



**42º SENAFOR**

**26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil**

*26<sup>th</sup> International Forging Conference*

**25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG**

*25<sup>th</sup> National Sheet Metal Forming Conference / 12<sup>th</sup> International Sheet Metal Forming Conference / 9<sup>th</sup> BrDDRG Congress*

**12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis**

*12<sup>th</sup> International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS*

**Centro de Eventos do Hotel Continental**

**Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023**

# ENDIREITAMENTO POR ROLOS CRUZADOS: FUNDAMENTOS E DESENVOLVIMENTOS

Renan Silvano Krapf <sup>(1)</sup>

André Rosiak <sup>(2)</sup>

Lirio Schaeffer <sup>(3)</sup>

## RESUMO

O endireitamento com rolos cruzados desempenha um papel fundamental na produção de ligas metálicas. Na indústria siderúrgica, sua aplicação visa corrigir distorções em barras após o processo de trabalho a quente. Apesar de sua importância crítica, é notável a escassez de informações sobre esse tópico na literatura existente. Portanto, este trabalho oferece uma análise abrangente do processo de endireitamento de produtos siderúrgicos usando rolos cruzados, explorando seus princípios fundamentais, parâmetros relevantes e simulações numéricas. Tal conhecimento desempenha um papel essencial na asseguarção da qualidade dos produtos siderúrgicos após a etapa de conformação a quente.

**Palavras-chave:** Endireitamento, Rolos Cruzados, Simulação Numérica.

## ABSTRACT

Cross-rolling straightening plays a fundamental role in the production of metallic alloys. In the steel industry, its application aims to correct distortions in bars after the hot working process. Despite its critical importance, there is a noticeable scarcity of information on this topic in the existing literature. Therefore, this work provides a comprehensive analysis of the straightening process for steel products using cross-rolling, delving into its fundamental principles, relevant parameters, and numerical simulations. Such knowledge plays an essential role in ensuring the quality of steel products after the hot forming stage.

**Keywords:** Straightening, Cross-Rolling, Numerical Simulation.

<sup>(1)</sup> Engenheiro Metalúrgico, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Brasil.

<sup>(2)</sup> Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Brasil.

<sup>(3)</sup> Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

## 1. INTRODUÇÃO

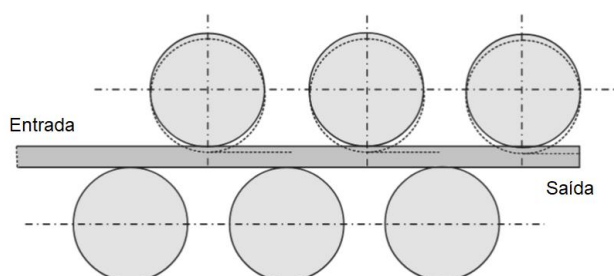
Produtos siderúrgicos, como barras redondas, tubos e barras perfiladas de todos os tipos, geralmente são distorcidos pela conformação a quente. No processo de laminação a quente, por exemplo, as tensões internas induzidas no material durante a deformação podem gerar desvios de retilidade de até 0,4% do comprimento da barra [1]. Estes produtos devem possuir tolerâncias dimensionais estreitas, boa rugosidade superficial e propriedades mecânicas elevadas [2]. Para satisfazer estas severas exigências, a realização de uma operação para eliminação de desvios é requerida após a conformação a quente. O endireitamento contínuo é um processo economicamente vantajoso para este fim. Nesta operação, o empenamento é corrigido e as barras são polidas. A correção do empenamento é realizada pela alteração do estado de tensões do material, gerando uma distribuição uniforme das tensões [3].

Os fundamentos, métodos de trabalho e projetos deste tipo de operação representam uma área especial interessante da tecnologia de conformação e são apresentados neste trabalho.

## 2. PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Na fabricação de produtos siderúrgicos, após as operações de trefilação e laminação, as barras apresentam níveis elevados de tensões residuais e uma curvatura relativamente grande. O estado de tensão e a curvatura das barras precisam ser corrigidos para atender aos requisitos de produção. Essas correções são feitas através do processo de endireitamento. A norma DIN 24500-7 estabelece os padrões e agrupa os processos de endireitamento em quatro categorias principais que se referem ao endireitamento de barras, perfiz, chapas e vigas [4].

Endireitadores de perfis e chapas operam de maneira semelhante. O produto passa por um conjunto de rolos rotativos, conforme a Figura 1. O número de rolos pode variar, mas o princípio é o mesmo. Uma série de curvaturas, todas situadas em um único plano, é aplicada ao produto ao longo da passagem pelos rolos. Maiores números de rolos permitem atingir maiores níveis de planicidade [5]. Trilhos ferroviários também são endireitados passando por conjuntos de rolos alternados como os da Figura 1.

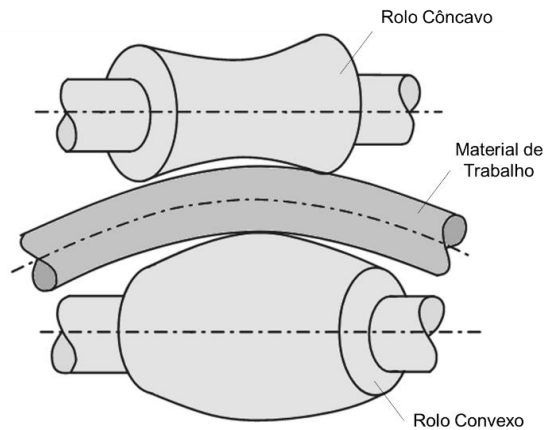


**Figura 1:** Endireitamento esquemático de trilhos ferroviários [6].

Para barras, o problema é um pouco diferente. Enquanto os trilhos tendem a dobrar em um plano devido aos diferentes momentos de inércia de sua seção, as barras redondas podem dobrar livremente em três dimensões. Por esta razão, o endireitamento destes produtos geralmente é realizada em dois planos perpendiculares [7], como mostrado na Figura 2.

As endireitadeiras de rolos cruzados (Figura 2) são equipamentos amplamente utilizados na indústria de transformação por conciliar ótimos resultados e simplicidade operacional. Usualmente, a máquina trabalha com dois rolos hiperbólicos. Nesta configuração, um rolo é convexo e outro é côncavo. Durante a operação, ambos giram na mesma direção. Ao passar através da máquina, devido ao atrito, o material é rotacionado no sentido contrário e submetido a compressão [8].

Durante o endireitamento, a barra distorcida é forçada sob a ação de momentos fletores a dobrar na direção oposta tornando-se reta após a remoção da força [1]. O rolo côncavo controla o nível de flexão da barra, atuando como uma espécie de batente. O rolo convexo, também chamado de rolo endireitador, molda o material ao pressioná-lo contra o rolo côncavo. A barra é submetida a um dado número de revoluções enquanto flexionada. A cada ciclo, a uniformidade das tensões residuais aumenta, de forma que ao final do processo, o material atinge um estado de tensões mais homogêneo.



**Figura 2:** Endireitamento de barras em uma máquina de endireitamento de rolos cruzados [9].

O endireitamento é, fundamentalmente, baseado em uma mudança permanente na forma, que impede que a barra retorne elasticamente à sua curvatura original [1]. A pressão entre os rolos e a barra interfere diretamente no acabamento do produto final. Maiores esforços geram um maior polimento na barra. Esta característica do processo, torna o acabamento dos rolos um aspecto importante. Se a superfície apresentar defeitos como riscos ou rugosidade excessiva, o acabamento da barra será deteriorado.

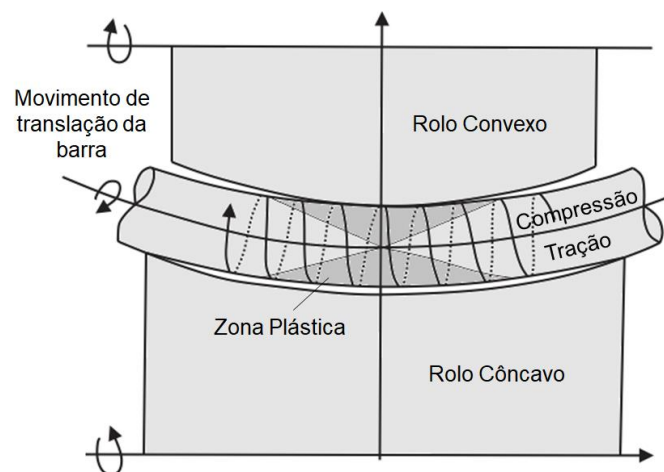
As principais melhorias alcançadas na barra por meio do endireitamento de rolos cruzados são [5]:

- Redução da curvatura indesejável da barra;
- Redução das tensões residuais trativas próximas à superfície;
- Homogeneização da curvatura da barra;
- Polimento do material.

## 2.1 PRINCÍPIOS DO PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Durante o endireitamento, um ponto localizado na superfície da barra percorre um caminho ao longo de uma hélice com um eixo dobrado, conforme ilustrado na Figura 3. O estado de deformação resultante pode ser representado como uma flexão de três pontos progredindo ao longo de uma hélice.

Essencialmente, o endireitamento é gerado através da flexão da barra distorcida. Dessa forma, uma maneira de simplificar a mecânica do processo para ampliar a compreensão sobre seus princípios é considerar a barra como uma viga reta submetida a flexão pura. Um par de torques simétricos é aplicado a ambas as extremidades desta viga em seu plano de simetria e a viga exibe uma curvatura constante,  $\kappa$ .



**Figura 3:** A zona plástica na barra endireitada é propagada ao longo de uma hélice [10].

A superfície neutra é definida como a superfície na interface entre as fibras em tração e aquelas em compressão. Seu eixo neutro é definido como a interseção da superfície neutra e o plano de curvatura. Considera-se que as seções transversais da viga permanecem planas após a flexão e normais ao eixo neutro da viga, enquanto a forma e as dimensões das seções transversais permanecem inalteradas após a flexão.

De acordo com essa suposição, a deformação axial de engenharia  $\varepsilon$  em uma fibra situada a uma distância  $y$  da superfície neutra está relacionada à curvatura da barra por [5]:

$$\varepsilon = y \cdot \kappa \quad (\text{Equação 1})$$

Uma barra reta de seção circular com limite de escoamento  $R_{p0,2}$  pode ser dobrada sem que ocorra deformação plástica até uma curvatura [5]:

$$\kappa_y = \frac{R_{p0,2}}{E \cdot r_b} \quad (\text{Equação 2})$$

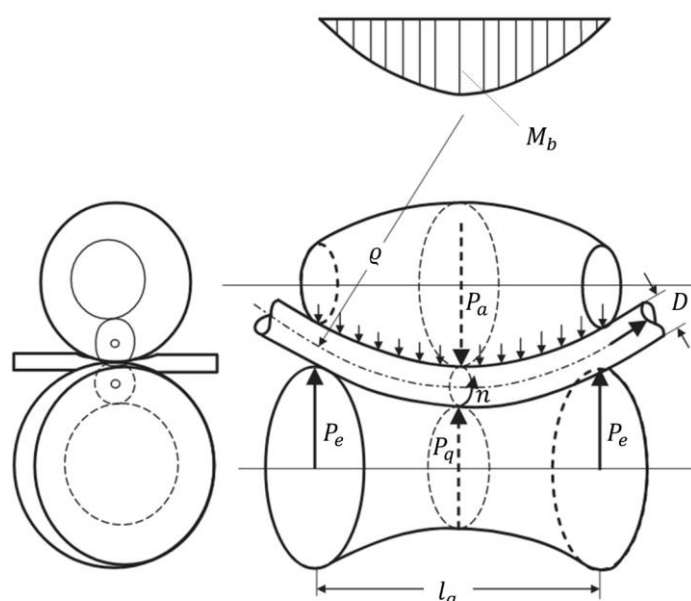
Onde  $r_b$  é o raio da barra. A barra com uma curvatura inicial  $\kappa_0 < \kappa_y$  pode ser endireitada sem que o material seja submetido a deformação plástica. Assim, o endireitamento da barra ocorre na região elástica e, ao interromper a solitação, a barra volta a ter a curvatura  $\kappa_0$ .

Por esta razão, no endireitamento o material é submetida a uma série de solitações de flexão e uma série de curvaturas  $\kappa_i$ , sendo  $|\kappa_0| < |\kappa_i - 1|$ , é aplicada na barra. Cada uma das curvaturas impostas conduz à deformação plástica no sentido inverso em relação à sua antecessora. Após o descarregamento, a viga retorna a uma curvatura  $\kappa_1$ . O objetivo do processo é determinar  $\kappa_i$  de tal forma que  $\kappa_1 < \kappa_0$  [5].

Os desvios da retilidade, ou seja, as alturas das curvaturas das barras, geralmente chegam a 0,2 a 0,4% do comprimento da barra no caso de produtos laminados. Durante a flexão e o endireitamento, a barra torta é forçada sob a ação de momentos fletores a dobrar na direção oposta de tal forma que a barra permanece reta após a remoção da carga quando ela sai da máquina. O efeito de endireitamento é, portanto, fundamentalmente baseado em uma mudança permanente na forma, que impede que a barra retorne elasticamente à sua curvatura original [11].

## 2.2 FUNDAMENTOS DO ENDIREITAMENTO COM ROLOS CRUZADOS

Todas as máquinas de endireitar têm em comum que, a rigor, o início e o fim das barras não podem ser endireitados, pois não há momentos de flexão para as respectivas seções. Este problema é evitado ao endireitar barras e tubos com seção transversal circular em máquinas de dois rolos cruzados.



**Figura 4:** Processo de endireitamento em máquinas de dois rolos cruzados [11].

Como mostra a Figura 4, o processo de endireitamento com dois rolos pode ser entendido como um caso de carregamento de flexão em uma viga duplamente apoiada com carga distribuída. A carga distribuída  $P_a$  é aplicada pelo rolo de formato convexo. O apoio é formado por um rolo côncavo. O comprimento de apoio é  $l_a$  e as forças de apoio são  $P_e = 2P_a$ .

## 2.3 PARÂMETROS DE ENDIREITAMENTO COM ROLOS CRUZADOS

O sucesso da operação de endireitamento em máquinas de rolos cruzados depende dos seguintes fatores:

- Curvatura dos rolos;
- Propriedades mecânicas do material;
- Distância dos rolos;
- Ângulo de endireitamento;
- Pressão dos rolos;
- Flexibilidade da estrutura da máquina;
- Condições pré-definidas em cada rolo.

Nas próximas seções os principais parâmetros do processo são discutidos.

## 2.4 MOMENTOS, TENSÕES E DEFORMAÇÕES DE ENDIREITAMENTO

Durante o processo de endireitamento, a linha de flexão de uma barra pode ser interpretada como um segmento de arco com raio  $\varrho$ . Existe a seguinte relação entre o raio de curvatura  $\varrho$ , o módulo de elasticidade  $E$  do material da barra, o momento fletor  $M_b$  e o momento de inércia para a flexão plástica  $J_{pl}$ :

$$\varrho = \frac{E \cdot J_{pl}}{M_b} \quad (\text{Equação 8})$$

O momento fletor  $M_b$  é dado por:

$$M_b = P_i \cdot 2y = \sigma \cdot \frac{F}{2} \cdot 2y = \sigma \cdot W_{pl} \quad (\text{Equação 9})$$

O termo  $W_{pl}$  corresponde ao módulo de resistência para deformação plástica. Este parâmetro está associado ao tipo de seção transversal da barra endireitada. Para barras de seção circular, o módulo de resistência para deformação plástica depende do diâmetro  $D$  da barra e é expresso por:

$$W_{pl} = \frac{D^3}{6} \quad (\text{Equação 10})$$

Para um determinado diâmetro  $D$ , tem-se um valor de módulo  $W_{pl}$  da seção de conformação de uma barra com seção circular. Este valor pode ser encontrado em diagramas e tabelas fornecidos por fabricantes. A partir do módulo  $W_{pl}$  e do comprimento de apoio  $l_a$ , pode-se obter a força de endireitamento  $P_a$ .

O módulo de inércia para a flexão plástica  $J_{pl}$  é expresso por:

$$J_{pl} = W_{pl} \cdot \frac{D}{2} \quad (\text{Equação 11})$$

Se  $D$  é o diâmetro da barra, a deformação gerada pelo endireitamento pode ser calculada pela equação:

$$\varphi = \frac{M_b}{E \cdot W_{pl}} = \frac{D}{2\varrho} \quad (\text{Equação 12})$$

Desse modo, a flexão necessária para endireitar a barra é dada por:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \varphi_{max} \cdot \frac{l_a^2}{D} \quad (\text{Equação 13})$$

A deformação máxima  $\varphi_{max}$  ocorre no ponto em que o momento de flexão também é máximo. O maior momento de flexão ocorre na metade do comprimento de apoio. A partir deste valor também é possível calcular a força de endireitamento  $P_\alpha$ :

$$P_\alpha = \frac{8 \cdot M_b}{l_a} \quad (\text{Equação 14})$$

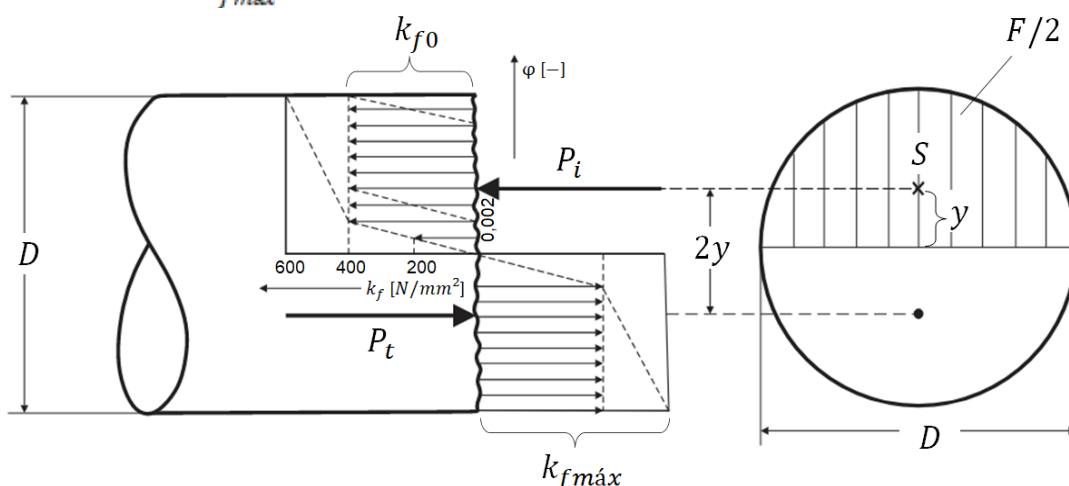
Como resultado da carga contínua sobre o comprimento do apoio  $l_a$ , o início e o fim das barras também estão sob a influência de momentos fletores e, portanto, também são endireitados. Muitas vezes, o desvio da retilinidade pode ser reduzido a uma precisão de **0,1 mm** por *m* de comprimento da barra [11].

As endireitadoras podem ser ajustadas ao diâmetro da barra para evitar que elas se desviem ao longo dos rolos. Ao ajustar adequadamente a distância do eixo dos rolos, é possível sobrepor as forças de endireitamento com forças opostas  $P_q$ . Estas podem tornar-se tão grandes que, além de um efeito de polimento simultâneo devido ao rolamento suave da superfície da barra, gera um certo alongamento (com uma diminuição correspondente no diâmetro) das barras na direção longitudinal, o que promove o processo de endireitamento.

A posição inclinada dos rolos causa a rotação  $n$  da barra em torno do seu eixo e a velocidade de alimentação  $v_v$  na direção do eixo. Como resultado, a barra é repetidamente dobrada em todos os lados pela quantidade definida  $f$  durante a passagem, de modo que as múltiplas curvaturas espaciais situadas em diferentes planos também podem ser eliminadas. As contracurvas da barra causada pela flexão-endireitamento geralmente podem ser vistas como constantes durante a passagem da barra pela máquina.

A Figura 5 mostra a distribuição de tensão e deformação em uma barra de seção circular submetida ao processo de endireitamento. A fibra neutra da barra é considerada não deformada e fica aproximadamente no meio da barra. O estado de tensão nesta região é nulo, enquanto o restante da distribuição de tensão na seção transversal de flexão da barra segue a curva de escoamento do material (Figura 5).

Para calcular as forças e momentos de endireitamento, pode-se ignorar o componente de tensão elástica e simplesmente usar uma distribuição de tensão retangular a partir do limite de escoamento. Esta simplificação não considera o encruamento do material. Se deseja-se gerar uma margem de segurança nos cálculos, em vez de usar o limite de escoamento  $k_{f0}$ , utiliza-se o a tensão de escoamento máxima  $k_{fmax}$ .



**Figura 5:** Distribuição de tensão e deformação em uma barra de seção circular submetida ao processo de endireitamento.

O uso do sistema de coordenadas logarítmicas resulta em curvas características retas. O campo de cálculo com os valores de linha inclui a proporção usual  $f_{max} = D/2$ .

## 2.5 PROJETO DOS ROLOS HIPERBÓLICOS

Segundo TALUKDER (1981), a curvatura da região de contato entre a barra e os rolos é o parâmetro mais importante do processo. O projeto do perfil do rolo deve otimizar a linha de contato entre as ferramentas e o material de trabalho.

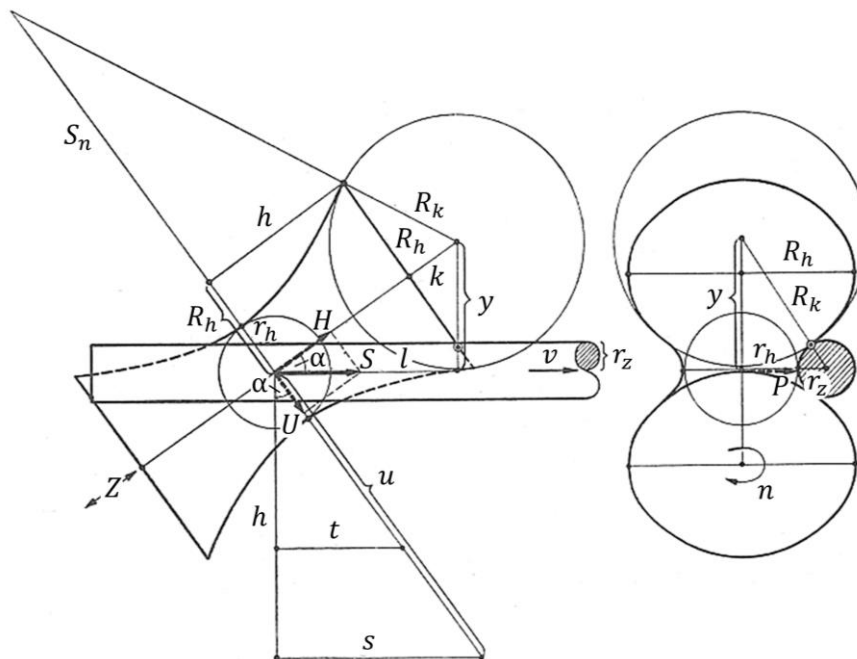


Figura 6: Condições de trabalho de um rolo hiperbólico com uma barra de seção circular [11].

A Figura 6 mostra os parâmetros dimensionais de projeto dos rolos de endireitamento. Os rolos côncavos das máquinas de endireitamento são hiperbólicos de revolução de camada única que seguem a equação:

$$\frac{x^2 + y^2}{r_h^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Equação 15})$$

A seção hiperbólica é expressa por:

$$\frac{R_h^2}{r_h^2} - \frac{h^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Equação 16})$$

Se  $R_h$  é o maior e  $r_h$  o menor raio da hiperbólico, e  $2h$  é seu comprimento axial, o eixo menor desconhecido da hipérbole é obtido por:

$$b^2 = \frac{h^2 \cdot r_h^2}{R_h^2 - r_h^2} \quad (\text{Equação 17})$$

O raio  $R_k$  da esfera imaginária de contato, que é envolvida pelo hiperbólico em sua face anterior é calculado por:

$$R_k = \sqrt{R_h^2 + k^2} \quad (\text{Equação 18})$$

A altura  $y$  do centro da esfera acima do eixo da barra é definida por:

$$y = \sqrt{(R_k + r_z)^2 - (r_h + r_z)^2} \quad (\text{Equação 19})$$

A distância  $k$  do centro da esfera à face hiperbólico é calculado pela equação:

$$k = h \cdot \frac{R_h}{S_n} \quad (\text{Equação 20})$$

Por fim, o comprimento  $S_n$  do hiperbólico é expresso matematicamente por:

$$S_n = \frac{b^2}{r_h^2} \cdot R_h \quad (\text{Equação 21})$$

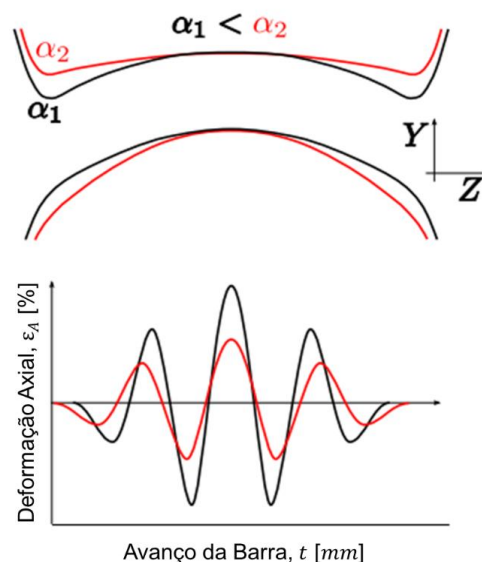
Os parâmetros dimensionais apresentados até aqui são extremamente importantes para a eficiência do processo. Evidentemente, mudanças no perfil de contato alteram o produto final obtido. Consequentemente, o controle do desgaste do equipamento é fundamental. O monitorado da força de endireitamento durante o processo é uma forma de controle eficiente.

## 2.6 ÂNGULO DE ENDIREITAMENTO

O ângulo de ajuste entre a barra e os rolos, chamado ângulo de endireitamento  $\alpha$ , é de extrema importância influenciando diretamente o desempenho do processo. O ângulo de endireitamento deve satisfazer os seguintes requisitos [12]:

- Garantir um contato 100% linear na extensão do rolo para toda a faixa de bitolas de trabalho do equipamento;
- Para a barra de maior bitola processada no equipamento, a trajetória desenvolvida durante uma rotação deve ser menor que o comprimento do perfil do rolo.

A faixa de ajuste para o ângulo de inclinação dos rolos hiperbólicos nas máquinas endireitadoras é sempre dimensionado de forma a cobrir a respectiva barra e as flexões necessárias. O ângulo de endireitamento ainda define os níveis de tensões gerados sobre o material. Dessa forma, o ângulo depende do limite de escoamento do material a ser processado e afeta o desgaste gerado nas ferramentas de endireitamento.



**Figura 7:** Influência do ângulo de endireitamento no avanço e na quantidade de flexão aplicada à barra [5].

Segundo MUTRUX (2011) o ângulo  $\alpha$  possui influência dupla na deformação, como mostrado na Figura 7:

- Um ângulo  $\alpha$  baixo leva a uma diminuição do passo da barra. A velocidade de avanço da barra é reduzida e o número de rotações por determinado comprimento aumenta;
- Um ângulo  $\alpha$  baixo aumenta a flexão imposta à barra: a amplitude da deformação axial aumenta.



O hiperbólico tem a capacidade de tocar a barra de seção circular em sua superfície aproximadamente em uma seção helicoidal, de modo que a barra fique em repouso continuamente. Isso acontece sob um ponto muito específico, submetido a uma força  $S$  na direção de alimentação. A força  $S$  pode ser decomposta em uma componente axial de força que forma um ângulo  $\alpha$  entre o hiperbólico e o eixo da barra. Este ângulo depende das dimensões hiperbólicas ( $R_h, r_h, h$ ) e do raio da barra  $r_b$ . Para calcular o ângulo  $\alpha$ , são necessários os seguintes valores auxiliares de acordo com a Figura 6:

$$\text{sen}\alpha = \frac{y}{h+k} \quad (\text{Equação 22})$$

A força  $S$  na direção de alimentação atua para superar o atrito entre o rolo e a barra e é definida por:

$$S = \mu \cdot P \quad (\text{Equação 23})$$

Para máquinas de dois rolos, o coeficiente  $\mu = 0,14$  pode ser considerado. A força  $S$  pode ser decomposta em uma componente de força axial:

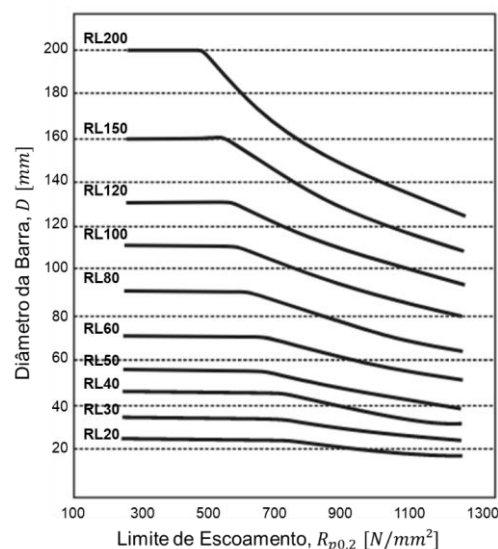
$$H = S \cdot \text{cos}\alpha \quad (\text{Equação 24})$$

E em uma componente de força circunferencial:

$$U = S \cdot \text{sen}\alpha \quad (\text{Equação 25})$$

## 2.7 EQUIPAMENTO DE ENDIREITAMENTO

A Figura 8 mostra um exemplo de gráfico utilizado na seleção do equipamento. O dimensionamento e os limites dos equipamentos de endireitamento são determinados a partir do limite de escoamento ( $R_{p0,2}$ ) e a bitola ( $D$ ) do material.



**Figura 8:** Gráfico para seleção do equipamento de endireitamento.

As máquinas são projetadas de forma que permitam a flexão suficiente do material para ultrapassar o limite de escoamento. Logo, todas as tabelas e gráficos fornecidos pelos fabricantes são baseadas no limite de escoamento dos materiais que serão trabalhados.

**Tabela 1:** Especificações de diferentes modelos de máquinas de endireitamento.

Modelo	RL30	RL40	RL60	RL100	RL150	RL200
Diâmetro [mm]	6 - 34	12 - 50	10 - 75	16 - 110	25 - 180	30 - 200
Velocidade [m/min]	250	250	150	120	100	80
Potência [kW]	2x40	2x60	2x75	2x120	2x150	2x250
Ângulos [°]	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22

## 2.8 VELOCIDADE DE ENDIREITAMENTO

O ângulo de endireitamento também influencia a velocidade de deformação desenvolvida no processo. A utilização de ângulos maiores resulta na passagem da barra com maior velocidade e menos giro. Conseqüentemente, a velocidade de deformação é mais alta. Com relação aos movimentos, as condições apresentadas a seguir se aplicam a um rolo de endireitamento hiperbólico com uma barra de seção circular.

Se a circunferência da barra é  $w = 2\pi r$ , o avanço por revolução da barra é:

$$t = w \cdot \tan \alpha \quad (\text{Equação 27})$$

Sendo  $2l$  o comprimento de contato, o número de ações de endireitamento que são exercidas em cada ponto da superfície da barra enquanto passa pelo rolo de endireitamento é:

$$K = \frac{2l}{t} \quad (\text{Equação 28})$$

Sendo  $u = 2\pi r_h$  a menor circunferência do rolo, o avanço da barra por revolução é de pelo menos:

$$s = u \cdot \sin \alpha \quad (\text{Equação 29})$$

A velocidade de alimentação  $v_v$  está associada ao número de rotações do rolo por minuto  $n$ :

$$v_v = s \cdot n \quad (\text{Equação 30})$$

## 3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Para um projeto de produto ideal, o conhecimento abrangente do processo de fabricação é essencial para a melhor utilização das vantagens relacionadas ao processo e, assim, para garantir as características ideais do produto. Isso é possível através das ferramentas de simulação numérica altamente sofisticadas que consideram as peculiaridades dos processos, bem como as propriedades do componente.

A simulação representa matematicamente um processo. Graças a disponibilidade atual de softwares rápidos e hardwares poderosos, os modelos matemáticos empregados fizeram grandes avanços nos últimos anos no que diz respeito à largura de banda dos aplicativos, bem como à precisão de suas previsões [13].

Softwares comerciais baseados no Método de Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM) possibilitam a solução de problemas mecânicos estruturais que surgem durante a fase de desenvolvimento do produto e a análise da evolução e distribuição local das características termomecânicas e elásticas de um processo de fabricação.

A simulação do processo começa com a criação de uma representação CAD 3D dos objetos do modelo, que serão exportados para os chamados pré-processadores do software FEM. Em seguida, a montagem do modelo é realizada e cada componente é dividido ou discretizado em uma infinidade de elementos com dimensões definidas, os chamados elementos finitos. Além disso, as condições de contorno são aplicadas ao modelo e as características dos materiais são adicionadas. Posteriormente, o modelo completo é transferido para o chamado solucionador, que computará a solução. Em

seguida, os resultados podem ser visualizados e avaliados na forma de gráficos ou animações com a ajuda do chamado pós-processador (VOLLRATH, 2013).

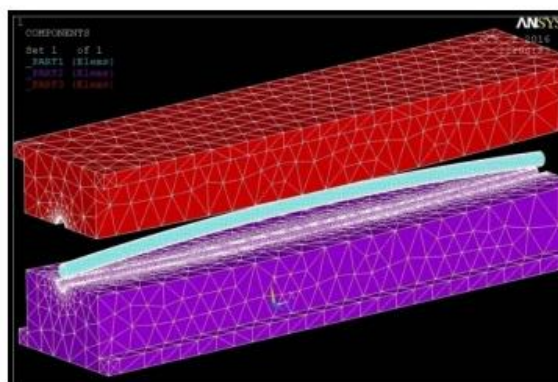
KUBOKI et al. (2010) investigaram o endireitamento de tubos AISI 1045 por elementos finitos. O tubo foi discretizado em uma malha de elementos sólidos e seu comportamento foi assumido como isotrópico. Diferentes modelos foram construídos, usando formulações implícitas e explícitas e diferentes simplificações foram testadas. Compararam-se as previsões dos diferentes modelos em relação às grandezas geométricas. Os tempos de computação variaram entre 2 e 25 dias. Os longos tempos de cálculo podem ser atribuídos aos longos caminhos de deformação impostos à barra e, simultaneamente, aos pequenos intervalos de tempo necessários para levar em conta o complexo contato que ocorre entre o tubo e os rolos devido ao processo de conformação incremental.

ASAKAWA et al. (2010) modelaram o endireitamento com rolos cruzados de barras de S45C usando um modelo de elementos finitos explícito estático. No modelo, assumiu-se que o endireitamento ocorre puramente por flexão alternada. O procedimento foi aplicado a um segmento de 80 mm da barra, discretizado em uma malha com três elementos na direção radial, 10 na circunferência e 20 no comprimento. As comparações entre as deformações axiais medidas durante o endireitamento e as deformações previstas com o procedimento produziram uma concordância muito boa.

CHEN et al. (2010) simularam o processo de endireitamento de seis rolos transversais para medir a força de endireitamento. Segundo os autores, modelos baseados na forma de hipérbole dos rolos resultam em um comprimento da linha de contato entre o material e os rolos excessivamente curto. Dessa forma, o modelo gera resultados com diferença relativamente grande em relação ao processo físico. Portanto, os autores propuseram um novo modelo de contato entre o material e os rolos de endireitamento. A análise numérica foi capaz de prever resultados de força de endireitamento que concordam com os obtidos na prática.

HOON et al. (2003) construíram um modelo de elementos finitos para otimizar os parâmetros do processo de endireitamento multi-escalonado de 14 rolos. Os parâmetros do processo que têm efeito significativo no processo foram identificados por meio de análise de triagem com um planejamento fatorial fracionário. A combinação ideal dos parâmetros do processo foi determinada e validada a partir de experimentos.

YANAGIHASI et al. (2005) usaram uma abordagem FEM explícita estática tridimensional do problema em que apenas a deformação na flexão foi levada em consideração. O aumento na retilidade pode ser previsto qualitativamente, mas o efeito da estampagem lateral foi negligenciado.



**Figura 9:** O modelo simplificado de simulação por elementos finitos.

Em uma primeira tentativa de simular o endireitamento transversal de barras, MURATA et al. (2008) construíram um modelo tridimensional do processo. A barra, entrelaçada com elementos sólidos, era acionada, dobrada e estampada pelos rolos rotativos. Essa abordagem consumia muito da CPU e permitia apenas um nível limitado de precisão.

Com o objetivo de reduzir o tempo de computação e aumentar a precisão das previsões, MUTRUX et al. (2009) desenvolveram um procedimento em que apenas a deformação de uma parcela da barra foi modelada. Com base nesse método, MUTRUX et al. (2011) concentraram-se na previsão do efeito de amolecimento que ocorreu ao endireitar barras SAE 1144 de 25 mm de diâmetro com um determinado conjunto de rolos sob diferentes parâmetros de processo, simulando o processo com um custo razoável de CPU, um conjunto adequado de equações constitutivas e os valores de tensão de escoamento, mas ainda custa muito tempo para calcular.

DVORKIN & MEDINA (1989) propuseram um modelo simples de elementos finitos para análise do processo de endireitamento de tubos sem costura. Os resultados demonstraram que o processo poderia eliminar a distorção dos tubos e melhorar a qualidade geométrica através da análise numérica.

Os parâmetros do processo de endireitamento devem ser selecionados com base na avaliação quantitativa precisa dos estados de tensão e deformação e da retilinidade da barra durante e após o processo. No entanto, geralmente os parâmetros são definidos a partir de tabelas, modelos matemáticos simples, com base na experiência dos operadores ou por experimentos de tentativa e erro. Essas abordagens são insuficientes para fornecer informações quantitativas precisas sobre o mecanismo de endireitamento e resultam em retilinidade insatisfatória das barras.

ZHANG & YANG (2017) propuseram um modelo simplificado para a análise numérica do processo de endireitamento de tubos (Figura 9). Os autores assumiram que a distribuição total da deformação no estado estacionário durante o endireitamento é semelhante àquela que se desenvolve quando o material é simplesmente dobrado e estampado entre os rolos sem rotação e avanço. Portanto, um estado de flexão puro típico pode ser assumido, pois o raio de curvatura do perfil circular é uniforme. Segundo os autores, o modelo simplificado pode ser usado para obter o raio de curvatura do perfil dos rolos, a fim de controlar a retilinidade do tubo abaixo de um limite tolerável.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram discutidos diversos aspectos relacionados ao processo de endireitamento de produtos siderúrgicos. Este estudo proporcionou uma visão abrangente do processo de endireitamento, abordando seus princípios fundamentais, parâmetros críticos e simulações numéricas. Isso representa um recurso valioso para profissionais da indústria e pesquisadores que buscam compreender e otimizar o processo. Em resumo, o processo de endireitamento desempenha um papel fundamental na fabricação de produtos siderúrgicos de alta qualidade, permitindo a correção de deformações e a obtenção de retilinidade adequada. A seleção adequada de parâmetros, juntamente com o uso de simulações numéricas, contribui para melhorar a eficiência e a qualidade do processo de endireitamento.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] SOLINGEN, H.M., Walzen- und Rollen-Richtmaschinen für Rundstangen, Rohre und Profilstäbe, Springer-Verlag, 1956.
- [2] BOYER, H. E, Cold Finished Steel Bars, in AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Committee on Carbon and Alloy Steel, Metals Handbook, 9<sup>o</sup> ed., p.215-251, 2002.
- [3] SMITH JR., RICHARD P., The Effect of the Number of Leveling Rolls on the Straightening Process, 2002.
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 24500-7:1971-04: Walzwerkseinrichtungen; Walzwerke für Stahl, Begriffe der Einrichtungen zum Richten und Strecken, 1971.
- [5] MUTRUX A., A Procedure for the Simulation of the Cross Roll Straightening Process, Tese de Doutorado, ETH Zurich, 2011.
- [6] SRIMANI, S.L., BASU, J., An investigation for control of residual stress in roller-straightened rails, J. Strain Analysis, Vol. 38, No.3, 2003.
- [7] BALIC J. & NASTRAN M., An on-line predictive system for steel wire straightening using genetic programming, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002.
- [8] WU, J. B. A Study on the Precision Modeling of the Bars Produced in Two Cross-Roll Straightening. Journal of Materials Processing Technology, p.202-206, 1999.
- [9] TALUKDER, N.K., JOHNSON, W., On the arrangement of rolls in cross-roll straighteners, Int. J. Mech. Sci., Vol. 23, 1981.
- [10] FANGMEIER, R., Untersuchungen über das Richten von Rundstäben in zwei-Walzen-Richtmaschinen, Doctoral Thesis, Technischen Hochschule Clausthal, 1966.
- [11] MÄKELT H., Walzen- und Rollen-Richtmaschinen für Rundstangen, Rohre und Profilstäbe, Jg. Heft, 1956.
- [12] HAUKE, V. Structural and residual stress analysis by non-destructive methods. Germany: Elsevier, 1997.

- [13] VOLLRATH K., Simulation of forging processes, Industrieverband Massivumformung, 2013.
- [14] KUBOKI, K., HUANG H., MURATA M., YAMAGUCHI Y., KURODA K., Fem analysis of tube straightener adopting implicit scheme. Steel Research International, 2010.
- [15] ASAKAWA M., URABE M., NISHIMURA K., HAMADA R., AIZAWA S., AMARI M., Theoretical and experimental analysis of roller leveller straightening for coiled bar. Steel Research International, 2010.
- [16] CHEN M., JIANG X.M., ZHAO Z.X., HUANG X.B., Innovation in the Computing System of Straightening Force. CHIN J OF MECH ENG, Vol.23(2010), p.1-7.
- [17] HOON H., JIN H. H., HYOUNG W. L., Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method, INT J MACH TOOL MANU, Vol.3(2003), p.345-350.
- [18] YANAGIHASI, T., HAMA, T., ONODA, Y., ASAKAWA, M., Effect of plastic ratio and repeat bending on straightness in two-roll straightening. J. Jap. Soc. Tech. Plast, Vol.46(2005), p.972-976.
- [19] MUTRUX, A., BERISHA, B., HOCHHOLDINGER, B., HORA, P., Numerical Modelling of Cross Roll Straightening, LS-DYNA Anwenderforum, 2008.
- [20] DVORKIN E.N., MEDINA F.M., Finite element models for analyzing the straightening of steel seamless tubes, J. Eng. Ind., 111 (1989), pp. 351-355
- [21] ZHANG Z., YANG H., A Simplified Finite Element Simulation for Straightening Process of Thin-Walled Tube, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 274 (2017) 012150