

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM UM ARAME TREFILADO CA60 4,20mm PARA  
UTILIZAÇÃO EM CONCRETO ARMADO

por

Leonardo Marmellini

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2016



ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM UM ARAME TREFILADO CA60 4,20mm PARA  
UTILIZAÇÃO EM CONCRETO ARMADO

por

Leonardo Marmementini

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara

Prof. Dr. Gilberto Dias da Cunha

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 2, dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS (facultativo);

MARMENTINI, L. **ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM UM ARAME TREFILADO CA60 4,20 mm PARA UTILIZAÇÃO EM CONCRETO ARMADO**. 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016

## RESUMO

Em uma indústria cada vez mais competitiva, os custos em matéria prima representam grande impacto no custo final de produção. Com o propósito de diminuir a utilização de manganês no processo de produção do aço nervurado CA60 4,20 mm, estudou-se a alteração dos limites de escoamento do material de forma mecânica. Utilizando os princípios do efeito Bauschinger para que o produto final continue atendendo a norma ABNT 7480. Para isto, foram alteradas características de um laminador a frio e foram comparados os resultados finais. Com isto indica-se que o processo é capaz de atender a atual norma, além da possibilidade de diminuição do teor de manganês da matéria prima.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efeito Bauschinger, Trefila, Laminador a frio, Arame nervurado

MARMENTINI L. **The Bauschinger Effect Study on the Ribbed Wire CA60 4,20 mm for Concrete Pavement Utilization**. 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

The industry is everyday more competitive, the costs in raw material represents a big impact at the final cost of the production. With the purpose of decrease the manganese utilization at the ribbed steel CA60 4,20mm production process, this paper have studied the limits alteration at the material flow in a mechanical form. The main idea of this study is to use the Bauschinger effect principles so the final product keeps attending the ABNT 7480 norm. In order to make this happen, the cold rolling mill characteristics have been changed and then the final results were compared. After the alteration, it was able to diagnose that the process is capable of attending the ABNT norm, besides the possibility of decrease the raw material manganese content.

**KEYWORDS:** Bauschinger Effect, Wire drawing, Cold rolling Mill, Ribbed Wire

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	2
2.1 Objetivos Específicos.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
3.1 Processo de Fabricação do Arame Trefilado.....	3
3.1.1 Aciaria.....	3
3.1.2 Laminação a quente.....	4
3.1.3 Laminação a frio.....	5
3.2 Comportamento elástico de metais dúcteis.....	8
3.2.1 Tensão e deformação de metais dúcteis.....	8
3.2.2 Teste de tração.....	9
3.2.3 Falhas em metais dúcteis, deformação elástica, plástica e fratura.....	10
3.3 Efeito Bauschinger.....	11
4 METODOLOGIA .....	13
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
6 CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
Anexo I .....	
Anexo II .....	

## 1. INTRODUÇÃO

A competitividade industrial está cada vez maior e em muitos setores o grande diferencial é o preço ofertado ao cliente. Por esta razão, as empresas buscam diminuir seus custos de produção, para se manterem vivas no mercado.

Para a Gerdau, seu grande desafio é ser global, e referência nos negócios em que atua. Entre eles o ramo do aço para construção civil [Gerdau, 2016]. Uma das maneiras mais efetivas de buscar a competitividade industrial é com o aumento da produtividade, utilizando ao máximo seus ativos e maquinário, evitando paradas por falhas durante o processamento da matéria prima.

Os produtos industrializados e comercializados no Brasil devem seguir parâmetros e normas que garantem a qualidade e asseguram o produto entregue ao cliente. Por isto busca-se processos de produção estáveis e confiáveis, garantindo que não hajam variações na qualidade e que todos itens oriundos da linha de produção atendam às exigências da norma.

O vergalhão CA60, objeto de estudo deste trabalho, tem larga utilização na construção civil brasileira, tendo aplicação em treliças, armações para tubos, telas para concreto armado entre outros. O CA60 é fabricado através do processo de laminação a frio a partir de fio-máquina. O método de fabricação do CA60 deve ser realizado através de conformação a frio, normalmente utilizando fieiras como ferramenta de conformação e deve seguir as normas da ABNT 7480. Os avanços tecnológicos trouxeram a possibilidade de conformação a frio através de cassetes laminadores, este avanço aumentou a velocidade de trefilação de 8 m/s para velocidades em torno de 17m/s com a utilização dos cassetes laminadores.

O processo de conformação a frio através de cassetes laminadores deve ter um abastecimento de fio-máquina contínuo, e para isto utiliza-se soldagem de topo, e em seguida o material é lubrificado, secado e então trefilado. Com o aumento significativo das velocidades de processamento há o aumento da probabilidade de quebras de material durante a trefilação.

Neste trabalho, será estudada a capacidade do equipamento modificar mecanicamente o limite de escoamento para que posteriormente sejam estudados novos limites de composições químicas na produção do aço, com o intuito de redução de custos dos produtos finais gerados por um laminador a frio conforme proposto por Oliveira, 2012. Ao mesmo tempo os produtos gerados deverão continuar atendendo a norma ABNT 7480 no que tange a relação do limite de ruptura em função do limite de escoamento do arame trefilado CA60 com bitola de 4,20 mm.

## 2. OBJETIVOS

Estudar a relação entre a distância entre um conjunto de roldanas e o efeito Bauschinger em um arame trefilado após três passes de redução, compreendendo a importância deste efeito para o produto final, estudando a capacidade de se diminuir o limite de escoamento mecanicamente.

### 2.1 Objetivos Específicos

Testar 4 posições diferentes entre as roldanas, alterando assim a pré tensão aplicada ao flexionar o arame nervurado e então realizar testes de tração para definir o limite máximo da distância entre roldanas para que o processo atenda a norma.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processo de Fabricação do Arame Trefilado

O processo de fabricação do aço é dividido em processo primário, com a obtenção de tarugos a partir de lingotes de aço, e em processo secundário, onde os tarugos são trabalhados para que se obtenha a forma definitiva ou semiacabada. Os processos secundários podem ser realizados a quente ou a frio.

A obtenção de arames trefilados segue o fluxo da figura 3.1:

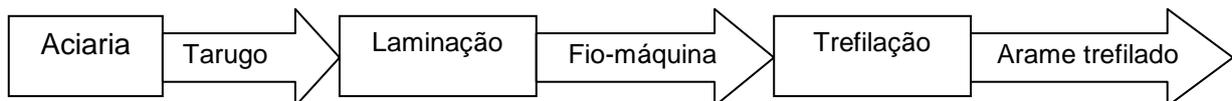


Figura 3.1 – Esquema mostrando a sequencia de processos para obtenção do arame.

##### 3.1.1 Aciaria

O processo de obtenção do tarugo é realizado através de lingotamento contínuo, iniciado em um forno elétrico a arco (FEA), isto torna possível maior utilização de sucata como matéria prima e uma redução de quatro vezes menos energia quando comparado a outros processos de produção do aço [Mourão et alli, 2007].

Uma vez que a atual norma ABNT 7480 para arames trefilados normatiza apenas as características mecânicas do aço, cabe à indústria buscar diferentes fórmulas para obtenção do aço. Devido a questões econômicas, redução de custos e unificação de aços utilizados no mesmo parque industrial adota-se o emprego do aço 1013 para obtenção do arame nervurado CA60, cuja composição química é apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - composição química alvo da aciaria para produção do aço 1013 ou equivalente.

% C	% Mn	% Si	% S	% P	Mn/S	Mn/Si
0,11	0,45	0,17	< 0,040	< 0,040	> 20	> 3

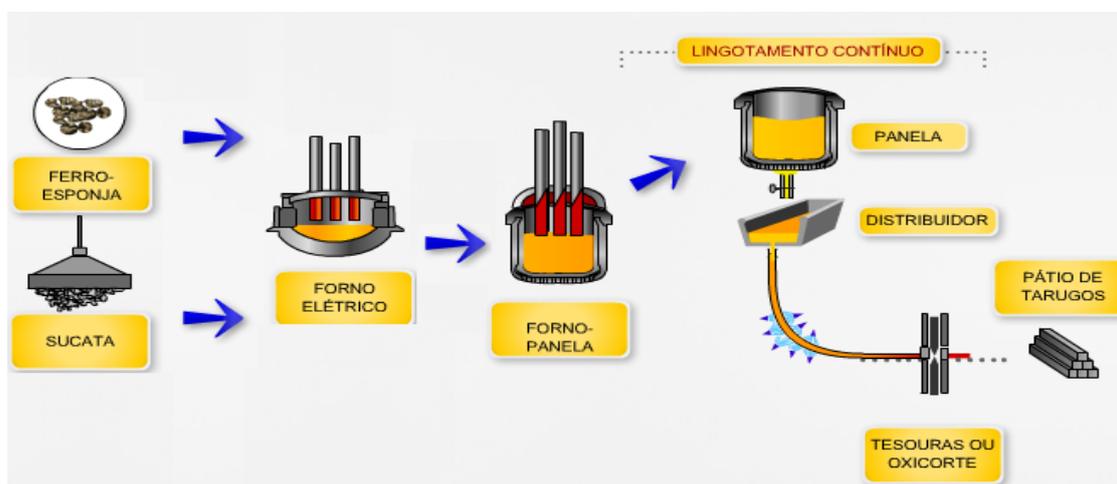
Tal composição química é ajustada durante a etapa de refino, onde a temperatura interna é elevada e a escória é formada. A escória ajuda a proteger o forno contra a radiação térmica, bem como colabora para a limpeza e purificação do aço. Após a estabilização da temperatura o metal é então vazado para a panela previamente preparada. Neste momento também é retirada uma primeira amostra do aço para que a composição química primaria seja avaliada. A quantidade de carbono contida em um determinado lote de produção, ou corrida de aciaria, é ajustada com o auxilio de duas lanças. A primeira de oxigênio, quando o objetivo for diminuir o teor de carbono. A segunda através da lança de carvão, quando o objetivo for

aumentar o teor de carbono da corrida. Então se retira nova amostra, para confirmar a composição química, e logo após, bloqueia-se a oxidação através da adição de alumínio, posteriormente inicia-se o vazamento com a retirada de escória. [Mourão et alli, 2007]

Componentes químicos como oxigênio, enxofre, fósforo e nitrogênio são formadores de inclusões, e são muitas vezes prejudiciais para as propriedades mecânicas, podendo diminuir a plasticidade e a tenacidade, bem como aumentar a probabilidade de formação de trincas e defeitos superficiais [Mourão et alli, 2007]. Deste modo é de extrema importância o controle da composição destes componentes químicos, para que as propriedades finais do aço se mantenham dentro das normas. Para tanto utiliza-se do refinamento secundário, que é realizado na panela fora do forno elétrico a arco e utilizam-se processos de desoxidação, dessulfuração (remoção do enxofre) e desgaseificação (remoção do hidrogênio e nitrogênio). A escória nesta etapa serve como uma camada protetora para oxidação do material e também ajuda no equilíbrio químico da composição. Os demais elementos químicos, como o manganês, são adicionados através de ferro-ligas.

Por último temos a fase de lingotamento contínuo, no qual o aço é retirado do forno panela e inserido em canais para a formação dos tarugos. A velocidade de lingotamento não deve ser superior a 2,9 m/min e a temperatura de lingotamento deve ser entre 1550°C e 1565°C.

De forma resumida, o fluxo do aço na aciaria é demonstrado na figura 3.2



3.2 – Sequenciamento de produção da aciaria.

### 3.1.2 Laminação a quente

No processo de laminação, o tarugo oriundo da aciaria sofre conformação a quente. Para isto, ele é introduzido em um forno, onde atinge temperatura próxima a 1050°C, após é inserido em um conjunto de passes laminadores, conforme esquema da figura 3.3, que trazem forma ao material, e também um melhoramento das propriedades dos materiais, como

ductilidade, resistência mecânica e acabamento superficial. Isto se deve a variação do tamanho de grão, existindo um limite mínimo e máximo para o tamanho de grão. Dentro destes limites variam-se a dureza e a ductilidade do material[Dieter,1981]

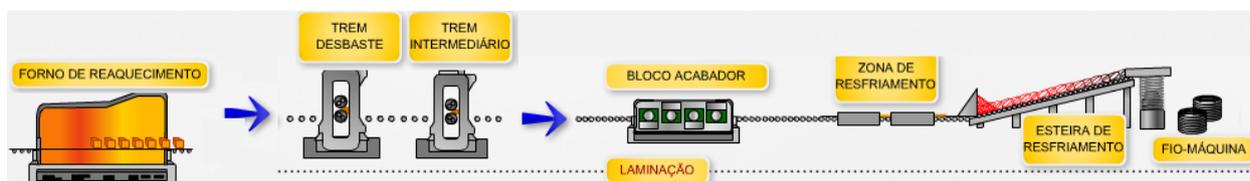


Figura 3.3 - Sequenciamento do processo de obtenção de Fio-máquina a partir de tarugos.

O Arame trefilado CA60 4,20mm é produzido a partir do fio-máquina de 7mm, onde ele é laminado a partir de um tarugo com dimensões 120mmx120mmx5000mm através de vinte e dois conjuntos de passes, nos quais os dez primeiros passes compõem o trem de desbaste, seguidos de quatro passes no trem médio e os oito últimos são considerados os passes de acabamento. As dimensões de saída de cada um dos passes, bem como o formato do perfil, são demonstradas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Sequência de reduções intermediárias para obtenção do Fio-máquina

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º	11º
Área da barra(mm)	12285	8556,25	6581,44	4654,265	3956,4	2779,09625	2045,90625	1704,6746	1243,44	989,23625	678,9465
Redução	30%	23%	23%	15%	30%	26%	17%	27%	20%	31%	23%
	12º	13º	14º	15º	16º	17º	18º	19º	20º	21º	22º
Área da barra(mm)	520,5040625	396,6605	314	262,57645	200,96	173,03127	116,8394	112,2664	71,144864	67,74864	38,465
Redução	24%	21%	10%	23%	14%	32%	4%	37%	5%	43%	

Devido as diferentes variáveis durante o processo, como a velocidade de laminação, a variação das dimensões de entrada, a temperatura de laminação e a força de conformação, o fio-máquina pode sofrer variação no diâmetro e acabamento superficial. Para tal fim é seguida a norma ABNT NBR 6354, para as características dimensionais. E ABNT NBR 6330 para a qualidade superficial.

### 3.1.3 Trefilaria e laminação a frio

O processo de trefilação consiste em reduzir a secção transversal da peça de trabalho, forçando o fio, através de uma série sequencial de moldes. Durante o processo, uma deformação plástica é obtida, com isso as características mecânicas do produto final dependem diretamente das características iniciais do material e dos fatores de trefilação. Os estudos nesta área estão vastamente difundidos, com a utilização de feiras, na qual o conhecimento do ângulo de feira, energias de atrito e tensões de trefilação são bem desenvolvidos e estabelecidos teoricamente. Contudo, para novas tecnologias não convencionais de deformação plástica, o conhecimento sobre o comportamento mecânico do material trefilado é pequeno [Rocha,2011]

O arame nervurado CA60 4,20mm é produzido conforme a norma ABNT 7480, onde são definidos o limite de escoamento mínimo de 600 MPa e um limite de ruptura mínimo de 1,05 vezes o limite de escoamento. O início do processo dá-se através de solda topo do fio-máquina para que não haja interrupção da produção, e assim o processo seja contínuo. Em seguida ocorre a decapagem, onde a carepa é removida. E então o fio-máquina é lubrificado antes de ser introduzido no conjunto de fieiras ou cassetes. Após as reduções, o material pode sofrer recozimento e/ou zincagem, para que determinadas características mecânicas e superficiais sejam atingidas. [Schaeffer,2004]

O principal problema encontrado em processos que utilizam fieiras é a alta força de atrito resultante na interface da ferramenta com o material a ser conformado, este processo resulta em um grande desgaste da ferramenta [Altan,1999].

Uma tecnologia não convencional que visa diminuir este problema é o processo de laminação a frio, para fios trefilados, na qual a fieira é substituída por um cassete laminador - *Wire Rolling Cassette*. Neste processo cada passe redutor é composto por dois trios de discos de metal duro dispostos a 120° entre si, formando um canal onde o material é conformado.

A distância radial pode ser modificada constantemente, fazendo com que se tenha um ajuste fino do diâmetro de saída do material. Com o uso de cassetes, as deformações ocorrem simultaneamente, nas direções laterais e longitudinais, diminuindo assim tensões internas, e auxiliando na uniformidade da conformação do material, fazendo com que diminua o número de microfissuras e defeitos superficiais [Mihu, 2015]

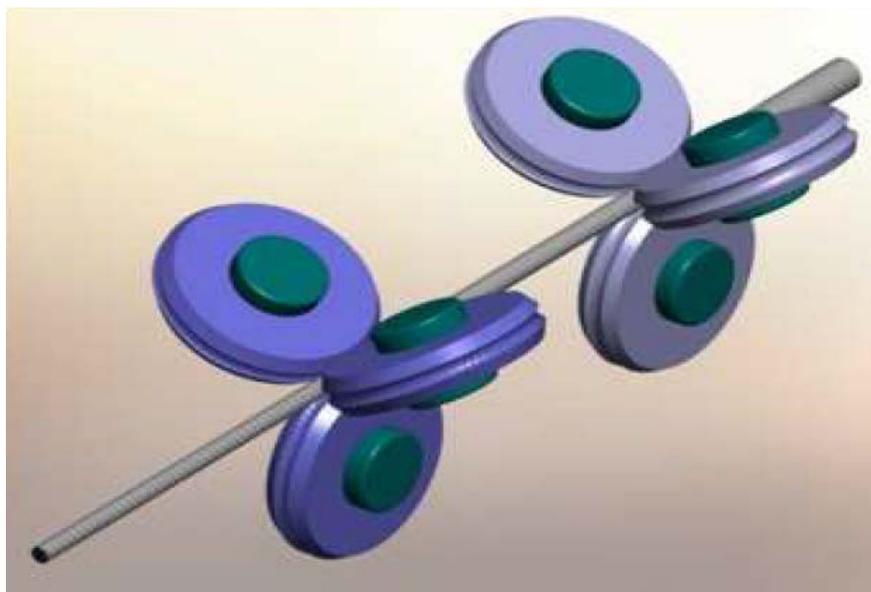


Figura 3.4 - Esquema de funcionamento de redução da área do fio-máquina pelos discos de metal duro dispostos a 120° um do outro [ROCHA, 2011]



Figura 3.5 - Cassetes Laminadores montados na máquina, e detalhe da disposição dos discos de metal duro a 120° [GERDAU 2011]

Os fatores que mais influenciam no comportamento mecânico de um material que sofre conformação por um cassete laminador são: composição química do material conformado, relação entre diâmetro inicial e final, coeficiente de atrito entre rolo e arame trefilado, força de rolamento, força de conformação, superfície de contato do rolo, raios ou forma do rolo laminador, temperatura de conformação e velocidade de conformação. [Lambiase,2011]

Na produção do CA60 4,20mm é utilizado um laminador a frio da marca Koch com três passes de redução, onde cada passe é composto por um trio de rolos de metal duro de entrada para desbaste e um trio de saída para acabamento.

Tabela 3.3 - Relação de redução de entrada e saída nos três passes.

	Entrada	1º passe		2º passe		3º passe	
		Entrada	Saida	Entrada	Saida	Entrada	Saida
d (mm)	7 mm	6 mm	5,7 mm	5,1 mm	4,8 mm	4,4 mm	4,2 mm
Redução local		27%	10%	20%	11%	16%	9%
Redução passe a passe		34%		29%		23%	

A velocidade de conformação medida na saída do último passe é de 17 m/s e a temperatura de conformação é aferida a partir da temperatura dos mancais dos cassetes, onde se mantém próximo a 120°C. Os anéis de metal duro têm espessura de 15 mm, e os raios de contato variam passe a passe, e podem ser conferidos na figura 3.6

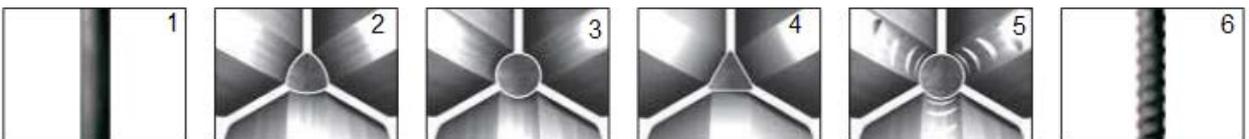


Figura 3.6 – Formatos dos rolos laminadores. 1)Fio-máquina; 2) Perfil de entrada do primeiro e segundo passe; 3) Perfil de saída do primeiro e segundo passe; 4) Perfil de entrada do terceiro passe; 5) Perfil de saída e acabamento do terceiro passe; 6) Arame nervurado. [Eurolls, 2016]

Arame nervurado. [Eurolls, 2016]

Após o terceiro passe o arame trefilado passa por um conjunto de 3 roldanas conforme figura 3.7, para que o limite de escoamento seja atingido através do Efeito Bauschinger conforme recomendação da fabricante Koch.

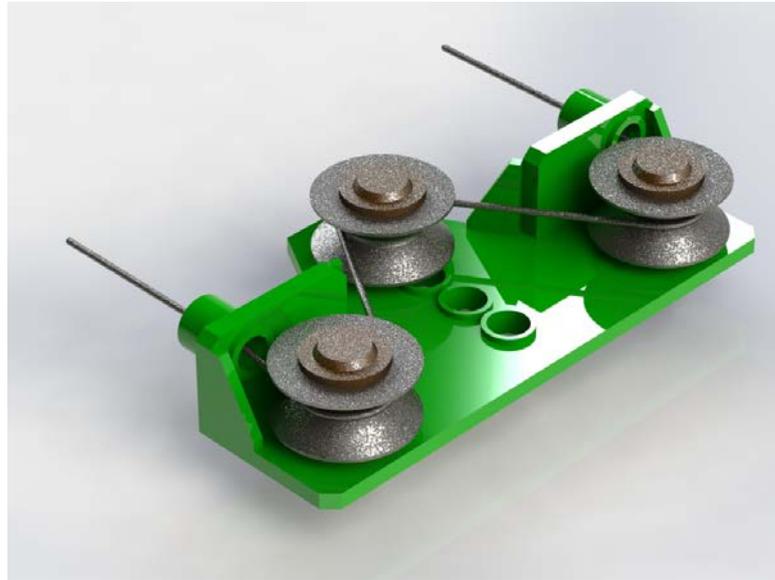


Figura 3.7 – Roldanas responsáveis pelo efeito Bauschinger

Apesar do processo se referir a conformação a frio, a cinemática interna ao se reduzir a seção gera calor, e esse é somado ao calor gerado devido ao atrito entre os discos do cassete laminador e o arame. Eder, 2006 comenta que para Mohan e Marschall (1977) o envelhecimento pode ser dividido em estático e dinâmico. Para o dinâmico o envelhecimento se dá simultaneamente com a deformação; já para o estático, o envelhecimento ocorre vagarosamente. Günduz e Cochrane (2003) completam ainda afirmando que o envelhecimento estático afeta diretamente a tensão de escoamento dos materiais e esse depende diretamente da temperatura ao final do processo do trabalho a frio. Para evitar efeitos de envelhecimento estático sobre o arame trefilado, após os passes de redução, o arame passa por um banho de água para resfriar a sua temperatura de 120 °C para 65 °C em média.

## 3.2 Comportamento elástico de metais dúcteis

### 3.2.1 Tensão e deformação de metais dúcteis

Os deslocamentos em um corpo sólido podem ser obtidos devido a rotação, translação ou deformação, e essa pode ser causada pela variação de volume ou de forma. Pequenas deformações são estudadas utilizando a teoria da elasticidade, já as deformações maiores são contempladas pela teoria da plasticidade ou pela hidrodinâmica. Ao submeter um corpo à diferentes tensões em direções e sentidos distintos, gera-se um tensor tensão resultante que é

usualmente dividido em tensor tensão hidrostático,  $\sigma_m$ , ao qual se relaciona apenas compressão ou tração pura; e um tensor tensão desvio,  $\sigma_{ij}$ , que representa a tensão cisalhante. Baseado em medidas experimentais pode-se afirmar que o escoamento em metais não depende da tensão hidrostática, ao contrário da deformação de fratura que sofre grande influência desta tensão. [Dieter,1981]

### 3.2.2 Teste de tração

Em um teste de tração, um corpo de prova é submetido a uma força de tração  $P$  que atua de forma uniaxial e crescentemente de forma contínua, como pode ser visto no esquema da figura 3.7a. Ao mesmo tempo são tomados dados de alongação do corpo de prova. Os dados são então plotados em um gráfico tensão-deformação onde a curva característica originada recebe o mesmo nome conforme figura 3.7b

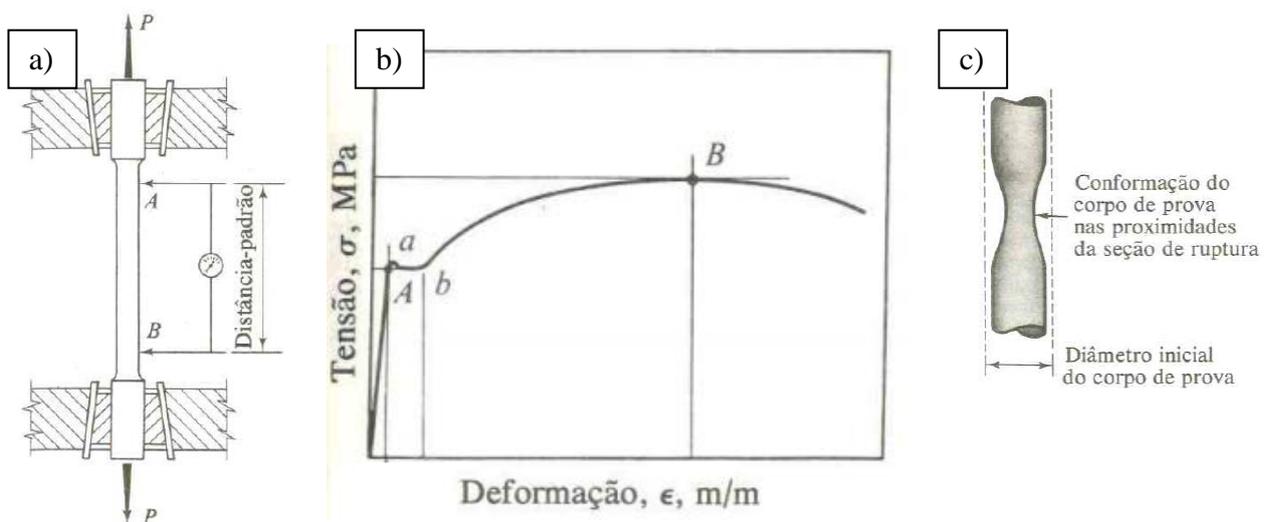


Figura 3.7 – a)Teste de tração; b)Curva tensão-deformação; c) Formação do pescoco durante o teste de tração [Popov, 1984]

Em um primeiro momento a curva tem comportamento linear, onde a tensão é linearmente proporcional à deformação. Esta região é denominada região elástica, pois o material retorna a sua configuração original sem alteração das propriedades mecânicas. Já a inclinação desta reta é chamada de módulo de elasticidade e representa a medida de rigidez do material, quanto maior o módulo de elasticidade, menor será a deformação elástica. Esta relação ficou conhecida como a *Lei de Hooke*.

A partir do ponto “A” da curva o corpo de prova sofre deformação plástica generalizada, caso a carga seja reduzida a zero o corpo estará permanentemente deformado, este ponto é

denominado de limite de escoamento. A tensão necessária para produzir deformação plástica cresce à medida que a deformação aumenta. Durante a deformação plástica o volume do corpo de prova permanece constante, porém a área da seção reta transversal decresce uniformemente, esta diminuição é compensada inicialmente pelo encruamento do material.

Após o ponto “B” da curva, a diminuição da área da seção reta do corpo de prova passa a ser maior que o aumento da carga de deformação proveniente do encruamento. Esta condição é atingida em um ponto que é ligeiramente mais fraco do que o restante do corpo de prova, e toda deformação plástica posterior será concentrada nesta região. Então observa-se o aparecimento de um pescoço que se afina localizadamente conforme é mostrado na figura 3.7c. A partir deste instante a área da seção reta passa a diminuir mais rapidamente que o aumento da carga de prova, e com isso a carga necessária para deformar o corpo de prova irá diminuir até atingir a fratura [Dieter, 1981 e Popov, 1984].

Com base neste teste se obtêm o limite de escoamento e o limite de ruptura de uma determinada amostra. As atuais máquinas de tração são capazes de plotar as curvas de tensão automaticamente, e também trazem os limites de escoamento e de ruptura de forma rápida e prática.

Segundo Schaeffer, 2004, para aços baixo carbono a velocidade de conformação influencia na resistência ao escoamento, portanto para critérios comparativos é necessário que tanto as velocidades de ensaios quanto de produção dos corpos de prova oriundo de conformação a frio sejam iguais para todas as amostras testadas.

### 3.2.3 Falhas em metais dúcteis, deformação elástica, plástica e fratura

Em um nível microscópico, metais são um conglomerado de milhões de cristais minerais dispostos aleatoriamente. Ao se aplicar uma carga axial sobre um corpo, as tensões de cisalhamento irão se desenvolver ao longo de planos, que fazem ângulos de 45 graus em relação à carga aplicada, e estes cristais deformam plasticamente por meio de deslizamento translacional. Quando a carga aplicada atinge um valor suficientemente elevado, os átomos são forçados a se deslocarem ao longo de um plano de deslizamento fazendo com que haja deformação plástica, ainda que os átomos sigam presos uns aos outros. [Popov, 1984]

Ao continuar a aplicação de carga, os planos de deslizamento dos grãos, que se encontram em direções diferentes, tendem a dificultar os movimentos uns dos outros; e assim a resistência ao movimento das discordâncias aumenta.

Segundo Yerlici, 1958 ao se aplicar uma carga inicial e realizar trabalho a frio aumenta a sua força elástica e diminui a sua ductilidade.

Para cargas maiores do que ponto de escoamento, muitos dos cristais sofrem deformação permanente, porém cristais localizados em planos melhores orientados sofrem apenas deformação elástica. Ou seja, ainda que o corpo de prova tenha atingido o seu limite de escoamento, internamente alguns cristais seguem se comportando como no regime elástico. Quando a carga é removida os grãos que continuam em regime elástico tendem a encurtar e ao fazê-lo, comprimem os grãos vizinhos que estão sob regime plástico, isto faz com que surja tensão residual de compressão sobre os grãos plasticamente tensos.

### 3.3 Efeito Bauschinger

Caso um material seja carregado em uma direção axial no regime plástico, e em seguida descarregado e então carregado no sentido inverso, durante a recarga pode ser produzido um nível de tensão de escoamento mais baixo do que o do carregamento primário, este efeito é conhecido como Efeito Bauschinger descrito em 1986, porém, sabe-se que o fenômeno é mais complexo do que descrito inicialmente.

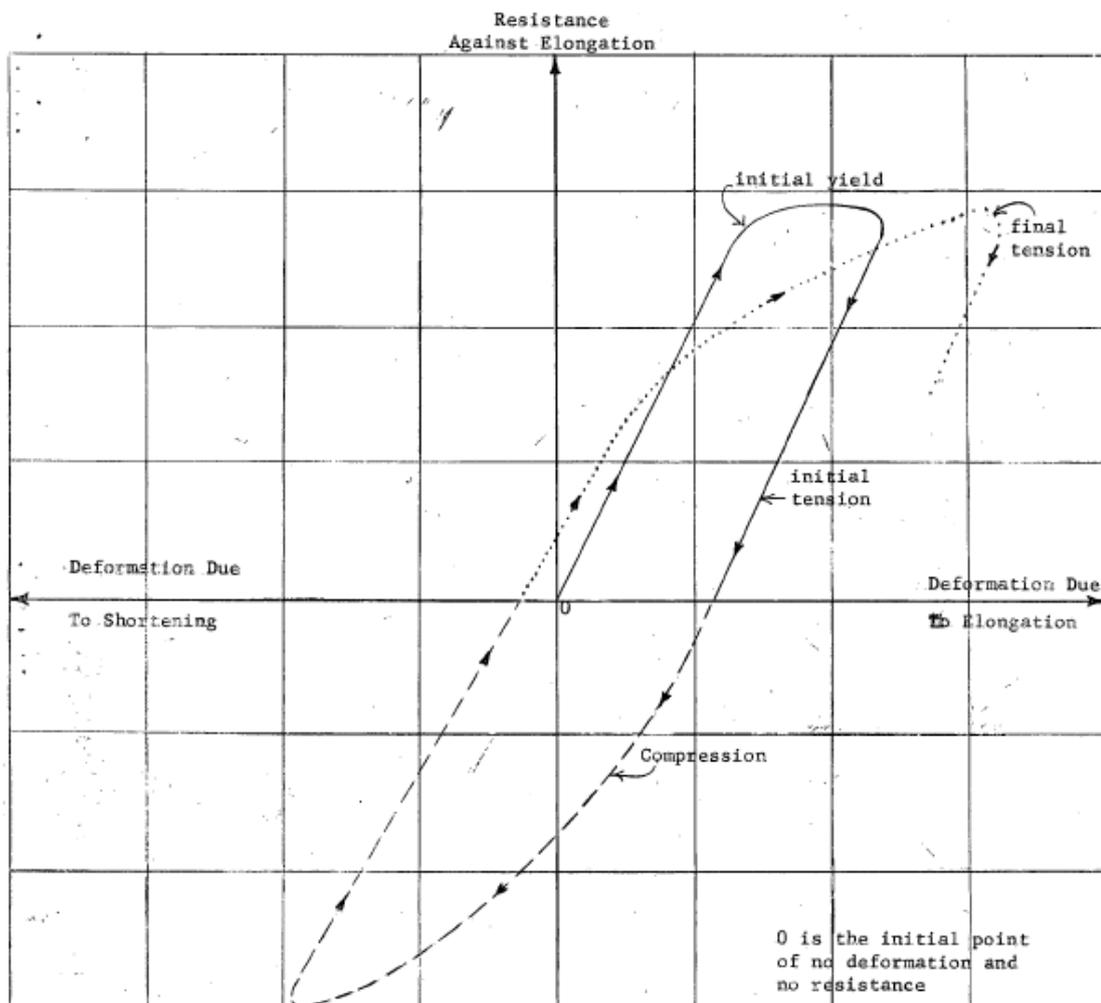


Figura 3.8 – Sequenciamento do efeito Bauschinger [Yerlici, 1958]

Na figura 3.8 Yerlici , 1958, demonstra o Efeito Bauschinger, onde a linha cheia mostra a tensão inicial em uma barra de aço para reforço de estruturas de construção civil, começando em zero a deformação e a resistência. Ao atingir o ponto de escoamento, a tensão é então liberada, e a resistência volta a zero, onde pode-se notar que há deformação permanente. Em seguida o gráfico segue sobre a linha tracejada que representa a compressão da barra de aço e então o carregamento é novamente retirado.

Diversas teorias foram desenvolvidas visando explicar o efeito Bauschinger no último século. Inicialmente foi proposta a Teoria das Tensões Internas [Heyn, 1918], depois foi proposto por Masing,1926 a teoria do modelo composto. Já o autor Haus, 2011, aponta que a teoria com maior aceitação é a teoria do deslocamento, proposta inicialmente por Mott,1952, e desenvolvida por Seeger,1957, citando a formação de empilhamentos de discordâncias nas barreiras. Tais barreiras podem impedir os movimentos das discordâncias, tanto quanto o contorno de grão, e para isto foi proposta a equação 3.1 para tensão de cisalhamento:

$$\tau_i = \tau_F + \tau_{BK} \quad (3.1)$$

Onde  $\tau_i$  é a tensão de cisalhamento,  $\tau_F$  é a tensão de atrito do plano de deslizamento e  $\tau_{BK}$  é a tensão contrária gerada pelas discordâncias empilhadas.

Haus,2011, também cita a alternativa proposta por Embury,1985 em relação à tensão de escoamento para os sentidos iniciais ( $\sigma_F$ ) e reversos ( $\sigma_R$ ) através das equações:

$$\sigma_F = \sigma_0 + \sigma_{for} + \sigma_{BK} \quad (3.2)$$

$$\sigma_R = \sigma_0 + \sigma_{for} - \sigma_{BK} \quad (3.3)$$

Onde  $\sigma_0$  é o fluxo de tensão da base;  $\sigma_{for}$  é o efeito de endurecimento pelas discordâncias e  $\sigma_{BK}$  é a tensão contrária.

Pode-se concluir então que quando aplicado o ciclo de carregamento inicial, seguido pelo carregamento reverso, os termos das tensões geradas pelas discordâncias tendem a se anular quando as discordâncias de sinal contrário entrarem em contato, reduzindo assim o encruamento e o limite de escoamento. Este raciocínio é aplicável apenas para as discordâncias móveis, o que torna o Efeito Bauschinger limitado após determinada deformação plástica ser atingida.

Haus,2011 afirma ainda que  $\sigma_{BK}$  pode ser escrito experimentalmente através da equação:

$$\sigma_{BK} = (\sigma_F - \sigma_R)/2 \quad (3.4)$$

E que a maioria das estimativas de  $\sigma_{BK}$  foram feitas a com base em medições de  $\Delta\sigma_P$ . Logo torna-se conveniente avaliar a existência do Efeito Bauschinger e analisar sua magnitude

através da variação da pré tensão gerada pela variação da distância entre as roldanas presentes no laminador a frio.

Já o parâmetro Bauschinger de tensão  $\beta_\sigma$  propõe que a redução da elasticidade está relacionada a pré tensão pela equação:

$$\beta_\sigma = \Delta\sigma_P / \sigma_P \quad (3.5)$$

Quanto menor o valor de  $\beta_\sigma$  menor será o efeito Bauschinger.

#### 4. METODOLOGIA

Considerando que o Efeito Bauschinger deve ocorrer no arame a partir de uma pré tensão aplicada em um sentido, e logo após outra pré tensão aplicada no sentido reverso, escolheu-se uma maneira prática de observar o fenômeno, pois devido ao pequeno diâmetro do arame nervurado é impossível a realização de um teste de tração e logo após compressão. Para fins de comparação com a norma, e validação da capacidade do processo produtivo, necessário se faz que os testes sejam feitos em materiais que tenham sido fabricados sob condições reais de fabricação.

Para garantir que as amostras sejam homogêneas quanto à composição química, todos os testes foram feitos com apenas uma corrida de aciaria. Posteriormente os tarugos oriundos da aciaria foram laminados em sequência para que o fio-máquina tenha menor variação dimensional, devido a ajustes comuns na linha de laminação. Com isto, foram produzidos quatro carretéis do arame nervurado CA60 4,20 mm sob as mesmas condições de velocidade de conformação e temperatura variando-se apenas a distância entre as roldanas. Esta variação da distância das roldanas está diretamente ligada a uma variação na pré tensão aplicada ao material durante o processo, pois ao passar por uma roldana, o material é flexionado em uma direção, e ao passar pela roldana seguinte, o material é flexionado no sentido inverso, seguindo o princípio do Efeito Bauschinger. A sequência de imagens 4.1a a 4.1d mostra a variação da distância da roldana para a produção de cada um dos carretéis.

Após a produção dos carretéis de amostra, eles foram abertos, e trinta amostras de arame nervurado de cada um dos carretéis foram recolhidos, garantindo assim uma boa precisão dos ensaios de tração. As amostras foram testadas em uma máquina EMIC com capacidade de 10 toneladas, localizada no laboratório de ensaios da unidade da Gerdau, em Sapucaia do Sul, para a definição de um valor médio e desvio padrão dos parâmetros: limite de escoamento, limite de ruptura e relação, cuja equação é:

$$R = \sigma_{rup} / \sigma_{esc} \quad (4.1)$$

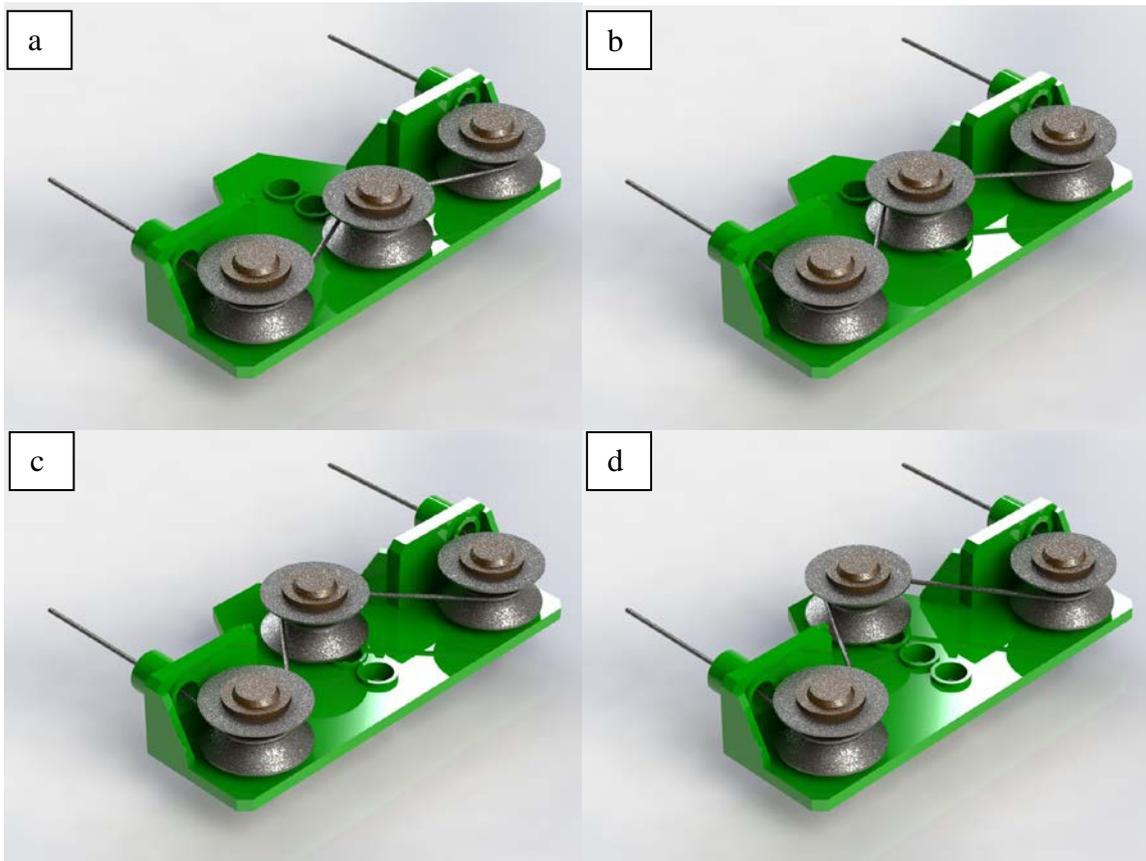


Figura 4.1a ate 4.1d – Variação da posição central da roldana como variável do processo

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O resultado das medições é apresentado na tabela 5.1. Primeiramente pode-se afirmar que o Efeito Bauschinger se mostrou presente na variação de distância das roldanas. Para a primeira posição (a) os resultados apontam que produtos gerados nesta configuração não atenderiam a norma NBR 7480, pois a relação ficou abaixo de 1,05.

Tabela 5.1- Resultado das amostras com valores médios e desvios padrão

Posição		LE(Mpa)	LR (Mpa)	Relação
1	<b>Média</b>	<b>767,090</b>	<b>793,125</b>	<b>1,034</b>
	Desvio Padrão	15,576	7,761	0,016
2	<b>Média</b>	<b>739,578</b>	<b>790,437</b>	<b>1,069</b>
	Desvio Padrão	12,226	13,085	0,006
3	<b>Média</b>	<b>743,049</b>	<b>791,203</b>	<b>1,065</b>
	Desvio Padrão	19,402	19,453	0,006
4	<b>Média</b>	<b>738,671</b>	<b>792,544</b>	<b>1,073</b>
	Desvio Padrão	15,254	11,787	0,011

Ao avançar para a segunda, terceira e quarta posição, observou-se uma grande redução nos limites de escoamento do material, e uma manutenção dos valores para o limite de ruptura.

Porém, nestas posições houve uma estabilização dos resultados, não havendo variação entre as mesmas.

Primeiramente acredita-se que o Efeito Bauschinger tenha atingido o seu limite já na segunda posição, onde o efeito dos empilhamentos não interfere mais na redução do limite de escoamento do material.

Uma segunda teoria aceitável é que não houve um aumento considerável da pré tensão aplicada ao material, para que houvesse um aumento do efeito Bauschinger.

Analisando os resultados pode-se afirmar que o laminador a frio instalado na unidade de Sapucaia do Sul, na empresa Gerdau, tem condições de alterar mecanicamente, após os passes de redução, o limite de escoamento do material por ele trefilado, sendo possível então alterações na composição química do material produzido na aciaria. Essas mudanças visam um melhor aproveitamento das ligas e diminuição dos custos com componentes, por exemplo o manganês.

## 6. CONCLUSÕES

Pode-se concluir Que:

- O processo atual atende a norma ABNT 7480.
- As roldanas projetadas influenciam diretamente o limite de escoamento, através do efeito Bauschinger.
- Existe margem, frente a norma, para que a aciaria teste novos limites inferiores de manganês no aço AISI 1013, reduzindo assim os custos com prima.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6330: Fio-máquina de uso geral, destinado à trefilação e laminação a frio, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6354: Fio-máquina de aço destinado à trefilação e laminação a frio, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado, 2007.

ALTAN, T. et. AL. **“Conformação dos Metais: Fundamentos e Aplicações.”** São Carlos, EESC-USP, 1999

DIETER, E. G. **“Metalurgia Mecânica”**. Ed. Guanabara Dois, Brasil, 2ª edição, 1981

EDER, A. E. **“Influência do Teor de Nitrogênio na Trefilação do Aço Equivalente ao ABNT 1013”**. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia UFRGS, Porto Alegre, 2006

GUND-UZ, S. ; COCHRANE, R. C. . **“Effect of Dynamic Strain Aging on Mechanical Properties of Vanadium Microalloyed Steel”**. Materials Science Technology, Vol 19, p 422-428, 2003.

HAUS, S. A. **“Influência do Efeito Bauschinger no Retorno Elástico em Aços Avançados de Elevada Resistência”**. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia UFPR, Curitiba, 2011

LAMBIASE F. ; ILIO A. di , **“A parametric Study on Residual Stresses and Loads in Drawing Process With Idle Rolls”** . University of L’Aquila, Italy 2011.

MOHAN, R. ; MARSCHALL, C. **“Cracking Instabilities in a Low-Carbon Steel Susceptible to Dynamic Strain Aging ”**. Acta Metallurgica, Vol. 4, No06, p. 1933-1948, 1998.

MIHU A.M. et. al. **“The Influence of Process Parameters on Non-Conventional Technology in Drawing Cassette Roller Die”**. Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2015

MOURÃO, M. B. ET. AL. **“Introdução a siderurgia”**. São Paulo: ABM, 2007

OLIVEIRA, E. L. de, **“Estudo da Otimização de Manganês em Aço SAE 1541 Modificado e da Sua Influencia nas Propriedades Mecânicas da Vergalhões”**. Trabalho de Diplomação Departamento de Metalurgia UFRGS, Porto Alegre 2012.

POPOV, E. P. **“Resistência dos Materiais”**. Ed. Prentice-Hall, Brasil, 2ª edição, 1984

ROCHA, F. A. C. da **“Desenvolvimento de Um Sistema de Ventilação Forçada Para Secar o Fio Máquina na Laminação a Frio de Vergalhoes”**. Dissertação de Mestrado PGETEMA, Porto Alegre, 2012.

SCHAEFFER, L. **“Conformação Mecânica”**. Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, 2ª edição, 2004

YERLICI, V. A. **“Notes on possible Bauschinger Effect on the Reinforcement Steel in a continuously reinforced concrete pavement”**, Lehigh University , 1958.

**ANEXOS**

## ANEXO A

Gráfico com os 30 ensaios em cada posição, contendo Limite de Escoamento; Limite de ruptura e Relação



## ANEXO B

Desenho técnico da peça desenvolvida para variar as distâncias e pré tensão aplicada pelo dobramento do material.

