauschinger que é calculado com base no primeiro valor de tensão do regime plástico;
- A operação de dobramento parecer minimizar os efeitos de amaciamento ao gerar no material endurecimento a frio.

## REFERÊNCIAS

ANGLADA, M.; FARGAS, G.; MATEO, A. **Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel.** Journal of Materials Processing Technology, v.209, n.4, p.1770-1782, 2009.

BOUVIER, S. et al. **Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains.** Journal of Materials Processing Technology, v. 172, n. 1, p. 96-103, 2006.

BRESCIANI et al. **Conformação Plástica dos Metais.** 6. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 383p.

BUCIUMEANU, M. et al. **Fatigue life predictions including the Bauschinger effect.** International Journal of Fatigue, v. 33, n. 2, p. 145-152, 2011.

CHUN, B. K.; JINN, J.; LEE, J. K. **Modeling the Bauschinger effect for sheet metals, part I: theory.** International Journal of Plasticity, Elsevier Science Ltd., v.18, n.5, p.571-595, 2001.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** 4º. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652p.

COUTINHO, C. B. **Materiais metálicos para engenharia.** Belo Horizonte: FCO, 1992. 405p.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653p.

**Estampagem dos aços inoxidáveis.** Disponível em: <[http://testes.lapisraro.com.br/acesita/site/ing/aco\\_inox/pdf/apostila\\_aco\\_inox\\_estampagem.pdf](http://testes.lapisraro.com.br/acesita/site/ing/aco_inox/pdf/apostila_aco_inox_estampagem.pdf)> Acesso em: 18 jun. 2014

FUJIWARA, K.; UEMORI, T.; YOSHIDA, F. **Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain.** International Journal of Plasticity, Elsevier, v.2002, n.18, p.633-659, 2002.

GEANTIL et al. **Backstress, the Bauschinger Effect and Cyclic Deformation.** Materials Science Forum, Suíça, v.604-605, n.0, p.39-51, 2008.



GUEDES, L. C.; PADILHA, A. F. **Aços Inoxidáveis Austeníticos**. Curitiba: Hemus, 2004. 175p.

HAUS, S. A. **Influência do efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência**. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFPR, Curitiba, 2011.

KASSNER, Michael E. et al. **Backstress, the Bauschinger effect and cyclic deformation**. In: Materials Science Forum. 2009. p. 39-51.

KIM et al. **Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips**. International Journal of Plasticity, China, v.2014, n.59, p.84-107, 2014.

LOPES, Wellington. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. 2009. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

MANACH, P.; THUILLIER, S. **Comparison of the work hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths**. International Journal of Plasticity, Elsevier, v.2009, n.25, p.733-751, 2009.

RAUCH, Edgar F. **The flow law of mild steel under monotonic or complex strain path**. In: Solid State Phenomena. 1992. p. 317-333.

SALES, V. **Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento**. 2013. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - CEFET-MG, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, M. I. L. **Falha incremental de dutos com defeito de corrosão em carregamento**. 2012. 149f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1995. 134p.

THIAGO, Vicente Luís. **Avaliação de Integridade em dutos com danos de deformação plástica causados por sobrecarga do solo**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

THUILLIER, Sandrine; MANACH, Pierre-Yves. **Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths**. International Journal of Plasticity, v. 25, n. 5, p. 733-751, 2009.

TOROPOV, V. V.; URABE, M.; YOSHIDA, F. **Identification of material parameters in constitutive model for sheet metals from cyclic bending tests**. J. Mech Sci, Grã Bretanha, v.40, n.2, p.237-249, 1998.

UEMORI, T.; YOSHIDA, F. **A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation**. International Journal of Plasticity, Elsevier, v.2002, n.18, p.661-686, 2002.

WAYMAN, M. L. **Stainless Steel Metallurgy. THE METALS BLACK BOOK: Ferrous Metals**. 2<sup>a</sup>. ed. Alberta: CASTI Publishing Inc., 2003. 827p. Disponível em: <[http://www.casti.ca/books\\_ebooks/lite/BlackBookNALite.pdf](http://www.casti.ca/books_ebooks/lite/BlackBookNALite.pdf)> Acesso em: 29 jun. 2014

WEINMANN, K. J. et al. **The Bauschinger effect of sheet metal under cyclic reverse pure bending**. CIRP Annals-Manufacturing Technology, v. 37, n. 1, p. 289-293, 1988.

YOSHIDA, F. **A constitutive model of cyclic plasticity**. International Journal of Plasticity, Japão, v.2000, n.16, p.359-380, 199.

ZANG, Shun-lai et al. **Measurement of the Bauschinger behavior of sheet metals by three-point bending springback test with pre-strained strips**. International Journal of Plasticity, v. 59, p. 84-107, 2014.