

## 2

### Processo de Laminação

O processo de laminação atua na forma do material, modificando-lhe a sua geometria. Para isso, há necessidade da influência de agentes mecânicos externos; que são os meios de se realizar tal processo.

Na laminação, os agentes mecânicos são os cilindros de trabalho em movimento de rotação, acionados pelo conjunto de motores e caixas de transmissão, que geram energia suficiente para causar a deformação do material que está sendo laminado. (Figura 2.1)

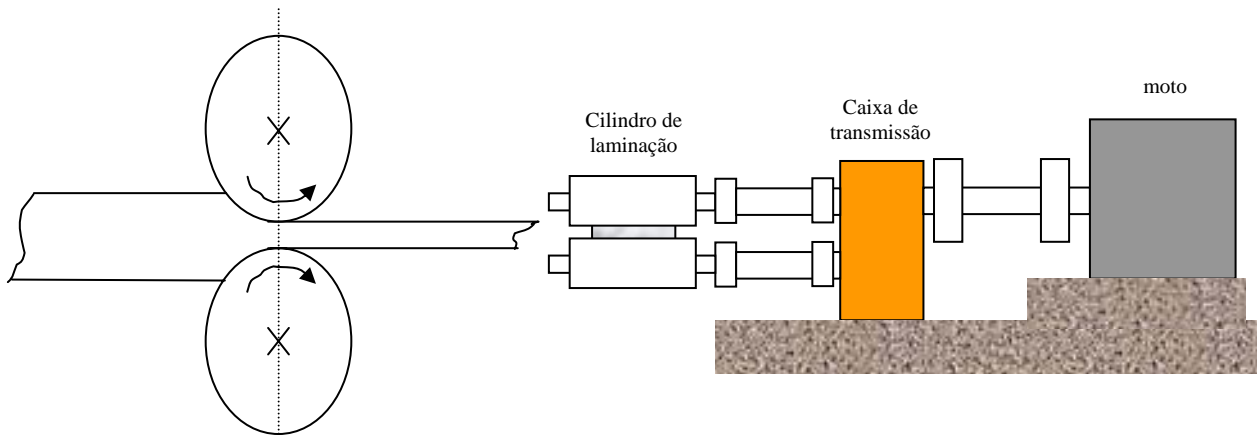


Figura 2.1 - Desenho Esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio (Fonte - CSN)

O comportamento da deformação em função das tensões resultantes da ação do pressionamento dos cilindros de trabalho sobre o material é de acordo com a curva Tensão x Deformação, apresentada na Figura 2.2.

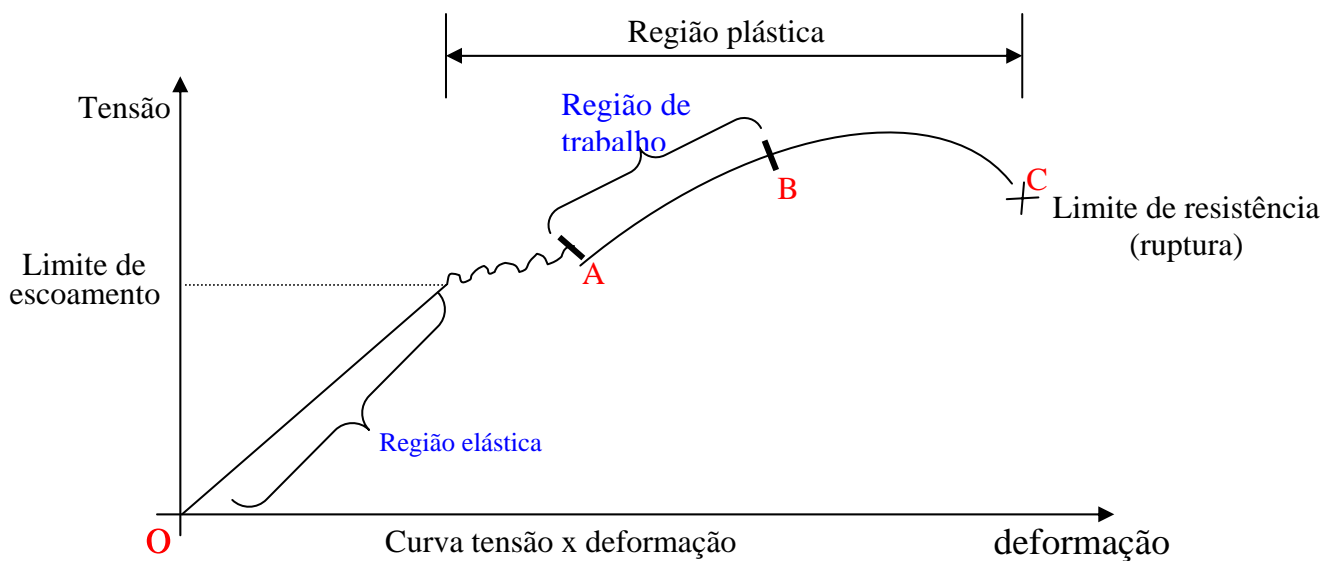


Figura 2.2 – Curva Tensão deformação para os aços  
(Fonte- Laminação dos Aços- ABM1997)

O ponto de trabalho deve se situar no intervalo AB.

Em condições ideais, o ponto de deformação seria fixo, no entanto na prática isto não ocorre, tendo em vista que as condições de processo não são rigidamente constantes, entretanto, algumas observações devem ser consideradas, tais como.

Na região AO não ocorre deformação, com o material recuperando a sua forma inicial.

Na região BC existe o risco de se ter à ruptura do material, pois se trabalharmos nesta região, nos aproximamos do limite da resistência do material e uma variação mais brusca do processo poderá levar a uma condição de deformação máxima que o material resiste, ocorrendo, portanto a sua ruptura.

Portanto na laminação é muito importante conhecermos o comportamento do aço que está sendo laminado, sob as condições de processo, tais como:

- Velocidades de laminação
- Tensões de estiramento
- Sistema de Controle de Espessura

- Reduções aplicadas
- Cilindros utilizados

## 2.1

### Teoria Geral da Laminação

Analisando a Figura 2.3, podemos verificar que nos pontos onde o material toca os cilindros de trabalho, determinamos o Plano de Entrada. Nesta posição, o material se encontra com uma velocidade de entrada ( $V_1$ ) e com uma espessura de entrada ( $H_1$ ).

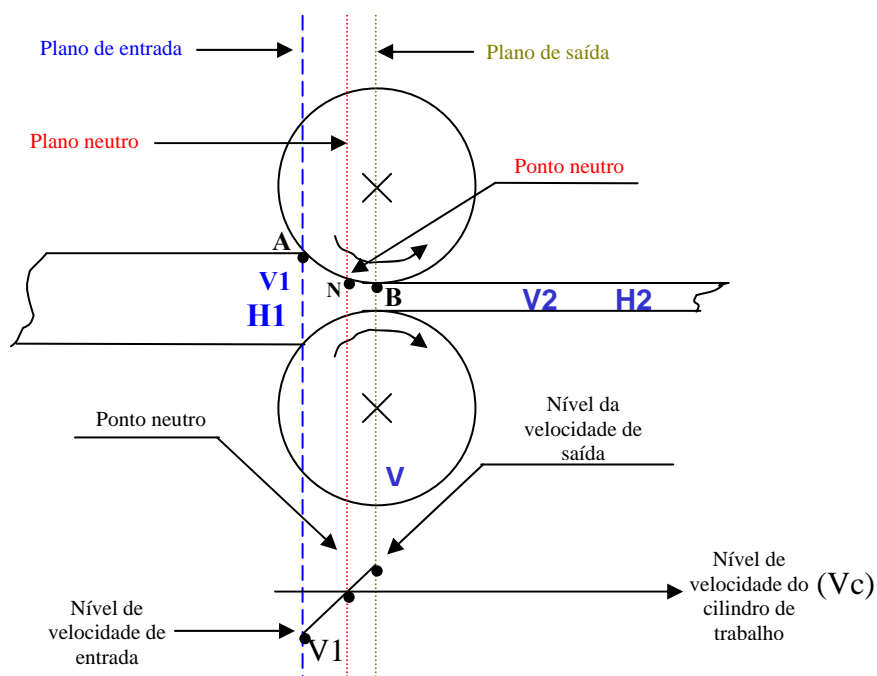


Figura 2.3 – Arco de contato na laminação  
(Fonte – Laminação a frio dos acos CSN)

A medida que o material vai sendo deformado, sua velocidade vai aumentando até chegar ao ponto onde a velocidade da tira que está sendo deformada é igual à velocidade dos cilindros de laminação. Este ponto chamamos de Ponto Neutro e o plano sobre o qual o mesmo se encontra é chamado de Plano Neutro. Continuando o processo de deformação, a velocidade da tira continua aumentando até o ponto onde o material deixa de tocar os cilindros de trabalho.

Nesta região determinamos, portanto, o Plano de Saída, onde o material se encontra com uma velocidade de Saída ( $V_2$ ) e com a espessura reduzida ( $H_2$ ).

Podemos então estabelecer algumas relações, tais como:

- 1 – O comprimento de arco de cada cilindro, “na região de” contato com a tira, chamamos de arco de contato (AB).
- 2 – No ponto neutro, onde a velocidade da tira é igual à velocidade do cilindro, não ocorre deslizamento.
- 3 – Quando a tira entra no vão dos cilindros, sua velocidade é menor que a do cilindro ( $V_1 < V_C$ ), portanto temos um deslizamento à ré.
- 4 – Na saída do vão dos cilindros a tira se move mais rapidamente que o cilindro ( $V_1 < V_2$ ), de forma que temos então um deslizamento avante.
- 5 – A diferença de velocidade de saída menos a velocidade do cilindro é definida como avanço, e a relação entre velocidades

$$\frac{V_2 - V_C}{V_C} \text{ é chamada de deslizamento avante (f) } f = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \Rightarrow V_2 = (1 + F)$$

Continuando a nossa avaliação com relação aos fenômenos que ocorrem no passe de laminação, vamos fazer uma análise do processo de laminação com o Princípio da Vazão Constante Figura 2.4.

Princípio: “Para um fluido em movimento em um duto, o produto da velocidade x a área da seção reta do duto, permanece constante ao longo de toda trajetória do fluido, qualquer que seja a forma geométrica do duto”.

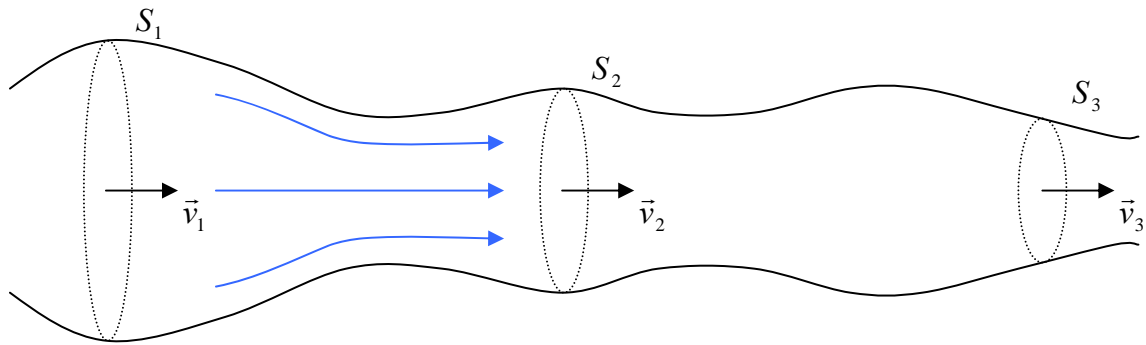


Figura 2.4 – Fluxo de massa na laminação  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

$$S_1 \vec{V}_1 = S_2 \vec{V}_2 = S_3 \vec{V}_3 = \dots = S_n \vec{V}_n$$

Como, no caso da laminação, a seção reta é retangular, temos que:

$$S^1 = H_1 \times L$$

$$S^2 = H_2 \times L$$

$$S^3 = H_3 \times L$$

.

.

$$S_n = H_n \times L$$

Onde L é a largura da tira sendo laminada

Conforme citado anteriormente na laminação consideramos a largura constante, sendo assim, a relação é simplificada para

$$H_1 \vec{V}_1 = H_2 \vec{V}_2 = H_3 \vec{V}_3 = \dots = H_n \vec{V}_n$$

Portanto a relação do produto da velocidade x a espessura do material é constante. (Figura 2.5)

$$H \times V = \text{Cte}$$

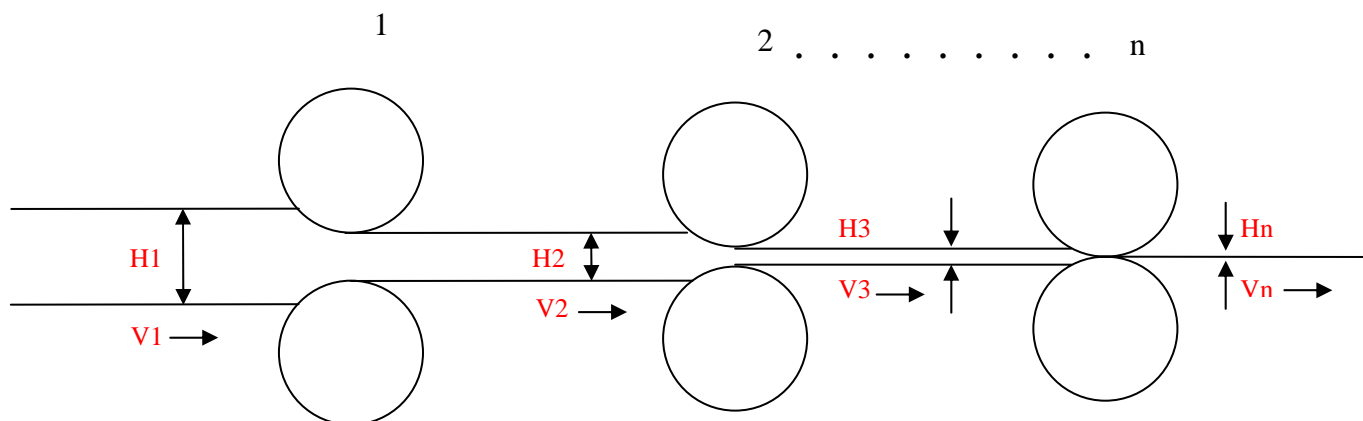


Figura 2.5 – Fluxo de massa constante na laminação  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

Passaremos agora a fazer análise da distribuição de pressão na superfície do cilindro ao longo do arco de contato. De fato esta distribuição de pressão varia com diferentes condições de laminação e se este comportamento é conhecido, podemos também determinar como a força de laminação se comporta.

Para estudar esta distribuição de pressão, assumiremos quatro hipóteses. Primeiro que os cilindros são perfeitamente rígidos e não sofrem qualquer deformação sob os altos esforços da laminação; segundo, que não haja tensões na tira; terceiro, desprezaremos o atrito ao longo do arco de contato e quarto, supomos que a tira não fica mais encurvada a medida que vai sendo deformada.

Quando a tira entra no vão, pelo plano de entrada, começa a deformação, a pressão exercida na tira é igual ou superior ao limite de escoamento do material. A pressão se manterá constante ao longo do arco de contato até o plano de saída. Assim, se fizermos um gráfico da pressão do cilindro contra a distância ao longo do arco de contato (Figura 2.6), obteremos uma distribuição uniforme de pressão.

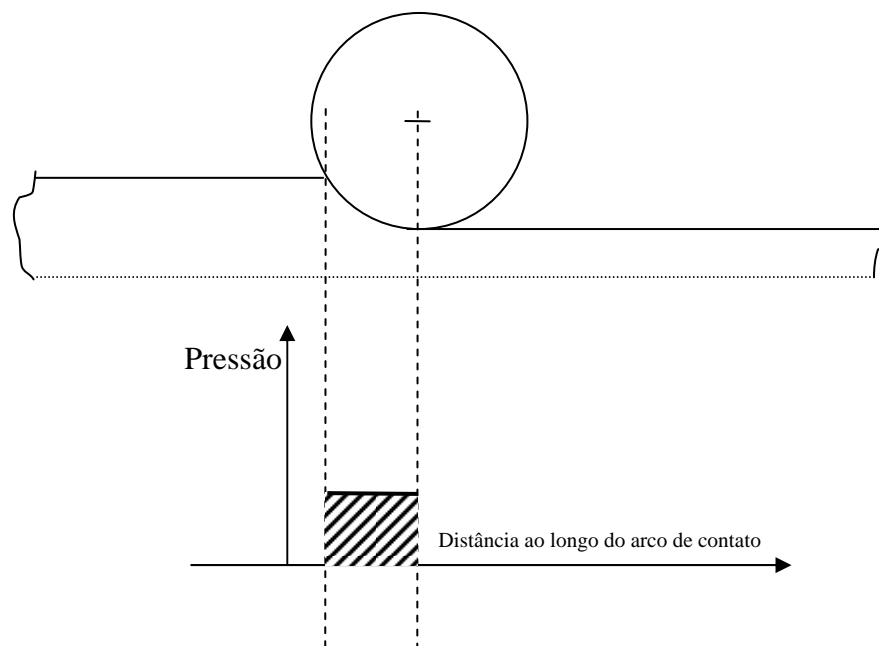


Figura 2.6 – Pressão no arco de contato  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

A área limitada sob esta curva corresponde à força de laminação específica, ou força de laminação por milímetro de largura do material que está sendo laminado.

Vamos assumir agora que temos tensões trativas (ou forças por unidade de área transversal da tira) iguais na entrada e na saída do vão dos cilindros, Figura 2.7. Como as tensões ajudam a deformação da tira, o que se observa é uma redução na altura da curva de distribuição de pressão, conseqüentemente a força de laminação decresce.

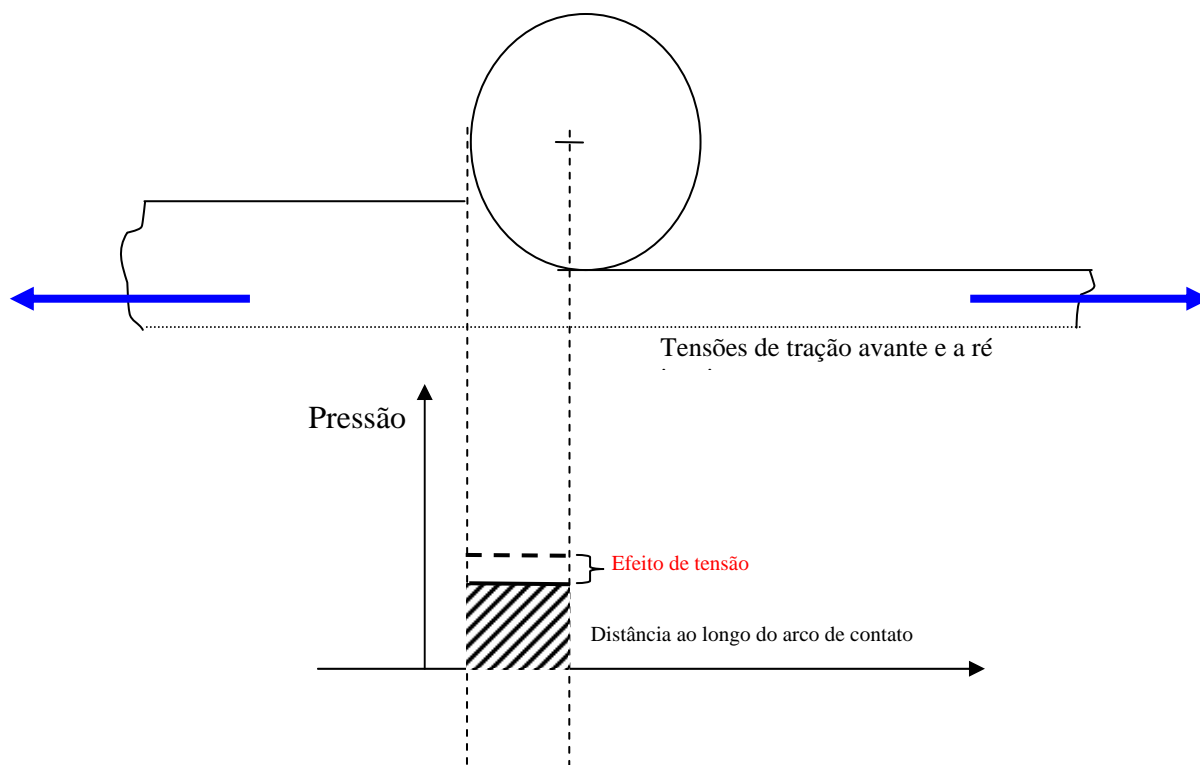


Figura. 2.7 – Efeito das tensões no arco de contato  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

Imaginemos agora uma situação com a tensão de entrada muito maior que a tensão de saída. Então a distribuição de pressão se modifica e observamos que esta distribuição não é mais uniforme e sim indicada conforme a Figura 2.8.



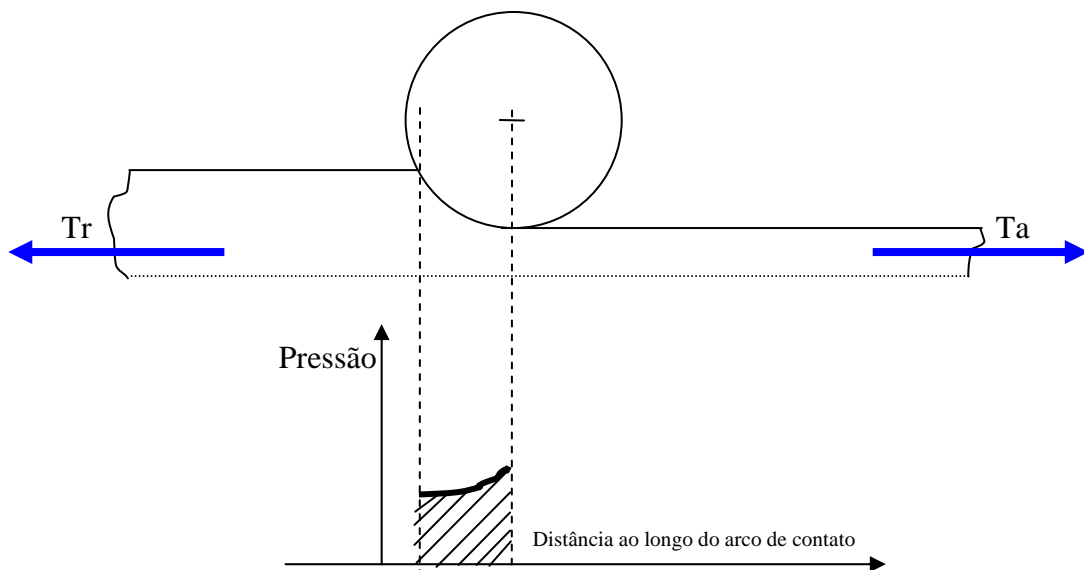


Figura. 2.8 – Efeito da tensão a ré no arco de contato  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

Entretanto se a tensão da saída supera a da entrada a inclinação oposta ocorre. (Figura 2.9)

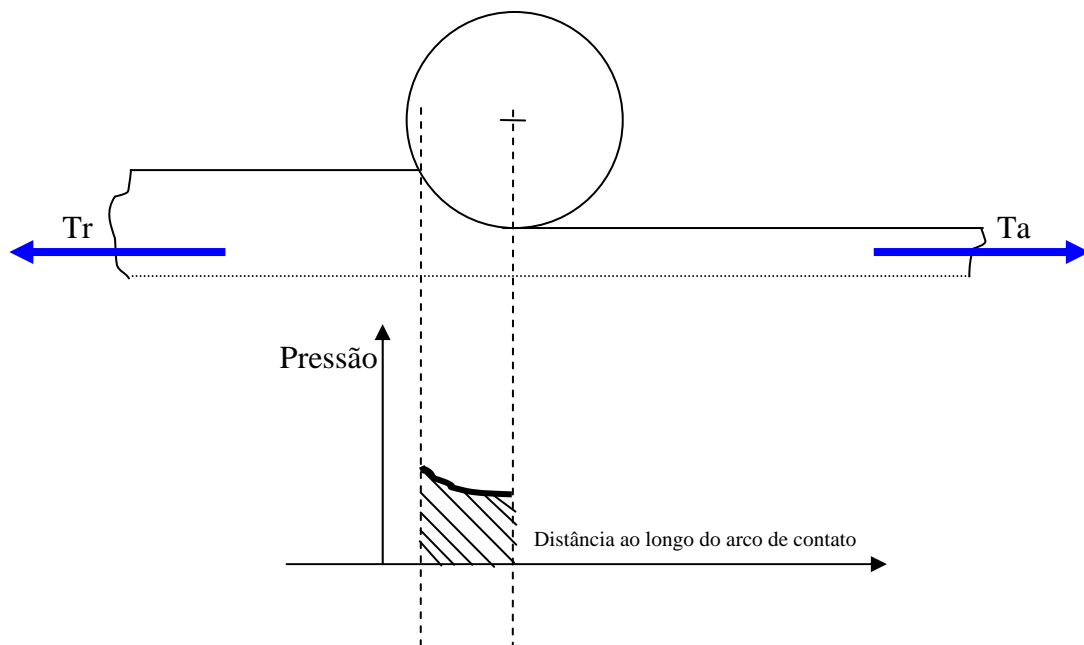


Figura 2.9 – Efeito das tensão avante no arco de contato  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

Na laminação, observamos que quando aplicamos reduções muito altas, da ordem de 30% ou mais, a tensão de entrada é mais efetiva para reduzir a força de laminação do que a tensão de saída. Abordaremos a seguir a forma de ajuste das principais variáveis controláveis na laminação e seus efeitos no principal quesito de qualidade que é a espessura final do produto.

## 2.2

### Variáveis Controláveis

O processo de laminação a frio tem como objetivo reduzir a espessura do material dentro das tolerâncias especificadas junto aos clientes. A matéria prima para este processo é conhecida como bobina laminada a quente e decapada. Informações de dimensão como espessura de entrada e espessura de saída e largura são fundamentais para cálculos dos pre-set`s de laminação; estas variáveis de entrada no processo servem para todos os cálculos das variáveis controláveis. A figura A2.1 (anexo) mostra a representação esquemática de um laminador de tiras a frio. Pode ser observado uma seqüência de cinco cadeiras onde a cada passe a espessura vai sendo reduzida até o seu valor final na saída da cadeira 5. Todo processo de afinamento da espessura é feito pela combinação de esforços de compressão e tração simultaneamente. Os esforços de compressão são aplicados através de cilindros, e os esforços de tração são realizados pela diferença de velocidades entre passes de laminação, sendo medidos por rolos tensores. Na saída das cadeiras 1 e 5 medidores de espessura por feixe de raio x garantem informação do desvio da espessura a malha de controle, sendo que o controlador atua de forma a minimizar o desvio da espessura objetivada.

Conhecidas as informações relativas à matéria prima e dos cilindros utilizados na laminação é possível então calcular os pre-set`s de laminação. Estes são os valores preestabelecidos para as variáveis controláveis do processo, cujo ajuste adequado proporcionará maior estabilidade ao processo, o que implica e menor variabilidade. Para melhor entendimento, abordaremos a seguir cada uma das variáveis controláveis do processo de laminação.

### 2.2.1

#### Redução

A redução total no processo de laminação é definida pela relação  $[(h_0 - h_5)/h_0] \times 100$ , onde

$h_0$  - é a espessura de entrada do material

$h_5$  - é a espessura de saída do material

Pode-se também definir a redução por passe, para cada passe de laminação. Tomamos como exemplo a redução da cadeira 1.

$[(h_0 - h_1)/ h_1] \times 100$  onde.

$h_0$  - Espessura de entrada do material

$h_1$  - Espessura do material na saída da cadeira 1

Uma outra maneira de calcular a redução e pela diferença de velocidades de cada cadeira de laminação sendo dada por:

$[(v_2 - v_1)/ v_2] \times 100$  onde.

$V_2$  - Velocidade da cadeira 2

$V_1$  - Velocidade da cadeira 1

Em ambos os casos as reduções são apresentadas em valores percentuais. Um bom ajuste nas reduções por passe de laminação podem resultar em menores variações no processo, principalmente na espessura na saída da cadeira 5. A redução é considerada uma das principais variáveis controláveis do processo.

### 2.2.2

#### Tensão entre Passes

O estiramento entre passes durante o processo é definido a partir das dimensões do material. Com espessura e largura é possível definir os valores de tensão entre passes. Uma outra característica que deve ser mencionada é a composição química do aço, dependendo dos elementos presentes. Como exemplo o Carbono em maiores quantidades proporciona um incremento nos valores de tensão. A presença deste elemento aumenta a resistência do aço à deformação o que dificulta a estabilidade do processo. Todo ajuste de tensão é sempre feito em função da força aplicada ao material através dos cilindros de trabalho, e também para evitar valores que possam levar a ruptura do material devido ao estiramento. Os valores usualmente praticados não ultrapassam a 70 % do limite de resistência do material, e podem ser previamente conhecidos através de ensaios mecânicos como, por exemplo, (tração). O estiramento é feito através da diferença de velocidade entre passes, sendo esta crescente à medida que a espessura do material vai sendo reduzida. Como descrito em 2.2.1 a redução pode ser calculada por diferença de velocidade, e, portanto, flutuações na velocidade acabam provocando perturbações nas tensões entre passes. Estas perturbações refletem na variação da espessura na saída da cadeira 5.

Ao se fazer ajuste na tensão entre passes o que se busca é estabilizar a força de laminação, e permitir que o processo ocorra de forma estável. A razão para aplicação desta prática é que a força de laminação influencia diretamente na planicidade do material o que pode ser traduzido pelo perfil transversal deste. Uma abordagem mais detalhada nos permitirá entender melhor o conceito.

### 2.2.3

#### Força de Laminação

Como mencionado anteriormente, a força de laminação é determinante na forma do produto. Uma força excessiva pode ocasionar defeitos de planicidade figura A2.2 (anexo) nela pode ser observado o efeito da força de laminação no perfil do material. A região que apresentar o defeito terá menor espessura, este fato é atribuído ao maior alongamento. Esta situação é crítica quando da utilização

do produto no cliente, principalmente nos casos onde os esforços para chegar no produto final são grandes, que é o caso do aço para lata de duas peças.

A questão é? Qual o valor ideal de força que não comprometa o produto sendo laminado? Práticas operacionais sugerem adotar uma relação entre a força aplicada e a largura do material, esta relação é conhecida como aperto específico e dada por:

Aperto específico = (Força aplicada)/Largura do material

Um outro ponto que precisa ser destacado é a variação da força, pequenas oscilações ocorrem durante o processo e podem levar a distúrbios na espessura. Uma das formas de se verificar é através do teste de excentricidade dos cilindros que será abordado a seguir.

#### 2.2.4

#### Cilindros de Laminação

Por estarem em contato direto com a tira sendo laminada, os cilindros de laminação são considerados como as ferramentas do processo. Suas características dimensionais são fatores críticos para melhorar a estabilidade do processo. Dentre estas merecem destaque:

**1ª - Redondeza dos cilindros de trabalho e apoio**, uma geométrica não uniforme dos cilindros resulta em flutuações na força de laminação. Tais flutuações são conhecidas como “excentricidade dos cilindros”, quanto maiores forem as flutuações, maiores serão as variações na espessura do material sendo laminado. A relação da variação da espessura em função da variação da força de laminação é expressa por:

$$h = S + P/K$$

h = Espessura

S = Posição do parafuso

P = Pressão

K = Constante de Mola do laminador (500 toneladas/mm)

Logo temos:

$$dh = dP/k$$

A tabela 2.1 abaixo representa as variações da força de laminação e seu efeito na variação de espessura do material, para diversas espessuras finais.

Tabela 2.1 – Efeito da variação da força de laminação na espessura do material

ton	mm	Espessura Nominal				
P	h	0,190	0,200	0,235	0,250	0,284
10	0,020	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%
20	0,040	0,8%	0,8%	0,9%	1,0%	1,1%
30	0,060	1,1%	1,2%	1,4%	1,5%	1,7%
40	0,080	1,5%	1,6%	1,9%	2,0%	2,3%
50	0,100	1,9%	2,0%	2,4%	2,5%	2,8%
60	0,120	2,3%	2,4%	2,8%	3,0%	3,4%
70	0,140	2,7%	2,8%	3,3%	3,5%	4,0%
80	0,160	3,0%	3,2%	3,8%	4,0%	4,5%
90	0,180	3,4%	3,6%	4,2%	4,5%	5,1%
100	0,200	3,8%	4,0%	4,7%	5,0%	5,7%

Como exemplo destacamos a espessura nominal de 0,284mm, com a qual uma oscilação de 50 toneladas provoca uma variação de 2,8% na espessura final do produto.

A figura 2.10 abaixo ilustra a relação entre a variação de força e seu impacto na espessura final. Esta situação é mais crítica nas cadeiras iniciais, onde o material sofreu pouca deformação, se tornando mais susceptível a estes efeitos.

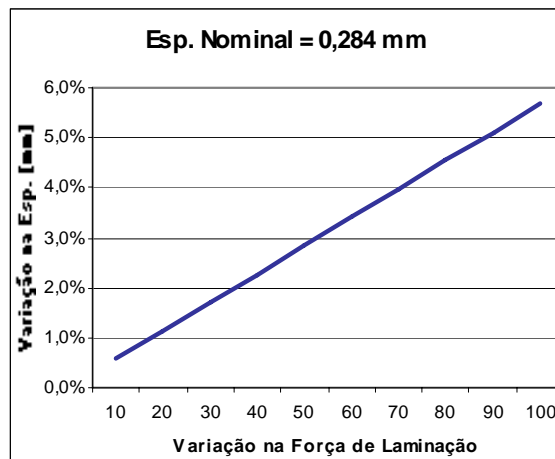


Figura 2.10 – Variação da força x Variação da espessura  
(Fonte - CSN)

A melhor forma de se evitar tal situação é não deixando que cilindros com redondeza ruim venham entrar no laminador prejudicando o processo. Testes de excentricidade são feitos nas oficinas de cilindro durante o processo de retífica, e os pares que apresentarem problemas não são enviados ao laminador.

**2ª - Diâmetros dos Cilindros de trabalho.** Até o momento o que conhecia é que a redondeza era fator influente na variação da espessura. Entretanto, o diâmetro dos cilindros também tem grande influência. A razão pela qual isto ocorre é devido ao comprimento do arco de contato entre a tira e os cilindros.

Na região de contato entre os cilindros de trabalho e a tira também ocorrem deformações elásticas sobre o cilindro de trabalho, conforme indicado na figura 2.11. Estas deformações influenciam na determinação da variável relativa as dimensões do raio do cilindro de trabalho conforme ilustrado na figura 2.12.

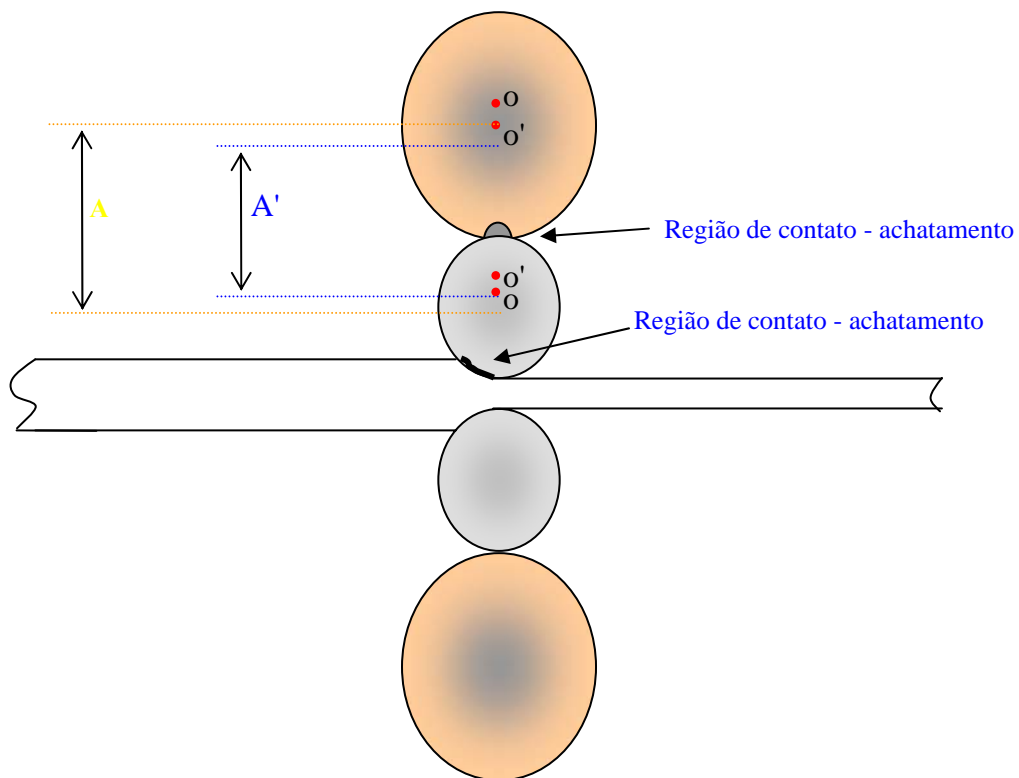


Figura 2.11 – Deformações Elásticas sobre o cilindro de trabalho  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)

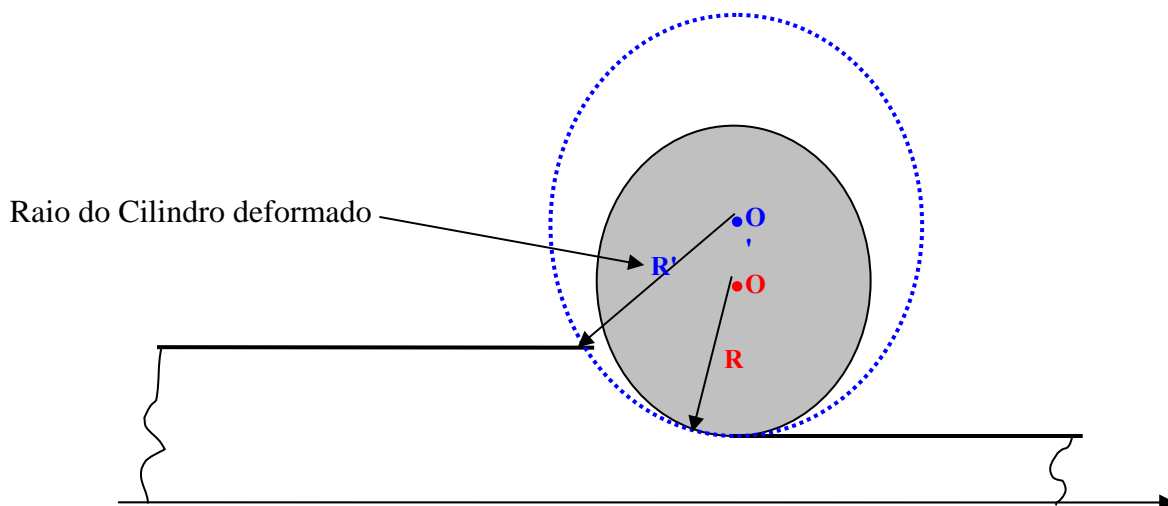


Figura 2.12 – Influência das deformações nas dimensões do raio do cilindro  
(Fonte – Laminação a frio dos aços CSN)



A deformação do cilindro ocorre devido as elevadas cargas de laminação, as deformações impostas são elásticas e o mesmo retorna a sua forma original quando cessarem os esforços. A determinação do raio do cilindro deformado é de vital importância, tendo em vista sua influência nas dimensões do arco de contato e na magnitude dos esforços de laminação por unidade de largura.

Através de estudos realizados por Hitchcock, os cálculos para elaboração desta nova condição tornaram possíveis uma nova compreensão dos efeitos das pressões de laminação sobre o material laminado.

Reportando-nos novamente à figura 2.12 podemos então concluir que como consequência destas deformações localizadas nas regiões de contato entre os cilindros de laminação e com a tira, a distância entre centros dos cilindros se altera e se durante a laminação o sistema sofrer variações, esta distância também passa a ter variações e conseqüentemente influenciará a espessura da tira laminada.

## 2.3

### **Sistema de Controle da Espessura**

Como descrito em 2.1, o processo de laminação tem como princípio o fluxo de massa constante. Em laminadores modernos com elevado nível de automação todo controle da espessura é baseada no fluxo de massa. O sistema é dotado de sensores a laser que medem a velocidade da tira entre passes de laminação. Neste sistema é possível acelerar ou desacelerar individualmente uma determinada cadeia de laminação. Seu inconveniente está no elevado custo, normalmente sua instalação ocorre quando da aquisição de um novo laminador e onde os requisitos de espessura justifiquem tal investimento.

Os controles mais usuais atuam basicamente na cadeia 1 pelo ajuste do GAP entre cilindros, e na velocidade das cadeiras 1, 2, 3 e 4. Para melhor entendimento abordaremos individualmente cada um dos controladores.

### 2.3.1

#### Função BISRA

A figura A2.3 (anexo) mostra esquematicamente a cadeira 1. O sistema é dotado de células de carga que medem os esforços para deformação da tira no primeiro passe, ou seja, maiores ou menores esforços serão percebidos pelos sensores e maior ou menor força de laminação será necessária para deformação no passe. A função BISRA trabalha sob a seguinte lógica: se a espessura da **matéria prima** que é conhecida sofre uma variação positiva (acima da espessura nominal) o peso do material naquele instante será maior, portanto, os esforços serão imediatamente percebidos pelos sensores e automaticamente o GAP de laminação é ajustado e maior carga é aplicada ao material. No caso oposto desvio negativo, menor esforço será medido pelos sensores, neste caso o ajuste do GAP é no sentido reduzir a carga aplicada ao material.

### 2.3.2

#### Função Feedback 1

Novamente reportando-nos à figura A2.3 (anexo), podemos notar a indicação de um medidor de espessura do material após o primeiro passe de laminação. Um outro controlador, “Feedback 1”, atua de forma análoga ao anterior, ou seja, interfere no GAP de laminação em tempo real. O instrumento medidor de espessura tem como princípio de medição um sistema de feixes de raios X, sua medição e velocidade de resposta é bastante elevada (10 milissegundos), o que torna a função, “Feedback 1”, bem mais precisa do que a função Bisra. Sua lógica baseia-se na medição do desvio da espessura em relação ao valor alvo na saída da cadeira 1, se a espessura da matéria prima que é conhecida sofre uma variação positiva (acima da espessura nominal), o desvio em relação ao valor alvo é observado e automaticamente o GAP de laminação é ajustado e maior carga é aplicada ao material. No caso oposto (desvio negativo), o desvio em relação ao valor alvo leva ao ajuste do GAP no sentido reduzir a carga aplicada ao material.

### 2.3.3

#### Função Feedforward

Reportando-nos a figura A2.1 (anexo), podemos notar a indicação de um medidor de espessura do material após o primeiro passe de laminação. A lógica de operação é baseada no ajuste da espessura por estiramento. Uma vez que a espessura tenha uma variação positiva em relação ao valor-alvo, o controle atua reduzindo a velocidade da cadeira 1 e mantendo a cadeira 2 na mesma velocidade. Tal situação leva ao estiramento do material, reduzindo o desvio positivo. No caso de desvio negativo, o sistema acelera a cadeira 1 mantendo a cadeira 2 na mesma velocidade; neste caso maior quantidade de massa estará em fluxo, reduzindo o efeito do estiramento de modo a possibilitar o retorno da espessura ao valor-alvo.

### 2.3.4

#### Função Feedback 2

Ainda na figura A2.1 (anexo), podemos perceber um outro medidor de espessura na saída da cadeira 5. O princípio de funcionamento é semelhante ao da função Feedforward, só que neste caso o sistema atua na velocidade das cadeiras 1, 2, 3 e 4 mantendo a velocidade da 5ª cadeira constante. O controle segue a mesma lógica de operação, que é baseada no ajuste da espessura por estiramento. Uma vez que a espessura tenha uma variação positiva em relação ao valor-alvo, o controle atua reduzindo a velocidade das cadeiras 1, 2, 3, e 4 e mantendo a cadeira 5 na mesma velocidade. Tal situação leva ao estiramento do material, reduzindo o desvio positivo. No caso de desvio negativo o sistema acelera as cadeiras 1, 2, 3 e 4 mantendo a cadeira 5 na mesma velocidade; neste caso maior quantidade de massa estará em fluxo, reduzindo o efeito do estiramento e assim possibilitando o retorno ao valor-alvo.

### 2.3.5

#### **Ganhos na Malha de Controle de Espessura (AGC)**

Este sistema trabalha em malha fechada, desta forma o ajuste de seus ganhos deve considerar uma combinação do tempo de resposta e da instabilidade resultante deste ajuste. O sistema tem dois tipos de ganhos, “proporcional e integral”, o primeiro faz correções mais bruscas sendo proporcional ao erro. No caso do ganho integral, a correção se dá em função da soma de pequenos erros. Os ajustes são feitos quase que de forma empírica, após realizado um ajuste mede-se o resultado obtido, se houve um aumento na variação da espessura, indica que o sistema entrou em ressonância, e uma redução no ganho será necessária.