

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

JOÃO VITOR MONFERRARI PENIDO

**ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRANSIENTE DE ENCRUAMENTO PARA O AÇO**  
**INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444**

BELO HORIZONTE

2021

JOÃO VITOR MONFERRARI PENIDO

**ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRANSIENTE DE ENCRUAMENTO PARA O AÇO  
INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444**

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: Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2021

JOÃO VITOR MONFERRARI PENIDO

**ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRANSIENTE DE ENCRUAMENTO PARA O AÇO  
INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444**

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.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

---

Profa. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

---

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado capacitação e saúde durante toda a minha caminhada.

Ao meus pais, Julio e Juliene, minhas irmãs Julia e Juliana e minha namorada Laura, que sempre acreditaram em meu potencial, sempre me incentivando e me dando forças para prosseguir na luta diária da vida. Sou eternamente grato a vocês.

Ao meu querido orientador Wellington pelo apoio, pela paciência e pela forma generosa que segurou a minha mão para que a realização deste trabalho fosse possível.

Às amigadas que construí durante a minha jornada no CEFET MG, que fizeram com que tudo fosse mais leve.

“Nada te perturbe, nada te espante, tudo passa,  
Deus não muda. A paciência tudo alcança;  
Quem a Deus tem, nada lhe falta, pois só Deus  
basta.” (ÁVILA, 1854).

## RESUMO

As chapas metálicas precisam ser submetidas a diferentes métodos de conformação mecânica para obter a forma e as dimensões desejadas. Durante o trabalho frio, um material é deformado plasticamente e endurece pelo encruamento, ou seja, o aumento da resistência mecânica. No entanto, quando um material experimenta uma trajetória de deformação pode ser observado flutuações na taxa de encruamento, ou seja, transientes na taxa de encruamento. Considerando a ocorrência de transientes na taxa de encruamento, este trabalho investigou esse fenômeno para o aço inoxidável ferrítico AISI 444. Neste caso, as amostras em diferentes condições, como recebido e recozidas, foram pré-formadas por calandragem para dois valores de pré-deformação efetiva: 1,37% e 2,76% a 0° e 90° RL (direção de laminação), seguido de testes de tração. Os resultados mostraram que apenas as amostras recozidas, pré-deformadas para ambas as quantidades e a 0° RL apresentaram transientes na taxa de encruamento. Esses dados indicaram a influência da condição inicial (como recebida e recozida) e da anisotropia no transiente na taxa de encruamento.

**Palavras-chave:** conformação mecânica; encruamento; transiente na taxa de encruamento; aço AISI 444

## ABSTRACT

Metallic sheets need to be submitted to different metal forming methods to obtain shape and dimensions. During cold work, a material is plastically deformed and hardens by work-hardening, that is, the increase in the mechanical strength. However, when a material experiences a strain path can be observed fluctuations in the work-hardening rate, i.e., transients on the work-hardening. Considering the occurrence of transients on the work-hardening rate, this work investigated this phenomenon for AISI 444, ferritic stainless steel. In this case, samples in different conditions, as received and annealed were predeformed by calendaring for two values of effective pre-strain: 1.37% and 2.76% at 0° and 90° RD (rolling direction) followed by tensile tests. The results showed that only annealed samples, predeformed for both amounts of calendaring strain and at 0° RD exhibited transients on the work-hardening rate. These data indicated the influence of the initial condition (as received and annealed) and anisotropy on the work-hardening rate transients.

**Keywords:** mechanical forming; strain path; work hardening transient; AISI 444 steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rota tração/compressão para liga de alumínio AA6022-T4.....	15
Figura 2 - Representação esquemática do efeito Bauschinger. ....	16
Figura 3 - Aspectos típicos das curvas de tensão-deformação efetiva após uma mudança no caminho de deformação.....	17
Figura 4 - Efeito da mudança de 90° no eixo de tração em amostras de uma liga alumínio 3003: (a) curvas tensão-deformação efetiva e (b) deformação residual uniforme. ....	18
Figura 5 - Efeito da mudança de 90° no eixo de tração em amostras de da liga Ni-Fe-Al: (a) curvas tensão-deformação efetiva e (b) deformação residual uniforme.....	18
Figura 6 - Representação do encruamento isotrópico: a) carregamento uniaxial de tração seguido por compressão; (b) representação de um carregamento biaxial seguido de compressão. ....	20
Figura 7 - Representação do encruamento cinemático: (a) carregamento uniaxial de tração seguido por compressão; (b) representação de um carregamento biaxial seguido de compressão. ....	20
Figura 8 - Efeito do percentual de encruamento nas propriedades mecânicas do aço SAE 1040, latão e cobre: (a) limite de escoamento; (b) limite de resistência. ....	21
Figura 9 - Efeito do encruamento na ductibilidade das amostras de aço AISI 104, latão e cobre. ....	22
Figura 10 - Energia armazenada no encruamento e fração da energia total na forma de energia armazenada em função do alongamento % após deformação em tração. ....	23
Figura 11 Representação esquemática da curva tensão-deformação cisalhante de um material metálico monocristalino com estrutura CFC. ....	24
Figura 12 - Resultados experimentais da mudança do caminho de deformação reversa introduzida pela compressão de sequência - tensão, com 1%, 2% e 4,4% de pré-tensionamento, juntamente com a curva de tensão de deformação monotônica. ....	25
Figura 13 - Efeito do pré-tensionamento e mudança no caminho de deformação. ....	26
Figura 14 - Comportamento não-usual do encruamento após a sequência ortogonal (tração/cisalhamento): (a) aço de baixo teor de carbono DC06 e (b) aço Dual Phase DP600. ....	27
Figura 15 - Fluxograma. ....	29
Figura 16 - Calandra mecânica IMAG. ....	30



Figura 17 - Máquina universal de ensaios INSTRON 5982. (carga máx. 100 kN) .....	31
Figura 18 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado como recebido. ....	34
Figura 19 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado recozido. ....	35
Figura 20 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido a 0° CA 1,37%...	36
Figura 21 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 como recebido a 0° CA 1,37%.....	36
Figura 22 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido a 90° CA 1,37%.....	37
Figura 23 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 como recebido a 90° CA 1,37%.....	37
Figura 24 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido 0° CA 2,76%.....	39
Figura 25 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recebido 0° CA 2,76%.....	40
Figura 26 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido 90° CA 2,76%....	40
Figura 27 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recebido 90° CA 2,76%....	41
Figura 28 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido, calandrado e tracionado a 0° .....	43
Figura 29 – Curvas de tensão efetiva – deformação efetiva para o carregamento Bauschinger. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 444 (% em peso).....	28
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 444 no estado como recebido após ensaio de tração nas direções 0° e 90° DL. ....	33
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 no estado recozido após ensaio de tração nas direções 0° e 90°. ....	34
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 1,37%/tracionado a 0° DL.....	38
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 1,37%/tracionado a 0° DL.....	38
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 1,37%/tracionado a 90° DL.....	38
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 1,37%/tracionado a 90° DL.....	38
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 2,76%/tracionado a 0° DL.....	41
Tabela 9 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 2,76%/tracionado a 0° DL.....	42
Tabela 10 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 2,76%/tracionado a 90° DL.....	42
Tabela 11 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 2,76%/tracionado a 90° DL.....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	13
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>3.1 Trajetória ou Caminho de Deformação</b> .....	14
<b>3.2 Encruamento e Taxa de Encruamento</b> .....	19
<b>3.3 Encruamento e Comportamento Mecânico</b> .....	21
<b>3.4 Transiente na Taxa de Encruamento</b> .....	24
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
<b>4.1 Material</b> .....	28
<b>4.2 Fluxograma</b> .....	28
<b>4.3 Calandragem</b> .....	29
<b>4.4 Tração</b> .....	30
<b>4.5 Tratamento Térmico</b> .....	31
<b>4.6 Cálculo do Expoente de Encruamento e da Taxa de Encruamento</b> .....	31
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
<b>5.1 Caracterização Mecânica das Amostras</b> .....	33
<b>5.2 Efeito da Calandragem no Comportamento Mecânico do Aço AISI 444</b> .....	35
<b>5.2.1 Calandragem com pré-deformação verdadeira de 1,37%</b> .....	35
<b>5.2.2 Calandragem com pré-deformação verdadeira de 2,76%</b> .....	39
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	45
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda por componentes metálicos está diretamente atrelada as novas necessidades dos clientes que tendem a se direcionar em torno de produtos leves, resistentes mecanicamente, além de exibirem uma aparência que contribua para os usos diversos. Deste modo, seja para produtos mais complexos, ou até mesmo, para um simples bojo de uma pia de aço inoxidável, é cada vez mais importante o estudo do comportamento mecânico dos diferentes tipos de materiais metálicos de modo a atender as novas demandas do mercado.

Para a produção de diversos objetos por meio de operações de conformação mecânica, os metais podem ser submetidos a uma combinação de diferentes tipos de esforços mecânicos, em especial, na operação de estampagem de chapas. Contudo, em função das características estruturais e metalúrgicas de cada material em processamento, as respostas apresentadas por estes durante um ciclo de fabricação podem variar bastante (LOPES, 2009).

O caminho ou a chamada trajetória de deformação desses materiais pode influenciar no aparecimento de regiões de um corpo metálico com menor resistência mecânica devido à ocorrência, dentre outros aspectos, de transientes na taxa de encruamento, caracterizados pela oscilação de trechos com maior e com menor resistência mecânica (CORRÊA, 2004).

Considerando este aspecto, este trabalho pretende analisar a ocorrência de transientes na taxa de encruamento em amostras de aço inoxidável ferrítico AISI 444, submetidas a ciclos de deformação plástica similares aos observados em processos reais de estampagem, tais como dobramento e estiramento.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem o objetivo geral de investigar a influência do modo de deformação plástica no aparecimento de transientes na taxa de encruamento do aço inoxidável ferrítico AISI 444.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Avaliar o efeito do modo de deformação plástica no aparecimento de transientes na taxa de encruamento;
- b) Analisar a influência da direção de sollicitação mecânica no desenvolvimento de transientes na taxa de encruamento;
- c) Estudar o efeito da quantidade de deformação plástica no aparecimento de transientes na taxa de encruamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Trajetória ou Caminho de Deformação

Para aderir a sua geometria final e características mecânicas desejadas, os materiais metálicos precisam ser submetidos a determinados processos de conformação mecânica, como a laminação, extrusão, forjamento e estampagem, os quais podem ser realizados a quente ou a frio, de acordo com as necessidades do produto desejado (WANG, 2002).

A combinação de diferentes modos de deformação plástica quando aplicados a um material, como tração, flexão, compressão, cisalhamento e torção definem o conceito de trajetória de conformação, já a escolha de um determinado modo e quantidade de deformação, dependerá diretamente do material utilizado e da geometria do produto (LOPES, 2009).

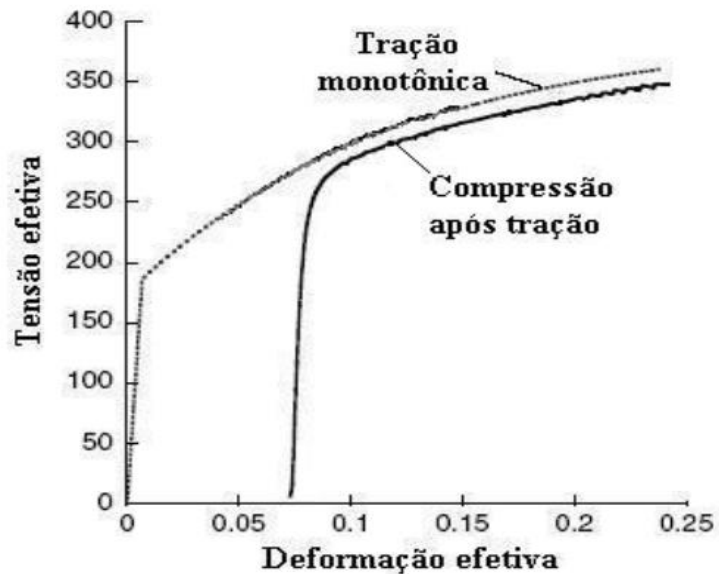
A severidade da mudança no caminho de deformação pode ser identificada com uso da equação (1), a partir da medição do parâmetro “ $\alpha$ ”, o qual consiste no cálculo dos tensores de deformação durante a pré-deformação e a deformação subsequente em função do ângulo entre os carregamentos sucessivos, sendo que, quando mais próximo de zero for o valor de “ $\alpha$ ”, mais severa tende a ser a mudança no caminho de deformação (LOPES 2009; RAUCH 1992).

$$\alpha = \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) \quad (1)$$

Quando o material é carregado em um sentido, ocorre uma movimentação e o emparelhamento das discordâncias, se o mesmo material for submetido a um esforço mecânico invertido, poderão surgir discordâncias de sinais contrários àquelas responsáveis pela primeira deformação, causando um possível amaciamento do material (CHRISTODOULOU et al 1986; BOUVIER et al 2005).

Na Figura 1, verifica-se o efeito da inversão do sentido de deformação na curva de tensão–deformação efetiva para a liga de alumínio AA6022-T4 (BOGER et al 2005).

**Figura 1 - Rota tração/compressão para liga de alumínio AA6022-T4.**



Fonte: LOPES, 2009

Durante alterações do caminho de deformação ortogonal, um material pode experimentar um acréscimo no valor da tensão limite ao escoamento acompanhado por um amaciamento e em seguida, novo endurecimento. Caso a quantidade de pré-deformação seja elevada o suficiente para permitir o estabelecimento de uma subestrutura de discordâncias que seja resistente à tendência de um amaciamento posterior, pode-se reduzir ou mesmo eliminar essa possibilidade de amaciamento do material (LOPES, 2009).

O arranjo atômico assumido pelos materiais metálicos e a presença de diversos mecanismos de endurecimento, tais como, os átomos de solução sólida substitucional ou intersticial, contorno de grão e discordâncias (WANG, 2002) tende a sofrer modificações à medida que um determinado material é submetido à imposição de diferentes estados de tensões. Além disso, deve-se destacar que muitos materiais metálicos tendem a experimentar ainda transformações de fase com a continuidade da deformação plástica, sendo isso afetado pelo modo e quantidade dessa deformação, como verificado para o aço inoxidável austenítico AISI 304 (LOPES, 2009).

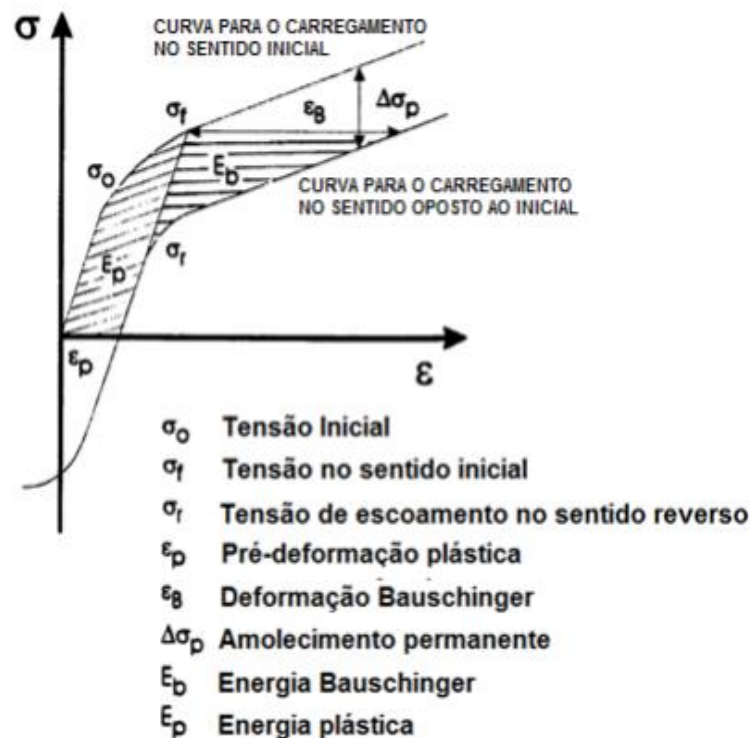
Quando um metal é deformado plasticamente observa-se o surgimento de tensões internas, decorrentes, por exemplo, da presença de tensões residuais. Essa divergência de tensões pode ser causada por vários motivos, como a incompatibilidade de propriedades entre fases distintas, formato da matriz, as quais podem acentuar essa desigualdade quanto à

distribuição de tensões e deformações, além da presença de pontos com gradiente de temperatura (WANG 2002; RAUCH, 1992).

Segundo Yan (1998), quando um metal é deformado plasticamente em uma direção uniaxial (por exemplo, em tração) até um ponto de deformação anterior à ocorrência da instabilidade plástica neste modo de deformação e em seguida, ser recarregado no sentido oposto (por exemplo, em compressão), observa-se a redução da tensão de fluxo no início do recarregamento no segundo modo de deformação plástica, efeito este reconhecido pelo nome de Efeito Bauschinger.

A Figura 2 representa esquematicamente o efeito Bauschinger com a combinação das curvas de tensão-deformação para dois carregamentos aplicados em sentidos opostos.

**Figura 2 - Representação esquemática do efeito Bauschinger.**



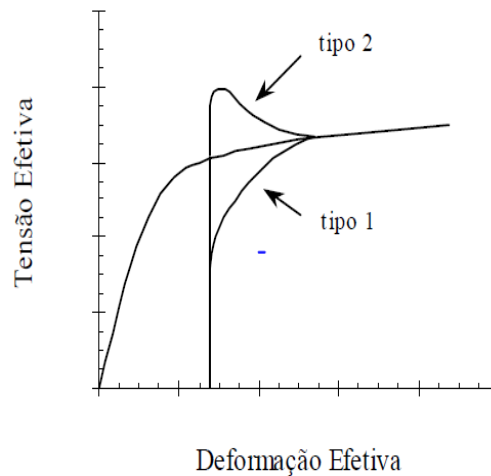
Fonte: ABEL, 1987

O carregamento do tipo Bauschinger ilustra um exemplo de uma solicitação mecânica realizada com a mudança do caminho de deformação, mas deve-se destacar que dependendo da rota de deformação plástica adotada em um caminho de deformação, o material poderá apresentar características mecânicas não desejáveis, como a presença de transientes na capacidade de endurecimento (LOPES, 2006; ARMSTRONG, 1982).



Na Figura 3 é possível analisar o comportamento mecânico usual de materiais metálicos quando submetidos a uma mudança no caminho de deformação. Na curva 1 observa-se a uma queda da tensão de fluxo no início do recarregamento acompanhada pela presença de uma taxa de encruamento maior. Já na curva 2 o material exibe uma tensão de fluxo no recarregamento maior com posterior queda da taxa de encruamento (CORRÊA, 2004).

**Figura 3 - Aspectos típicos das curvas de tensão-deformação efetiva após uma mudança no caminho de deformação.**

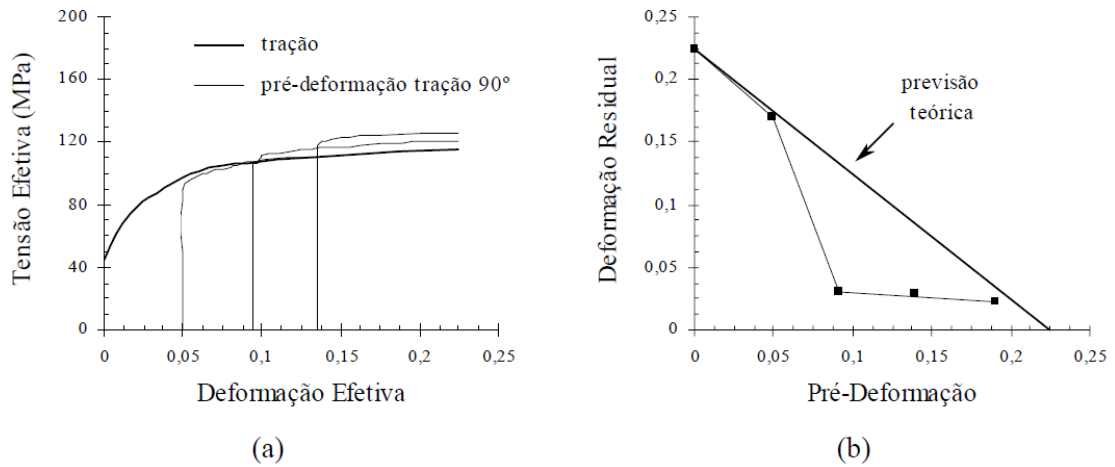


Fonte: CORRÊA, 2004

Nas Figuras 4 e 5 nota-se as respostas diferentes em termos da resistência mecânica e da ductilidade (deformação residual uniforme, a qual consiste na quantidade de deformação que o material suporta até o início da estrição) em função do tipo de material, amostras da liga de alumínio 3003 e da liga de Ni-Fe-Al, quando submetidas a uma mesma condição de carregamento, tração (carregamento monotônico em tração) e de uma rota de deformação plástica composta pela pré-deformação em tração conduzida em amostras retiradas a 90° em relação à direção de laminação com posterior tração na direção de laminação.

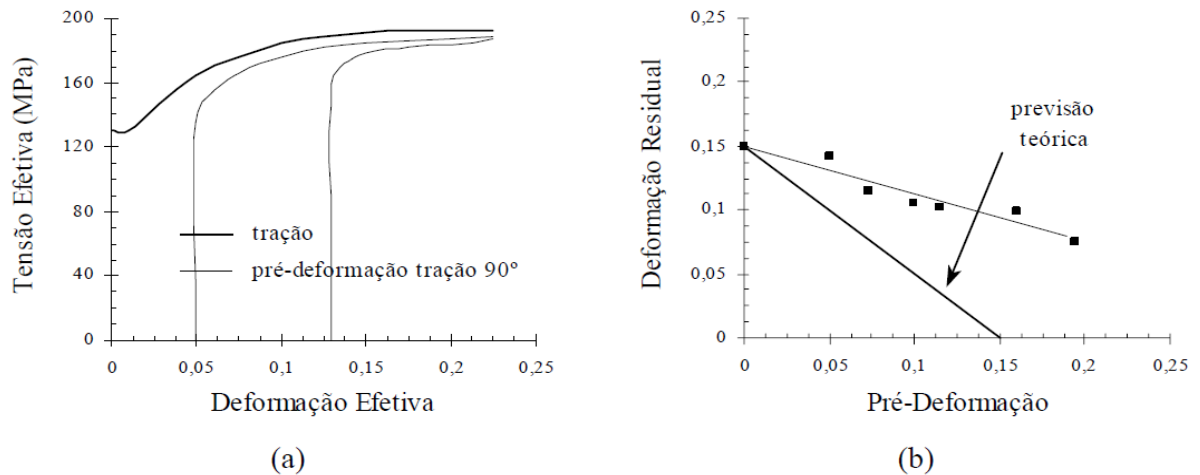
Enquanto a liga de alumínio 3003 exibiu um aumento da resistência mecânica acompanhado por uma queda da ductilidade quando comparada com a condição de carregamento monotônico (previsão teórica), ou seja, sem mudança do caminho de deformação, a liga de Ni-Fe-Al apresentou redução da resistência mecânica com acréscimo da ductilidade (CORRÊA, 2004; LLOYD, SANG 1979).

**Figura 4 - Efeito da mudança de 90° no eixo de tração em amostras de uma liga alumínio 3003: (a) curvas tensão-deformação efetivas e (b) deformação residual uniforme.**



Fonte: CORRÊA, 2004

**Figura 5 - Efeito da mudança de 90° no eixo de tração em amostras de da liga Ni-Fe-Al: (a) curvas tensão-deformação efetivas e (b) deformação residual uniforme.**



Fonte: CORRÊA, 2004

A resposta diferenciada apresentada por estes dois materiais pode ser associada a diversos fatores, tais como a direção dos esforços mecânicos que os materiais foram submetidos e o tamanho do grão da liga de Ni-Fe-Al, que por ser um grão mais fino que o da liga de alumínio 3003, possui uma maior estabilidade no momento da deformação (LLOYD, SANG 1979).

### 3.2 Encruamento e Taxa de Encruamento

Durante a deformação plástica dos materiais metálicos é observado o deslizamento das discordâncias em planos de escorregamento, que tende a aumentar a densidade das linhas de discordâncias de modo que a interação entre elas também aumenta, gerando uma interação entre os campos de deformação, o que ocasiona o endurecimento do metal (DIETER, 1981; ASM HANDBOOK, 2000; CALLISTER, 2007).

Segundo (GRILO, 2011), pode-se considerar que existem dois modos principais de encruamento: isotrópico e cinemático. O encruamento isotrópico é classificado quando existe apenas a expansão uniforme da superfície de plasticidade, mantendo-se inalterada a posição do seu centro, sendo formulado de acordo com a equação (2),

$$\varphi(\sigma, \alpha) = \varphi(\sigma) - \sigma_y(\alpha) = 0 \quad (2)$$

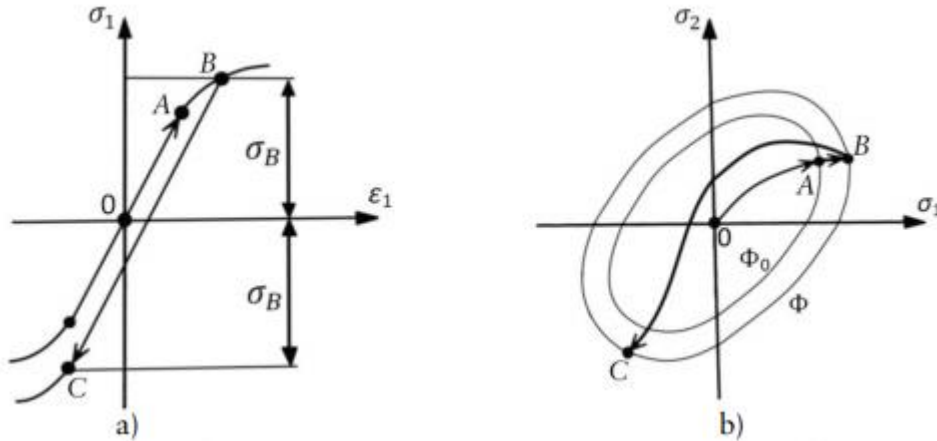
sendo o termo  $\varphi(\sigma)$  uma função matemática convexa do tensor de tensões, e  $\sigma_y(\alpha)$  a função de encruamento que estabelece a dimensão da superfície de plasticidade.

É possível entender o conceito de encruamento isotrópico pela Figura 6, onde até o ponto A sob carregamento em tração, o material se comporta elasticamente e após esse limite começa o regime plástico, então a superfície de plasticidade expande isotopicamente. A partir do ponto B nota-se uma tensão de limite de escoamento nova e dos pontos B a C um regime elástico. O material começa a encruar quando ele ultrapassa o ponto C (GRILO, 2011).

Já o encruamento cinemático segundo (GRILO, 2011), aplicando-se uma tensão ao longo do processo de deformação plástica as dimensões e a forma da superfície se mantêm inalteradas, conforme disposto na equação (3), onde  $X$  é um tensor das tensões.

$$\varphi(\sigma, \varepsilon^{-p}) = \varphi(\sigma - X(\varepsilon^{-p})) - \sigma_y = 0 \quad (3)$$

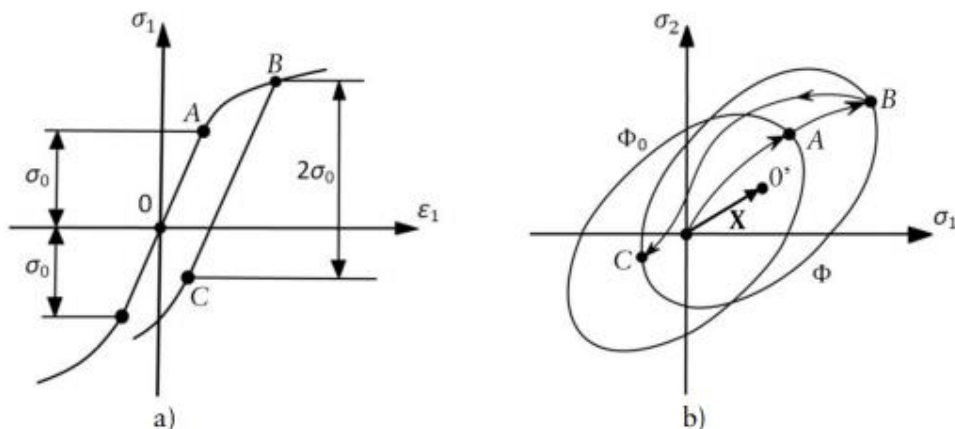
**Figura 6 - Representação do encruamento isotrópico: a) carregamento uniaxial de tração seguido por compressão; (b) representação de um carregamento biaxial seguido de compressão.**



Fonte: GRILLO, 2011

A Figura 7 representa esquematicamente o comportamento do encruamento cinemático, sendo esse comportamento similar ao carregamento isotrópico divergindo após a inversão do carregamento, onde que o limite de elasticidade é atingido assim que a tensão do regime elástico seja igual ao dobro da tensão limite de elasticidade inicial (GRILLO, 2011).

**Figura 7 - Representação do encruamento cinemático: (a) carregamento uniaxial de tração seguido por compressão; (b) representação de um carregamento biaxial seguido de compressão.**



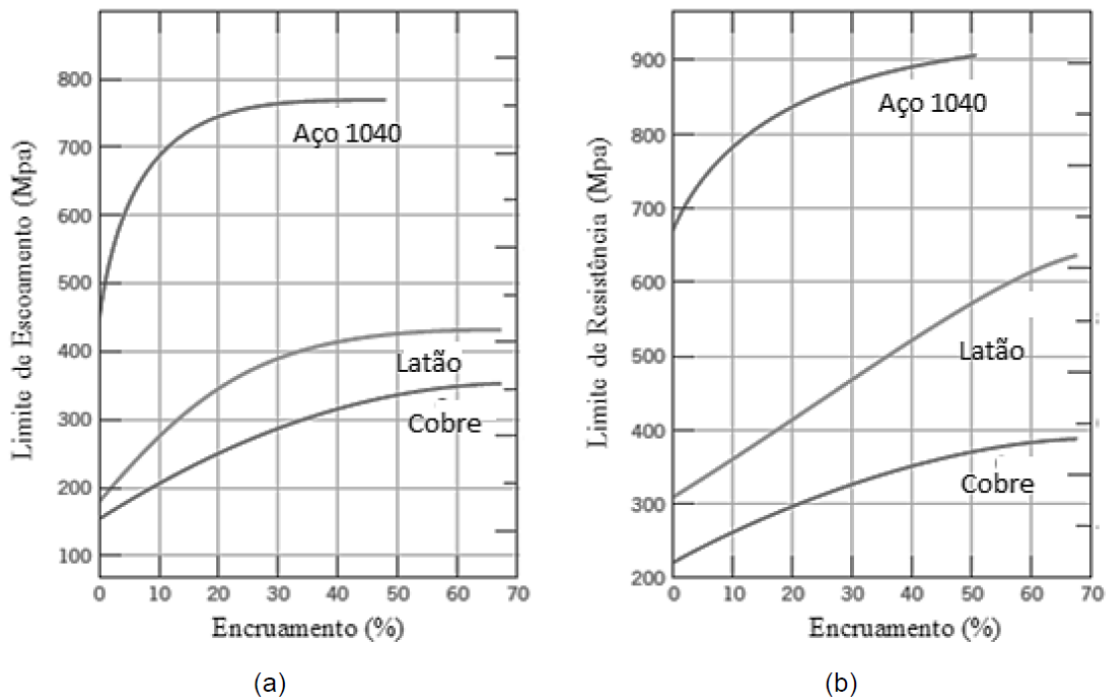
Fonte: GRILLO, 2011

### 3.3 Encruamento e Comportamento Mecânico

O encruamento depende de diversos fatores, tais como o processamento mecânico ao qual o material será submetido, a temperatura, a quantidade de deformação e as orientações cristalográficas. O material metálico ao passar pelo processo de trabalho a frio, pode ter seu comportamento e propriedades mecânicas e físicas alteradas, como densidade, coeficiente de expansão térmica, resistência à corrosão devido ao aumento da energia interna do material, redução da condutividade elétrica, aumento da resistência mecânica, dentre outras respostas (DIETER, 1981; LOPES, 2006).

Na Figura 8 pode-se observar a influência da quantidade de deformação plástica (percentual de encruamento) no acréscimo dos valores do limite de escoamento e do limite de resistência para o aço SAE 1040, latão e cobre.

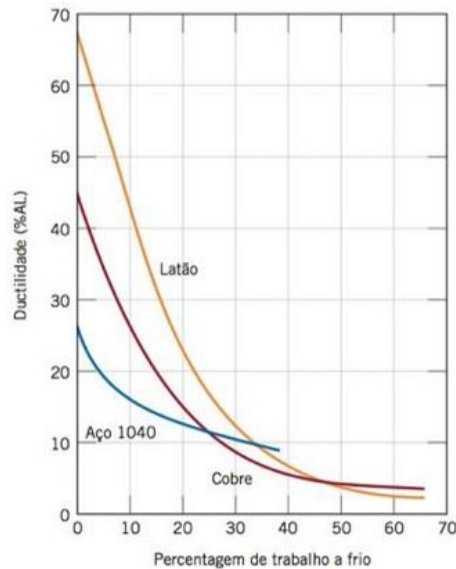
**Figura 8 - Efeito do percentual de encruamento nas propriedades mecânicas do aço SAE 1040, latão e cobre: (a) limite de escoamento; (b) limite de resistência.**



Fonte: CALLISTER, 2007

Além do aumento do limite de escoamento e de resistência, o encruamento influencia diretamente na ductilidade desses materiais, como representado na Figura 9.

**Figura 9 - Efeito do encruamento na ductibilidade das amostras de aço AISI 104, latão e cobre.**

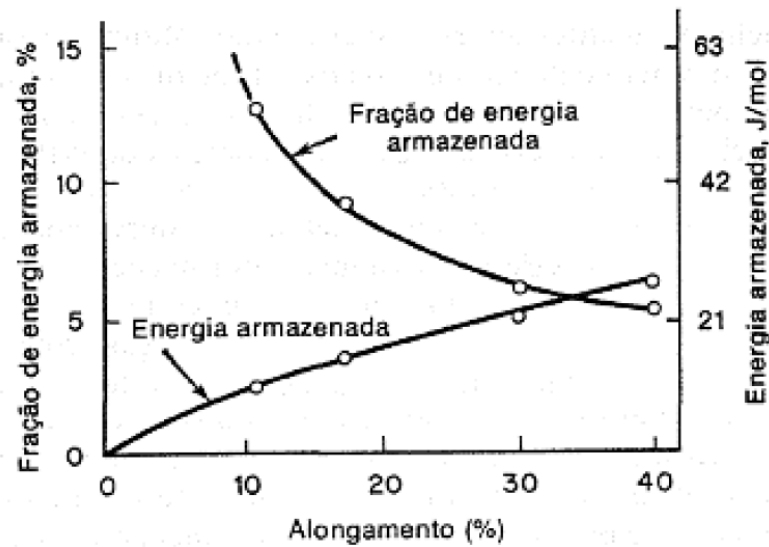


Fonte: CALLISTER, 2007

O endurecimento do material devido à diminuição à movimentação das discordâncias, se torna cada vez mais limitada à medida que o material é deformado. Parte da energia gasta é dissipada na forma de calor e a outra parte fica armazenada nos defeitos internos do metal (SAINATH et al., 2015; RAABE, 2014), conforme mostrado na Figura 10.

De modo geral, as propriedades mecânicas de um metal após o endurecimento por encruamento podem variar de acordo com vários fatores tais como, pela densidade de linhas de discordâncias e interação entre elas, refino de grão, transformação de fase, falha de empilhamento, adição de átomo de soluto (ANAND et al., 2012; XIONG et al., 2015; SAINATH et al., 2015; ZHANG et al., 2014).

**Figura 10 - Energia armazenada no encruamento e fração da energia total na forma de energia armazenada em função do alongamento % após deformação em tração.**

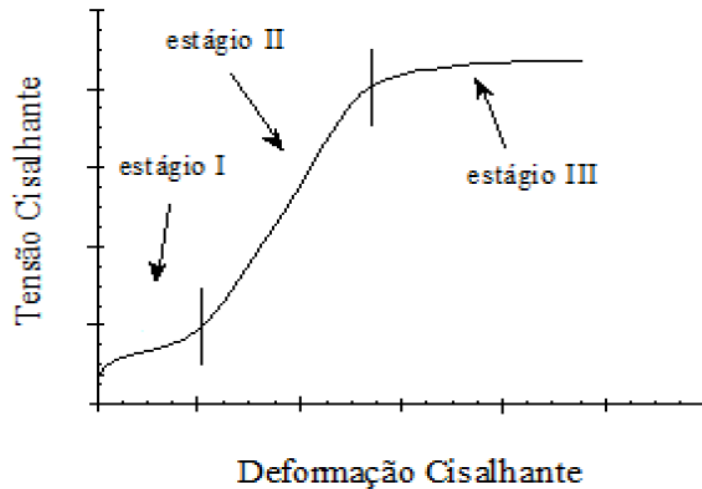


Fonte: REED-HILL, 1982

Para explicar como o encruamento altera o comportamento mecânico, foram analisadas as curvas de tensão- deformação cisalhante em ensaio de tração em cristais com estrutura cúbica de faces centradas, mostrado na Figura 11 (CORRÊA, 2004).

O primeiro estágio é caracterizado pela movimentação das discordâncias no sistema de deslizamento primário. O encruamento nesse ponto é associado às interações de longo alcance entre as discordâncias, além da presença de arranjos típicos das mesmas na forma de degraus e também do aparecimento de emaranhados decorrentes da interação entre as discordâncias e defeitos pontuais. No segundo estágio nota-se uma elevada taxa de encruamento pelo aumento contínuo de discordâncias, gerando tensões internas de longo alcance. No terceiro e último estágio, observa-se a queda contínua da taxa de encruamento, caracterizando uma recuperação dinâmica decorrente da ocorrência do deslizamento cruzado das discordâncias, sendo este o principal fator responsável pela queda da taxa de encruamento (CORRÊA, 2004).

**Figura 11** Representação esquemática da curva tensão-deformação cisalhante de um material metálico monocristalino com estrutura CFC.



Fonte: CORRÊA, 2004

### 3.4 Transiente na Taxa de Encruamento

Conforme definido, o encruamento é resultante da multiplicação, interação e, portanto, dificuldade na capacidade de movimentação das discordâncias, dependendo diretamente da temperatura, da taxa de deformação e do caminho de deformação (RAUCH 1998; LOPES 2009).

Após mudanças sucessivas no caminho de deformação, é possível que alguns materiais apresentem transientes no encruamento, caracterizados pela oscilação, estagnação, além da possibilidade de subsequente amaciamento ou endurecimento do material em função das mudanças em termos subestruturais e de orientação cristalográfica preferencial assumidas pelo material à medida que este é deformado plasticamente (LOPES 2009).

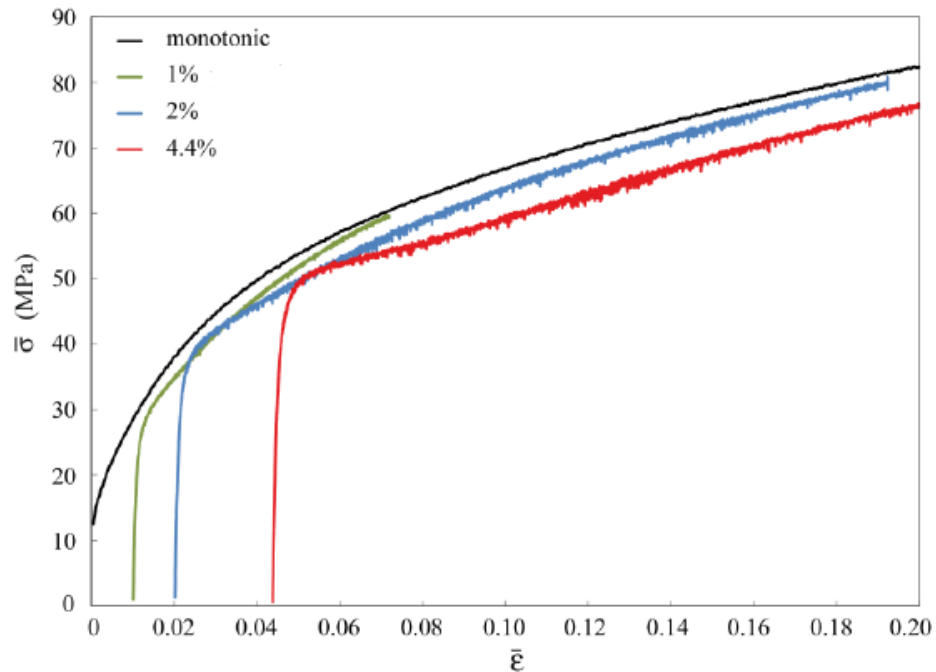
Mudanças no caminho de deformação podem introduzir mudanças transitórias nas curvas de tensão e deformação, que podem desaparecer, fazendo com que as curvas sigam o comportamento da curva monotônica. Porém, apesar da mudança no endurecimento ser transitória, a tensão de fluxo pode ser influenciada permanentemente, sendo conhecido como amaciamento permanente. Esse amaciamento permanente devido aos transientes na taxa de encruamento pode influenciar de maneira negativa a conformabilidade do material (MÁNIK et al., 2015).

A Figura 12 exemplifica o amaciamento permanente em uma amostra cilíndrica que primeiro foi comprimida, pré-tensionada em 1%, 2% e 4% e depois carregada em tensão.



Verifica-se que quanto maior o pré-tensionamento mais a curva se afasta da curva tensão-deformação monotônica, caracterizando uma fragilidade do material (MÁNIK et al., 2015).

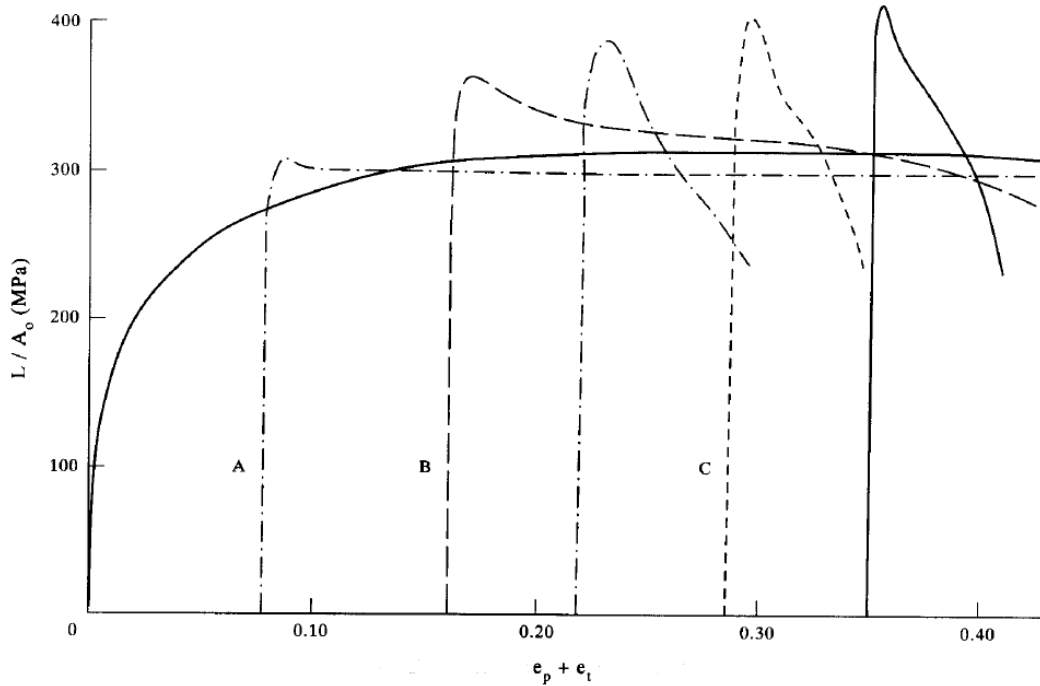
**Figura 12 - Resultados experimentais da mudança do caminho de deformação reversa introduzida pela compressão de sequência - tensão, com 1%, 2% e 4,4% de pré-tensionamento, juntamente com a curva de tensão de deformação monotônica.**



Fonte: (Mánik et al., 2015)

Observa-se também nos estudos de Wilson (1993) e na Figura 13 as reduções transitórias na taxa de endurecimento devido ao efeito da magnitude do pré-tensionamento após uma mudança no caminho da deformação. As curvas mostram a diminuição da taxa de endurecimento do aço de granulação fina, sendo comparada a um aço de baixo carbono, caracterizando o amolecimento do material.

**Figura 13 - Efeito do pré-tensionamento e mudança no caminho de deformação.**

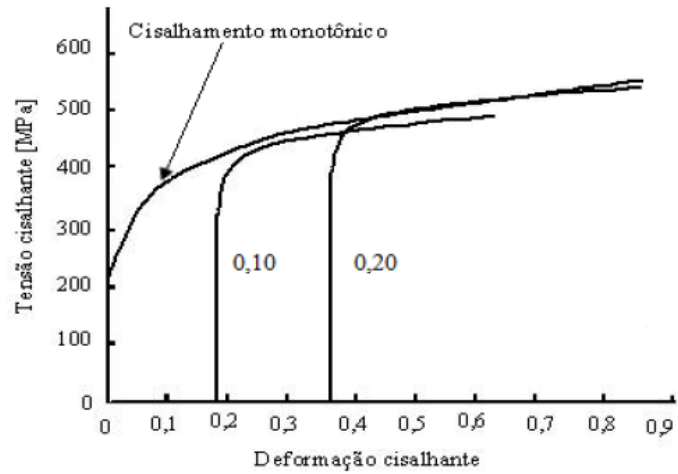


Fonte: WILSON, 1993

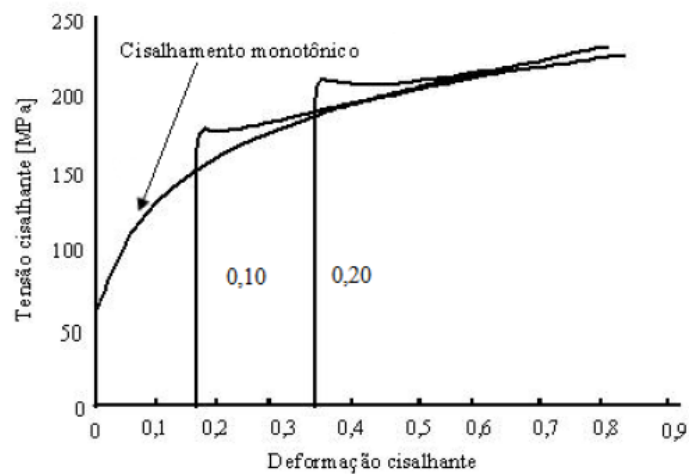
Pelo trabalho de (Haddadi et al, 2006) é possível identificar a resposta diferente em termos do encruamento de dois materiais, os aços *Dual Phase* DP600 e o aço DC06, quando submetidos à mesma rota de carregamento, tração acompanhada por cisalhamento, sendo ambos os carregamentos conduzidos na mesma direção, Figura 14.

Haddadi et al (2006) observaram que o aumento da tensão de escoamento durante o cisalhamento foi decorrente da mudança do arranjo da subestrutura das discordâncias desde a pré-deformação em tração até o recarregamento em cisalhamento, considerando que subestrutura de discordâncias criadas durante a pré-deformação passaram a atuar como obstáculos para o movimento das discordâncias desenvolvidas durante o recarregamento em cisalhamento, sendo associada a presença de transiente na curva de tensão-deformação cisalhante com o amaciamento do aço *Dual Phase* DP600.

**Figura 14 - Comportamento não-usual do encruamento após a sequência ortogonal (tração/cisalhamento): (a) aço de baixo teor de carbono DC06 e (b) aço Dual Phase DP600.**



(a)



(b)

Fonte: (HADADDI et al, 2009), adaptado

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Material

O trabalho experimental foi realizado com uso de chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 444 com espessura de 1,0 mm. Na Tabela 1 é exibida a composição química do material, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 1 – Composição química do aço AISI 444 (% em peso).**

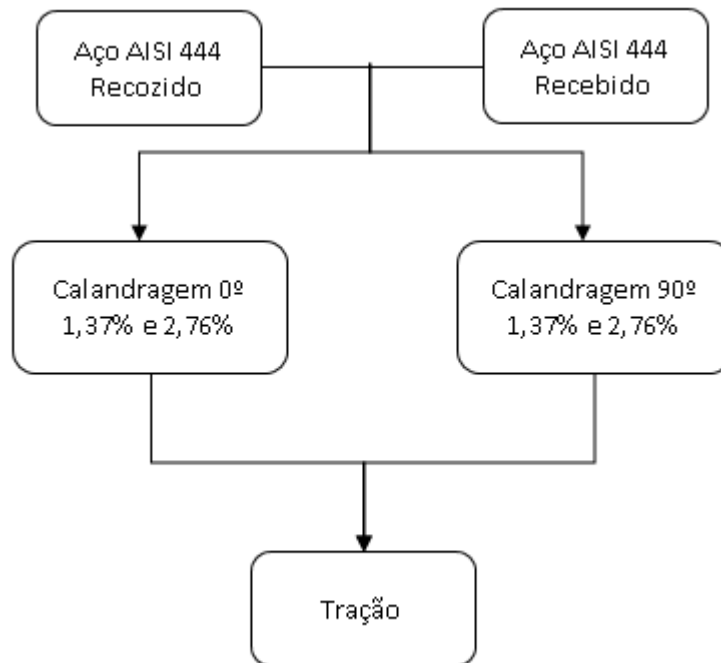
<b>Elementos</b>	<b>Valores (% em peso)</b>
C	0,0089
Mn	0,1459
Si	0,5166
P	0,0308
S	0,001
Cr	17,529
Ni	0,233
Mo	1,7912
Al	0,0066
Cu	0,0324
Co	0,0201
V	0,0284
Nb	0,1702
Ti	0,1509
Sn	0,0029

Fonte: Próprio autor

### 4.2 Fluxograma

Com o objetivo de investigar o efeito do modo de deformação plástica no aparecimento de transiente na taxa de encruamento, as chapas de aço inoxidável ferrítico foram pré-deformadas por meio de calandragem manual na mesma direção de laminação e também à 90° desta, adotando dois valores de deformação verdadeira para este modo de deformação plástica. Em seguida, a partir das chapas calandradas foram confeccionados corpos de prova de tração para investigar a resposta mecânica do aço AISI 444 do material previamente calandrado. Na Figura 15 é mostrado o respectivo fluxograma desse processo experimental.

**Figura 15 - Fluxograma.**



Fonte: Próprio autor

### 4.3 Calandragem

Para realizar a pré deformação com uso da calandra foi utilizada a calandra mecânica IMAG que dispõe de cilindros de trabalho com diâmetro de 120 mm, sendo o material calandrado em ambas as faces lubrificadas graxa grafitada, Figura 16.

A calandragem foi aplicada nas chapas do aço AISI 444 em dois estados iniciais: recozido e como recebido, aplicando dois valores de deformação efetiva,  $\epsilon_{\text{efet}}$ , de 1,37% e de 2,76%, de acordo com os valores de espessura inicial,  $t_0$ , e final,  $t_f$ , conforme equação (4):

$$\epsilon_{\text{efet}} = 1,15 \times \ln (t_0 / t_f) \quad (4)$$

A calandragem das chapas de aço foi realizada em 10 amostras, com comprimento aproximado de 150 mm, largura de 15 mm e espessura de 1,0 mm.

**Figura 16 - Calandra mecânica IMAG.**



Fonte: Próprio autor

#### 4.4 Tração

Para os ensaios de tração, as amostras foram confeccionadas de acordo com a norma ASTM E8, utilizando o equipamento Maxiém Waterjets usado para o corte com jatos d'água, com pressão de trabalho igual a 48 kPsi, mediante uso de um abrasivo composto por pó de  $Al_2O_3$ , além de diamante industrial com saída mediante bico com diâmetro de 0,68 mm. A operação foi realizada com vazão de trabalho de 3l/min e utilização de três (03) pistões de cerâmica com bicos injetores com diâmetro de 1,5 mm por 3 mm de comprimento.

Os três ensaios de tração para cada condição foram realizados em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 5982 (Figura 17), com uso de extensômetro mecânico do tipo agulhas e sistema de aquisição de dados Blue Hill 3.

Para a determinação da velocidade do ensaio,  $v$  [mm/min], foi adotado o valor da taxa de deformação,  $d\varepsilon/dt$  [ $s^{-1}$ ], inicial de  $0,001 s^{-1}$  com o valor do comprimento útil,  $l_{\text{útil}}$  [mm], dos corpos de prova de 75 mm, equação (5):

$$v = l_{\text{útil}} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot 60 \quad (5)$$

**Figura 17 - Máquina universal de ensaios INSTRON 5982. (carga máx. 100 kN)**



Fonte: Próprio autor

Com as medições obtidas foram montadas as curvas de tensão-deformação convencional e verdadeira e calculados os valores da tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência à tração e o alongamento uniforme, sendo esta última para investigar a ductilidade do material.

#### **4.5 Tratamento Térmico**

A pré-deformação por meio da calandragem será realizada em amostras do aço inoxidável ferrítico em dois estados: como recebido (como entregue pelo fabricante) e recozido. Neste último caso, os corpos de prova para a operação de calandragem serão aquecidos em um forno do tipo mufla Analógica modelo NA 1222 a temperatura de 850 °C durante tempo de encharque de 30 minutos com posterior resfriamento no interior do próprio forno.

O objetivo de alterar o estado inicial das amostras antes da realização dos ensaios mecânicos foi o de investigar a influência dessa condição do material no aparecimento de transientes na taxa de encruamento.

#### **4.6 Cálculo do Expoente de Encruamento e da Taxa de Encruamento**

A taxa de encruamento,  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ , consiste na razão dos valores subsequentes de tensão verdadeira pelos respectivos valores de deformação verdadeira, como disposto na equação (6), (DIETER, 1981).

Deve-se destacar que os valores de tensão e de deformação que devem ser usados na Equação (6) são os de tensão e deformação verdadeira ou efetiva em laminação, sendo esta adotada para expressar o valor da deformação efetiva em calandragem, vide Equação (4).

Já o valor do expoente de encruamento ( $n$ ) foi calculado a partir do método apresentado por Zandrahimi et al. (1989) com uso da taxa de encruamento normalizada. Neste caso, a instabilidade plástica terá início quando a taxa de encruamento multiplicada pelo respectivo valor da inverso da tensão verdadeira (taxa de encruamento normalizada) for menor que 1, ou seja, quando  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} * \frac{1}{\sigma} < 1$ . Deste modo, primeiro deve-se calcular a taxa de encruamento, com os dados de tensão verdadeira e de deformação verdadeira a partir de valores subsequentes:

Por fim, os dados de taxa de encruamento em função da deformação verdadeira e de taxa de encruamento normalizada em função da deformação verdadeira foram recalculados com a suavização dos dados, adotando a correção de Smooth pelo método de Savitzky-Golay com 30 pontos e polinômio de 2ª ordem.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização Mecânica das Amostras

As propriedades mecânicas das amostras do aço AISI 444 nos estados como recebido e as submetidas ao tratamento térmico de recozimento nas direções de 0° e de 90° em relação à direção, DL, são apresentadas na Tabela 2.

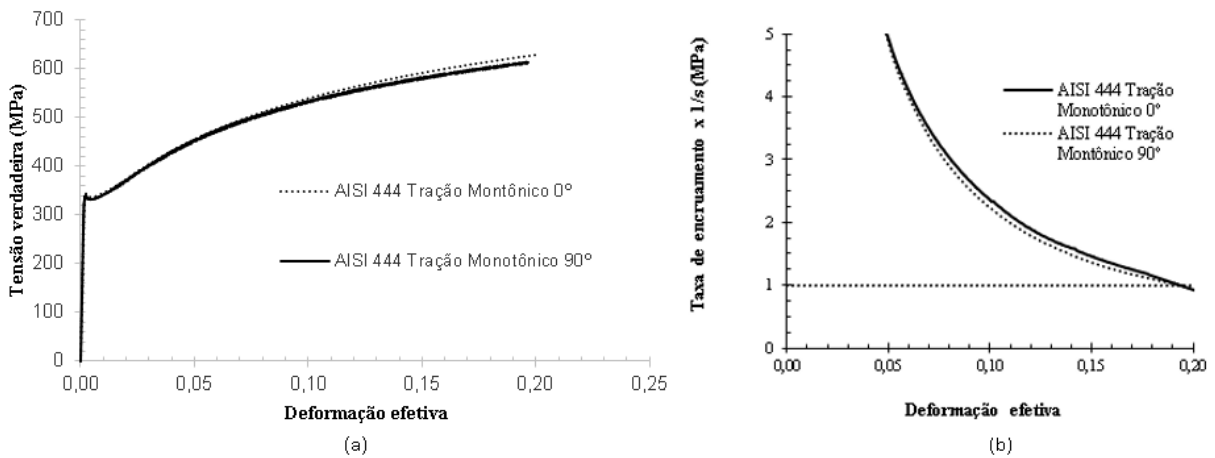
**Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço AISI 444 no estado como recebido nas direções 0° e 90° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	N
<b>Monotônico 0°</b>	342,32 ± 0,35	518,46 ± 6,43	22,47 ± 0,60	0,195 ± 0,002
<b>Monotônico 90°</b>	342,57 ± 9,75	515,80 ± 10,62	21,19 ± 0,37	0,188 ± 0,004

Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 18 (a) e (b) são apresentadas as curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira e as curvas de taxa de encruamento em função da deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado como recebido nas direções 0° e 90°. Como pode ser percebido houve uma tendência de isotropia das propriedades mecânicas nas duas direções e o mesmo comportamento na taxa de encruamento, não sendo observado, em nenhuma direção, a presença de transiente na taxa de encruamento.

**Figura 18 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado como recebido.**



Fonte: Próprio autor

De modo análogo, é apresentada na Tabela 3 o resumo das propriedades mecânicas do aço AISI 444 no estado como recozido.

**Tabela 3 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 no estado recozido após ensaio de tração nas direções 0° e 90° DL.**

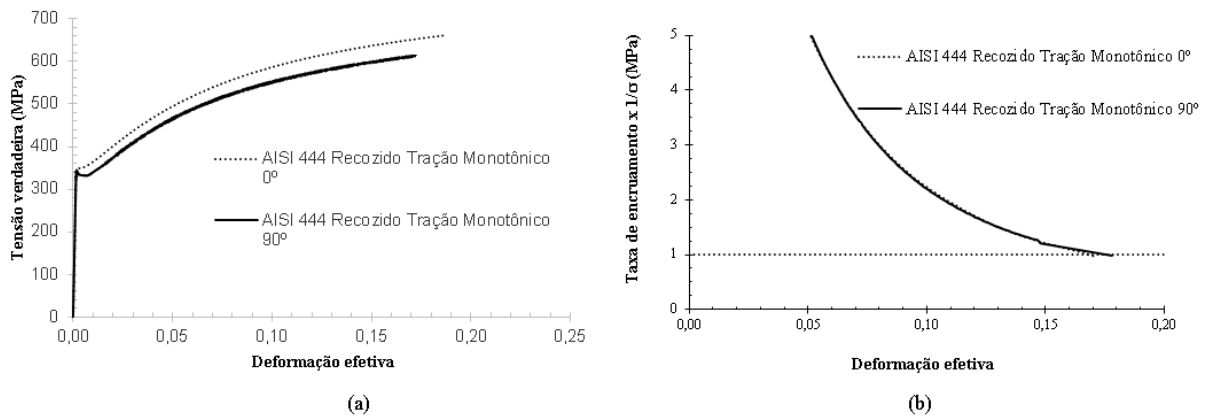
Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
Monotônico 0°	353,46 ± 5,60	551,98 ± 3,56	19,79 ± 0,95	0,175 ± 0,008
Monotônico 90°	339,60 ± 11,20	523,94 ± 10,90	18,85 ± 0,34	0,171 ± 0,003

Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 19 (a) e (b) diferentemente do observado no estado como recebido, percebe-se uma anisotropia em relação às propriedades mecânicas nas duas direções e uma igualdade maior em termos da taxa de encruamento e como esperado, por ser um estado sem processamento mecânico prévio, não foi observada a formação de transiente na taxa de encruamento.

As diferenças nas propriedades mecânicas observadas nas direções 0° e 90° podem ser explicadas devido ao duplo recozimento que o material sofreu, uma vez que, o material como recebido já havia sido recozido, ou seja, a chapa foi entregue pelo fabricante no estado recozido.

**Figura 19 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 no estado recozido.**



Fonte: Próprio autor

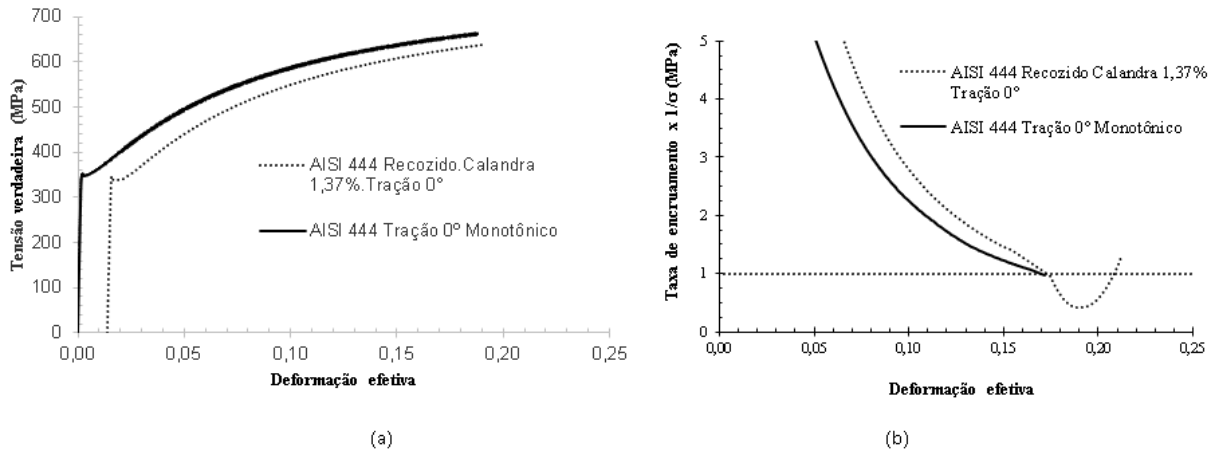
## 5.2 Efeito da Calandragem no Comportamento Mecânico do Aço AISI 444

As amostras de aço AISI 444 nos estados como recebido e recozidas foram submetidas à pré-deformação em calandragem e posteriormente, tracionadas para avaliar as propriedades mecânicas do material e identificar a possível ocorrência de transiente na taxa de encruamento após a mudança no caminho de deformação.

### 5.2.1 Calandragem com pré-deformação verdadeira de 1,37%

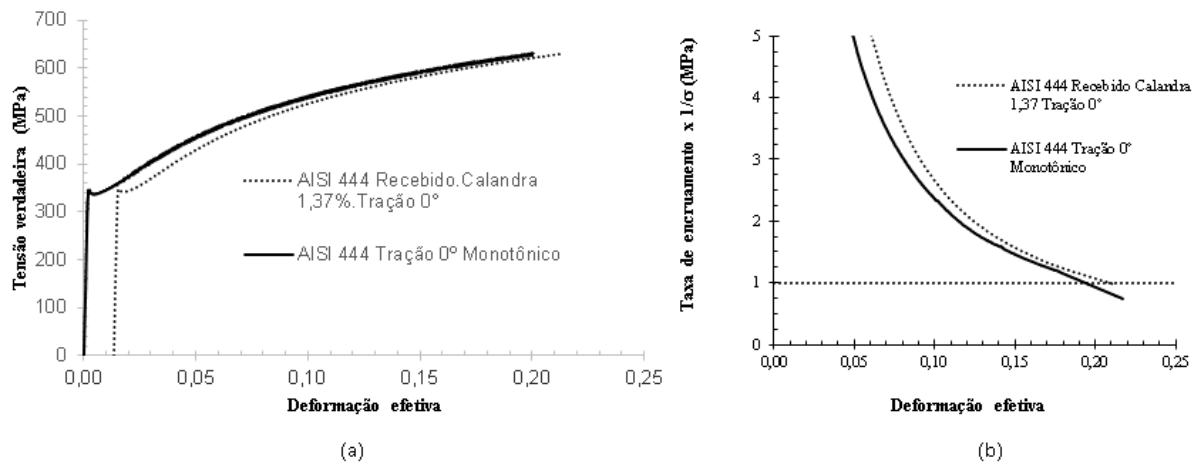
Foi feita uma análise do efeito da quantidade de pré-deformação no comportamento mecânico do aço AISI 444 após o ensaio de tração. As Figura 20 a Figura 23 mostram o resultado para cada condição abordada.

**Figura 20 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido a 0° CA 1,37%.**



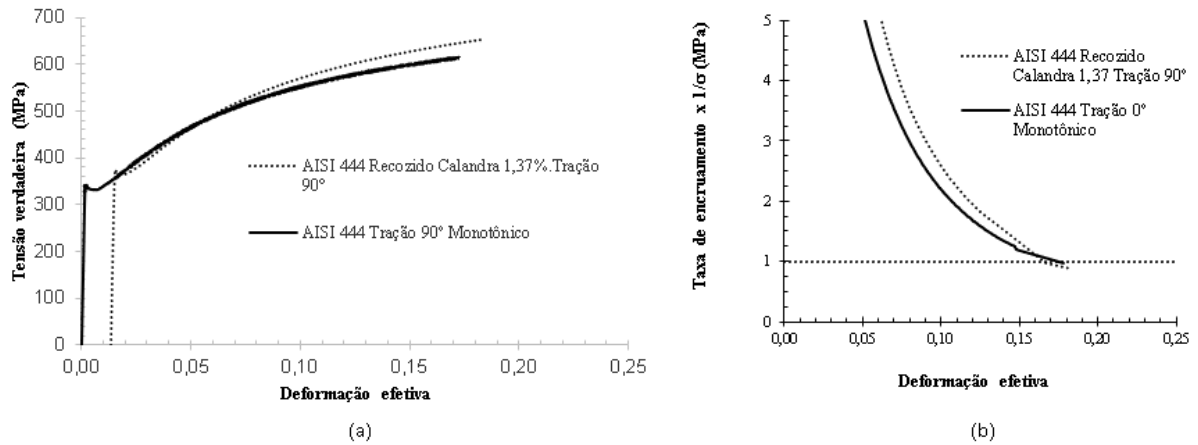
Fonte: Próprio autor

**Figura 21 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 como recebido a 0° CA 1,37%.**



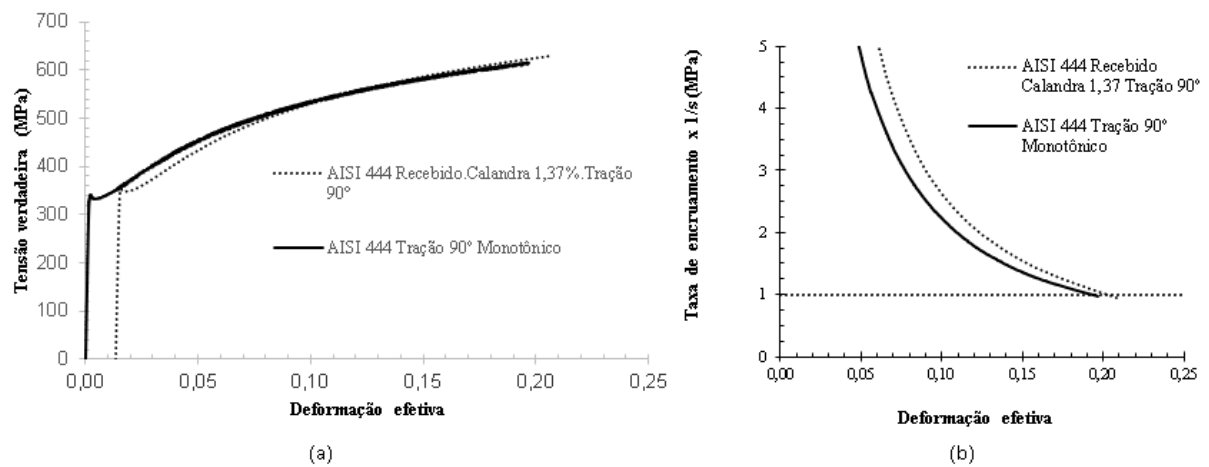
Fonte: Próprio autor

**Figura 22 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido a 90° CA 1,37%.**



Fonte: Próprio autor

**Figura 23 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 como recebido a 90° CA 1,37%.**



Fonte: Próprio autor

Verificou-se que apenas a amostra recozida e tracionada a 0° sofreu um amaciamento em relação à condição monotônica (sem a combinação de esforços mecânicos), sendo tal comportamento associado ao aparecimento do transiente na taxa de encruamento. O restante das amostras apresentou um comportamento semelhante às condições de carregamento monotônico. Nas Tabelas 4 a Tabela 7 são exibidos os resumos do respectivo comportamento mecânico do aço AISI 444 para as condições investigadas.

**Tabela 4 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 1,37%/tracionado a 0° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
<b>Calandrado</b>	337,13 ± 0,70	533,35 ± 2,50	20,81 ± 0,35	0,176 ± 0,001
<b>Monotônico 0°</b>	353,46 ± 5,60	551,98 ± 3,56	19,79 ± 19,79	0,175 ± 0,008

Fonte: Próprio autor

**Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 1,37%/tracionado a 0° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
<b>Calandrado</b>	339,11 ± 2,10	516,44 ± 1,54	22,73 ± 0,66	0,209 ± 0,001
<b>Monotônico 0°</b>	342,32 ± 0,35	518,46 ± 6,43	22,47 ± 0,60	0,195 ± 0,002

Fonte: Próprio autor

**Tabela 6 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 1,37%/tracionado a 90° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
<b>Calandrado</b>	347,14 ± 2,80	534,55 ± 2,56	20,08 ± 0,59	0,176 ± 0,017
<b>Monotônico 90°</b>	339,60 ± 11,20	523,94 ± 10,91	18,85 ± 0,34	0,174 ± 0,003

Fonte: Próprio autor

**Tabela 7 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 1,37%/tracionado a 90° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
<b>Calandrado</b>	342,24 ± 4,67	514,14 ± 5,03	22,91 ± 0,44	0,209 ± 0,013
<b>Monotônico 90°</b>	342,57 ± 9,75	515,80 ± 10,62	21,19 ± 0,37	0,187 ± 0,04

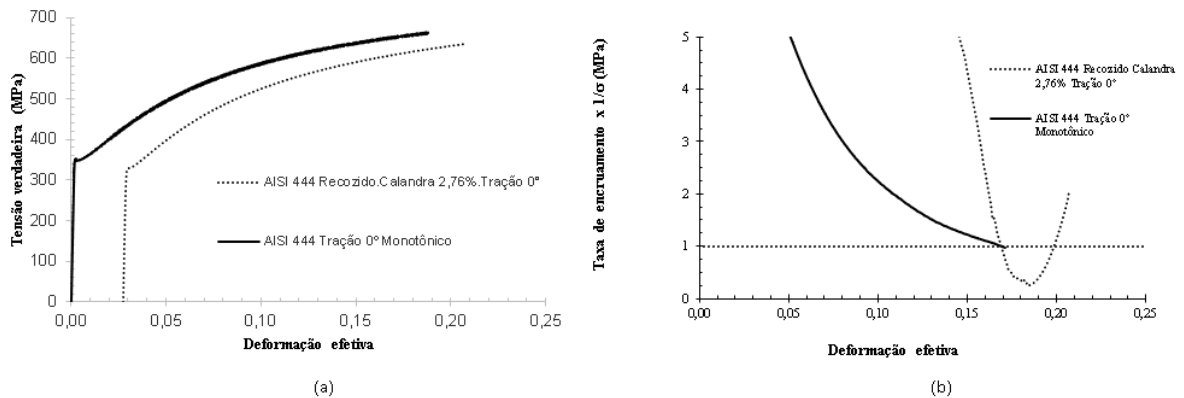
Fonte: Próprio autor

As reduções transitórias na taxa de endurecimento após uma mudança no caminho de deformação são tipicamente causadas pela ativação de novos sistemas de deslizamentos que estavam inativos antes da pré-deformação (WILSON, BATE 1993).

### 5.2.2 Calandragem com pré-deformação verdadeira de 2,76%

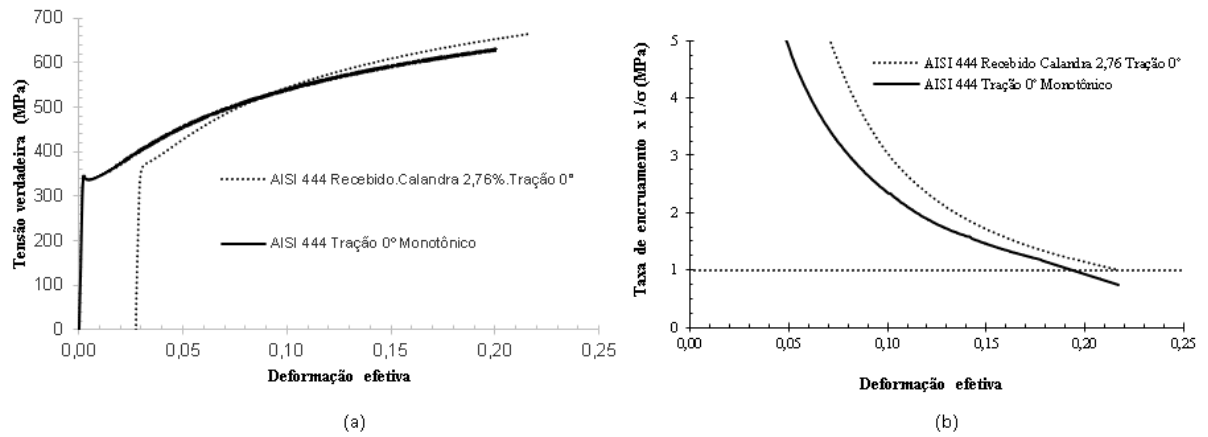
Para a deformação de 2,76% verificou-se também o efeito da calandragem nas propriedades mecânicas do aço AISI 444 após caracterização em tração a 0° e a 90° DL. As respectivas curvas dos ensaios realizados para cada direção e estado inicial do aço AISI 444 são mostradas nas Figuras 24 a Figura 27.

**Figura 24 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido 0° CA 2,76%.**



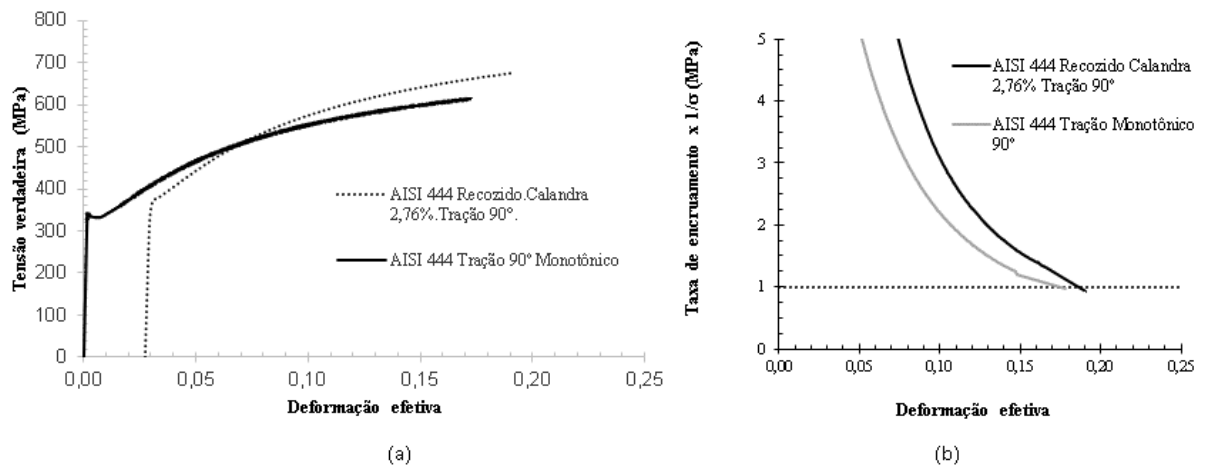
Fonte: Próprio autor

**Figura 25 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recebido 0° CA 2,76%.**



Fonte: Próprio autor

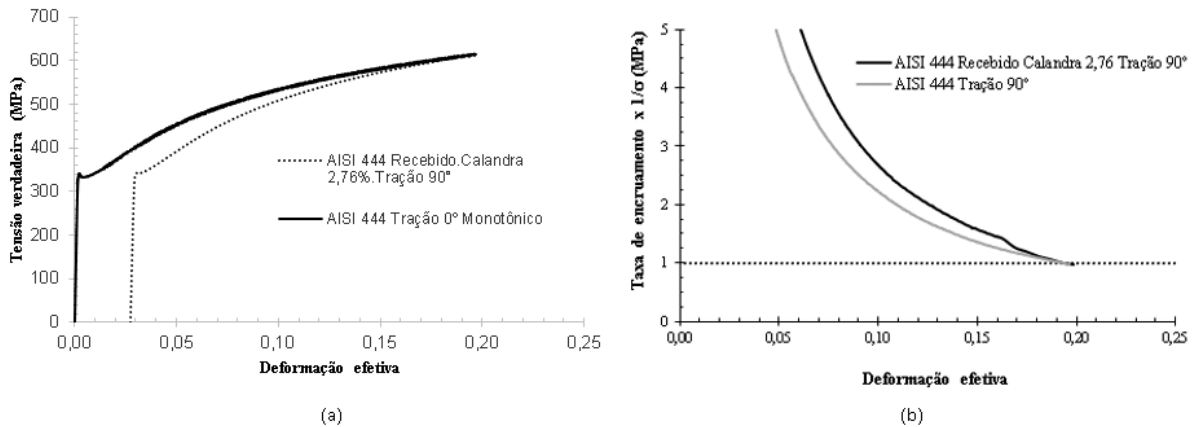
**Figura 26 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido 90° CA 2,76%.**



Fonte: Próprio autor



**Figura 27 - Curvas de (a) tensão verdadeira em função deformação efetiva, (b) taxa de encruamento em função deformação efetiva para o aço AISI 444 recebido 90° CA 2,76%.**



Fonte: Próprio autor

Apresentando um comportamento semelhante a pré-deformação de 1,37%, verificou-se que apenas o material recozido submetido a tração a 0° sofreu um amaciamento considerável e apresentou um patamar na taxa de encruamento. Para as outras condições avaliadas os materiais apresentaram comportamento semelhante ao material caracterizado, já para a taxa de encruamento, em um mesmo valor de deformação a curva para os materiais calandrados apresentaram um valor superior quando comparado ao caracterizado. Nas tabelas a seguir é possível avaliar os valores de cada condição.

**Tabela 8 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 2,76%/tracionado a 0° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
Calandrado	327,47 ± 0,35	531,15 ± 0,38	22,43 ± 0,01	0,182 ± 0,016
Monotônico 0°	353,46 ± 5,60	551,98 ± 3,56	19,79 ± 0,95	0,175 ± 0,008

Fonte: Próprio autor

**Tabela 9 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 2,76%/tracionado a 0° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
Calandrado	361,38 ± 8,63	542,55 ± 10,41	23,57 ± 0,44	0,218 ± 0,001
Monotônico 0°	342,32 ± 0,35	518,46 ± 6,43	22,47 ± 0,60	0,195 ± 0,002

Fonte: Próprio autor

**Tabela 10 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recozido/calandrado 2,76%/tracionado a 90° DL.**

Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
Calandrado	372,89 ± 1,67	575,66 ± 2,17	19,80 ± 2,41	0,192 ± 0,011
Monotônico 90°	339,60 ± 11,20	523,94 ± 10,90	18,85 ± 0,34	0,17 ± 0,003

Fonte: Próprio autor

**Tabela 11 - Propriedades mecânicas do Aço AISI 444 recebido/calandrado 2,76%/tracionado a 90° DL.**

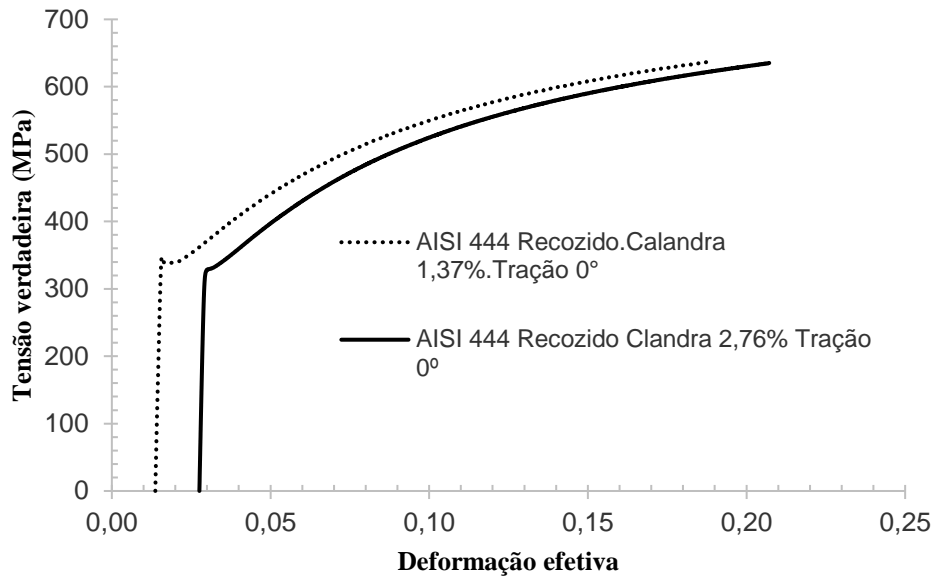
Condição	LE (MPa)	LRT (MPa)	AU (%)	n
Calandrado	356,43 ± 5,60	535,58 ± 5,49	23,76 ± 0,48	0,193 ± 0,017
Monotônico 90°	342,57 ± 9,75	515,80 ± 10,62	21,19 ± 0,37	0,18 ± 0,004

Fonte: Próprio autor

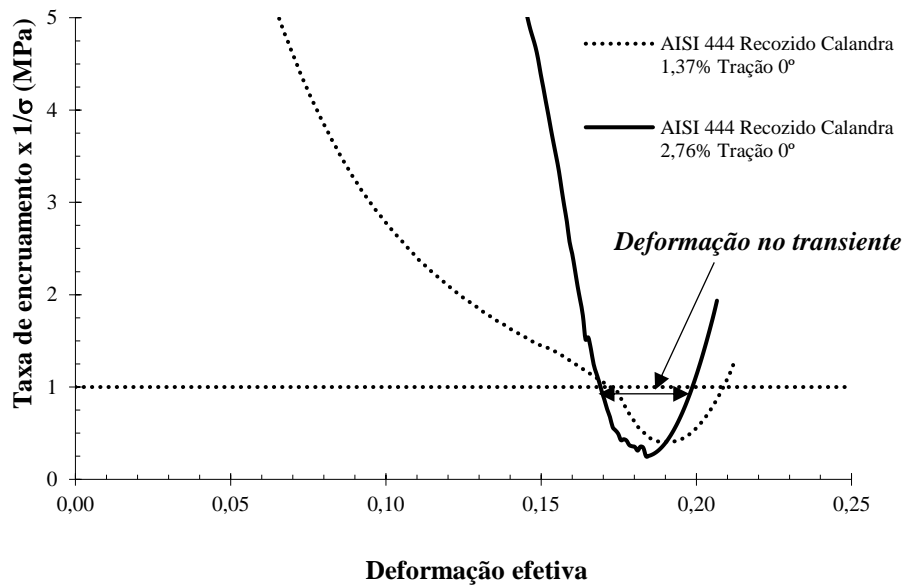
Comparando as amostras nas duas condições de pré-deformação que apresentaram amaciamento do material, é possível observar a tendência de aumento do amaciamento do material calandrado quando comparado ao estado recozido com o acréscimo da quantidade de pré-deformação em calandragem, Figura 28 (a). Em relação à taxa de encruamento, não foi percebido efeito significativo dessa variável com a presença do transiente na taxa de encruamento Figura 28 (b).

Contudo, nota-se a tendência de redução da quantidade de deformação efetiva em que se observou a presença do transiente na taxa de encruamento com o aumento da quantidade de pré-deformação em calandragem.

**Figura 28 - Curvas de (a) tensão verdadeira x deformação efetiva, (b) taxa de encruamento x deformação efetiva para o aço AISI 444 recozido, calandrado e tracionado a 0°**



(a)

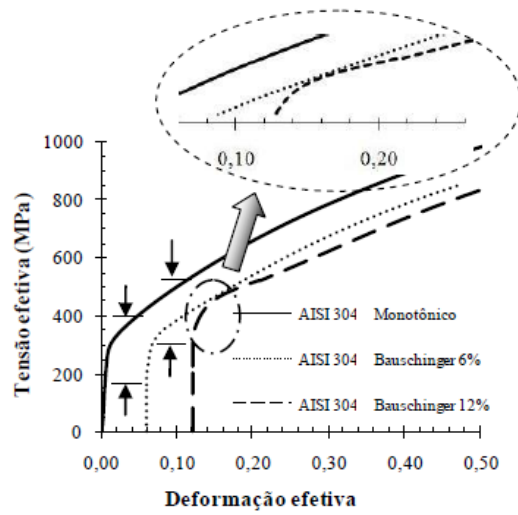


(b)

Fonte: Próprio autor

Outro estudo realizado em amostras de aço AISI 304, nos mostra o efeito da pré-deformação no comportamento mecânico do material. É possível observar que quanto maior a pré-deformação maior foi o amaciamento Figura 29 (LOPES, 2009).

**Figura 29 – Curvas de tensão efetiva – deformação efetiva para o carregamento Bauschinger.**



Fonte: LOPES, 2009

## 6 CONCLUSÃO

As amostras de aço inoxidável ferrítico AISI 444 como recebido e recozido tiveram diferentes comportamentos mecânicos quando comparada cada condição, com e sem pré-deformação e nas diferentes direções  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Pode-se concluir que:

- Nos ensaios de caracterização para as amostras como recebidas e recozidas observou-se uma isotropia e anisotropia respectivamente das propriedades mecânicas com a mudança de direção. Isso se deve ao fato de que o material teve um duplo recozimento. Não foi observado o transiente na taxa de encruamento em nenhuma condição.
- A condição, pré-deformação e a direção, foram variáveis importantes para o aparecimento de transiente na taxa de encruamento. Observou-se que apenas as amostras na condição recozida, calandrada e tracionada a  $0^\circ$  apresentaram um patamar transiente.
- Comparando as duas condições de calandragem, observou-se que para uma maior pré-deformação, ocorreu um maior amaciamento e um menor patamar de transiente.

## 7 REFERÊNCIAS

ABEL, A. **Historical perspectives and some of the main features of the Bauschinger Effect.** *Materials Forum*. 10, p 11-25, 1987.

ANAND, G.; SINHA, A.; CHATTOPADHYAY, P. P. Variation of tensile behavior of interstitial free steel rolled at cryogenic and room temperature. **Journal of the Institution of Engineers**, v. 93, p.97-103, 2012.

ARMSTRONG, P.E.; HOCKETT, J.E. Large strain multidirectional deformation of 1100 aluminum at 300 K. **J. Mech. Phys. Solids**, v. 30, 1982. p. 37–58.

ASM HANDBOOK. **Mechanical testing and evaluation.** Ohio: American Society for Metals – ASM International, v. 8, 2000. 2234p.

BOGER, R.K., WAGONER, R.H., BARLAT, F.; LEE, M.G. Continuous, Large Strain, Tension/Compression Testing of Sheet Material. **International Journal of Plasticity**, v.21, p. 2319-2343, 2005.

BOUVIER, S., ALVES, J.L., OLIVEIRA, M.C., MENEZES, L.F. Modelling of Anisotropic Work – Hardening Behaviour of Metallic Materials Subjected to Strain-Patch Changes. **Computational Materials Science**, v. 32, p. 301-315, 2005

CALLISTER, W.D.Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 589p.

CORRÊA, E. C. S. **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 233p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

CRISTOLDOULOU, N., WOO, O.T., MACEWEN, S.R. Effect of Stress Reversals on the Work Hardening Behaviour of Polycrystalline Copper. **Acta Metallurgica**, v. 34, 1553-1562, 1986.

DIETER, George Elwood. **Metalurgia Mecânica.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981, 588p.

GRILO, Tiago Jordão. Estudo de modelos constitutivos anisotrópicos para chapas metálicas. **Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.** 2011. Disponível em: <<http://ria.ua.pt/bitstream/10773/7137/1/5360.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2020.

HADDADI, H., BOUVIER, S., BANU, M., MAIER, C., TEODOSIU, C. Towards an Accurate Description of the Anisotropic Behaviour of Metals under Large Plastic Deformation: Modelling, **Numerical Analysis and Identification.** **International Journal of Plasticity**, v. 22, p. 2262-2271, 2006.

LLOYD, D.J., SANG H. **The Influence of Strain Path on Subsequent Mechanical properties** – Orthogonal Tensile Paths. *Metallurgical Transactions*, v. 10A, p. 1767 – 1772, November 1979.

LOPES, Wellington. Dissertação. Efeito da pré-deformação e direção de sollicitação no comportamento mecânico do aço AISI 430E com uso do ensaio de cisalhamento para alterar a trajetória de deformação. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2006, 124p.

LOPES, Wellington. Tese de doutorado. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2009, 207p.

RAABE, D. **Recovery and recrystallization: phenomena, physics, models, simulation**. Dusseldorf, Elsevier, 2014, 106p.

RAUCH, E. F. **The flow Law of mild steel under monotonic or complex strain path**. Solid State Phenomena, v. 23-24, p. 317-334, 1992.

RAUCH, E.F. Plastic Anisotropy of Sheet Metals Determined by Simples Shear Test. **Materials Science and Engineering**, v.241A, p. 179-183, 1998.

REED-HILL, R. E.; LONGO, W. P.. Alguns aspectos do encruamento dos metais – continuação. **Revista do Círculo da Engenharia Militar**, v. 69, p. 1-8, 1982.

SAINATH, G.; CHOUDHARY, B. K.; CHRISTOPHER, J.; SAMUEL, E. I.; MATHEW, M. D. Applicability of Voce equation for tensile flow and work hardening behavior of P92 ferritic steel. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 132-133, p. 1-9, 2015.

WANG, Z. Residual Stress in the forming of Materials. TOTTEN, G. E; HOWES, M. A. H; INOUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel materials Park**, v.II, Ohio: ASM International, 2002. 499p.

WILSON,D.V;BATE,P.S. Influences of Cell Walls and Grain Boudaries on Transient Responses of an IF Steel to Changes in Strain Path. **School of Metallurgy and Materials**, 1993, p 1-13

XIONG, R.; PENG, H.; WANG, S.; SI, H.; WEN, Y. Effect of stacking fault energy on working hardening behavior in Fe-Mn-Si-C high manganese steel by varying silicon and carbon contents. **Materials and Design**, v.85, p.707-714, 2015.

YAN, Jun. **Study of Bauschinger Effect in various spring steels**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Toronto, 1998.

ZANDRAHIMI, M; PLATIAS, S; PRICE, D; BARRET, D; BATE, P. S; ROBERTS, W. T; WILSON, D. Effects of Changes in Strain Path on Work Hardening in Cubic Metals. **Metallurgical Transactions A**, Birmingham, v. 20 A, Outubro 1989.

ZHANG, T.; ZHANG, S.; ZHANG, SONG, H.; CHENG, M.; Hardening and softening mechanisms of pearlitic steel wire under torsion. **Materials and Design**, v. 59, p. 397-405, 2014.