

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO TRINCAMENTO DAS BORDAS DE TIRAS

DE AÇO LAMINADAS A FRIO

Marcio Frazão Guimarães Lins	(1)
Alcídio Haydt de Souza	(1)
Carlos Alberto Sampaio Fernandes	(1)
Francisco Hamilton Antunes Silva	(1)
Guilherme Botelho Tostes	(2)

R E S U M O

São feitas considerações sobre a origem, natureza e controle das trincas de borda que constituem defeito bastante comum na laminação "tandem" a frio de tiras de aço de pequena espessura

---

(1) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico

Engenheiro de Controle Técnico da CSN

(2) Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico

Engenheiro do Grupo de Laminação a Frio da CSN

## 1. INTRODUÇÃO

O trincamento das bordas das tiras de aço durante a laminação a frio configura um defeito cujas principais consequências são:

- Arrebetamentos no próprio laminador de tiras a frio e/ou nas linhas de processamento subsequentes.
- Desgaste localizado e acentuado de cilindros, rolos e escovas ao longo dos processamentos posteriores ao surgimento das trincas.
- Desclassificação do produto pela necessidade de maior apartamento de bordas do que o previsto nas ordens de produção.

Em todos estes casos pode-se imediatamente associar quedas de produtividade e elevação de custos em função dos atrasos e desvios de produção envolvidos.

A ocorrência de trincas de borda em tiras a frio pode ser classificada em três padrões básicos principais, segundo a nossa experiência:

- Serrilhado; sequência de pequenas trincas sucessivas que se estende por um longo trecho da tira (fig.1-a).
- Trinca repetitiva; sequência de trincas com pequeno espaçamento entre si (fig.1-b).
- Trinca isolada; rasgamento da borda que pode ou não ser acompanhado por uma projeção de material para fora da tira (fig.1-c e d).

Conforme perfil da trinca é possível a grosso modo determinar de que maneira ela provém, sendo a trinca sem inflexões da última cadeia (fig.1-b), com uma inflexão da penúltima (fig.1-c), com duas da anterior (fig.1-d), etc.

A extensão do defeito e a sua localização na bobina (ponta, cauda, lado do motor, etc.) também fornecem indícios quanto a possíveis causas e merecem exame detalhado e imediato quando da sua ocorrência.

A ocorrência de trincas é problema típico da laminação de tiras para folhas metálicas devido ao alto coeficiente de redução imposto ao material, ten

do também a tendência de afetar mais a produção das maiores larguras, conforme constatado em estudo anterior na CSN (1). O estudo das trincas de borda se reveste de grande importância na medida que a CSN, de acordo com a exigência do mercado, vem produzindo uma mistura cada vez mais fina em planos a frio.

## 2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

A formação de trincas nas bordas das tiras laminadas a frio configura uma situação de fratura incompleta cujo mecanismo compreende duas etapas, nucleação e crescimento, e em ambas a presença de solicitações mecânicas (tensões) é essencial.

Apesar de necessária, a presença de solicitações mecânicas não é suficiente para fazer nuclear uma trinca em um material homogêneo. A nucleação de uma trinca envolve concentração de tensões em um determinado ponto, que pode estar associada a vários fatores: presença de inclusões, descontinuidades do material (poros, marcas) e variações bruscas das propriedades mecânicas ou do estado de tensão interna de um ponto para outro. Tais "acidentes metalográficos" de um modo geral fazem parte da própria natureza do aço que é laminado a frio, ou podem ser provocados durante o seu processamento.

Além disso, algumas heterogeneidades que ocorrem durante a deformação das tiras concorrem para o surgimento das trincas. À medida que o material é comprimido entre os cilindros todos os elementos ao longo da espessura experimentam alguma tendência a se expandir lateralmente (na direção transversal à tira). Devido à distribuição das forças de atrito resistentes a este espalhamento, que são mais fortes no centro da tira, os elementos da região central espalham-se muito menos que os outros elementos da borda. Portanto, a deformação no sentido do comprimento é maior no centro que nas bordas, onde ocorre mais espalhamento. Isto induz um esforço adicional de tração nas bordas que é propício ao trincamento (2).

A figura 3 ilustra esquematicamente a deformação da tira na região junto à borda, em que dois aspectos se destacam; a deformação elástica dos cilin-

dos nos seus sentidos radial (amassamento) e longitudinal (flexão) e o espalhamento transversal da tira.

A tendência ao espalhamento é proporcional ao grau de redução por passe de laminação, ao comprimento do arco de contato cilindro/tira e ao coeficiente de atrito. Acresce que a ductilidade do material é diminuída gradativamente ao longo do processamento por evolução do grau de encruamento, como pela taxa de deformação (velocidade de redução) que é aplicada (figuras 4 e 5). É natural portanto que os produtos de menores espessuras sejam mais afetadas pelo trincamento de bordas.

### 3. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Analisaremos sumariamente os principais fatores que propiciam o surgimento de trincas nas tiras laminadas a frio, percorrendo as etapas do seu processo de fabricação.

#### 3.1. FABRICAÇÃO DE AÇO:

A ocorrência de bolhas subsuperficiais é indicada por nossos aciaristas como o principal fenômeno, nesta área, capaz de gerar a formação de trincas de borda na laminação das tiras a frio. Dadas as condições de vazamento, os aços mais propícios a este defeito são os efervescentes e os aços desoxidados ao SiCa lingotados continuamente.

Devido à difícil desoxidação dos aços ao SiCa, na CSN, além da reoxidação durante o vazamento na máquina de lingotamento contínuo nº 1 (jato aberto), continuamente há a ocorrência de porosidade subsuperficial, principalmente na lateral das placas. Quanto aos aços efervescentes, não se tem observado na CSN ocorrências relevantes de trincamento de bordas nos graus destinados à laminação a frio.

O nível de inclusões também afeta muito a suscetibilidade do aço ao trincamento, mesmo sem favorecer especialmente as bordas. Além da obstrução ao crescimento dos grãos, as inclusões fornecem substrato para nucleação de

trincas. Como as condições de tensão propícias ao trincamento costumam ocorrer mais intensamente nas bordas durante a laminação, o efeito surge mais nessa região.

Como veremos adiante, as outras etapas de processamento do aço vêm acrescentar muitos fatores tanto para nucleação quanto para crescimento das trincas de borda. Entretanto, as condições internas do material, sem dúvida, determinam seu nível de suscetibilidade a este defeito, sendo portanto uma necessidade o seu controle. A adoção de práticas de adição e de vazamento mais evoluídas é então fundamental quando se deseja alcançar altos padrões de produtividade e qualidade na laminação a frio.

Outro aspecto que vem afetar o desempenho global da laminação, em especial na produção de tiras espessuras mais reduzidas, é a estabilidade das características de cada lote de material processado, e a repetibilidade de lote para lote do mesmo grau de aço, com as quais se minimizam as mudanças de curso durante a laminação, sempre detrimenais.

### 3.2. LAMINAÇÃO A QUENTE

Importante papel desempenha a laminação a quente na formação de trincas de borda, envolvendo os seguintes aspectos principais:

#### a. Perfil transversal das tiras laminadas a quente.

O perfil transversal da tira laminada a frio é determinado pelo seu perfil a quente, já que a relação coroa/espessura se mantém constante no processamento a frio, após ser imposta pelas cadeiras acabadoras do laminador de tiras a quente (5). Este perfil determina o coroamento a ser dado nos cilindros do laminador de Tiras a Frio - LTF, influenciando no aplainamento e nas condições de borda das tiras a frio.

A ocorrência de um perfil em cunha na tira a quente, pela assimetria da distribuição de esforços que causa na laminação a frio, é também fator preponderante para surgimento de trincas de borda.

## b. Propriedades mecânicas

O grau de redução a ser imposto na laminação a frio determina o nível de granulação e rigidez necessários das tiras a quente. Quanto mais rígido entrar o material na laminação a frio maiores esforços serão exigidos para sua deformação e por conseguinte maior será a sua suscetibilidade ao trincamento.

Acima de tudo é necessário que haja constância nas características de qualidade das tiras a quente, para que seja possível encontrar as regulagens de redução a frio mais adequadas ao seu processamento, para cada especificação de produto.

Do ponto de vista dimensional, o aspecto que mais afeta especificamente o surgimento de trincas após laminação a frio é a variação de largura das tiras a quente.

As bordas das tiras a quente são irregulares, sendo prática universalmente adotada descartá-las (aparamento lateral após decapagem) antes da laminação a frio. A margem de aparamento lateral é normalmente a menor possível, cada usina estabelecendo seus padrões em função das características dos seus aços. A variação de largura ao longo da tira a aparar conduz a que nas regiões de estreitamento a margem seja menor que a esperada, o que pode propiciar o surgimento de trincas nestas regiões após laminação a frio devido a deficiência de aparamento.

### 3.3. DECAPAGEM

Aparamento lateral e manuseio são os fatores que das linhas de decapagem contínua mais podem afetar o trincamento de tiras a frio.

O aparamento lateral consiste, em última análise, do rompimento longitudinal da tira junto às bordas por um esforço de cisalhamento a frio acima do limite de ruptura do material. Cria-se na região das novas bordas condições propícias à formação de trincas, em termos do encruamento e do rasgamento que aí ocorrem. Evidentemente, como todas as bobinas são aparadas mas bem poucas apresentam trincas após laminadas a frio, é necessário que outros

fatores venham concorrer para que o defeito se configure.

Neste aspecto, a regulagem das navalhas laterais é bastante importante para que se obtenha um corte adequado. Com relação às navalhas propriamente ditas, estas podem provocar os seguintes defeitos associados à formação de trincas e serrilhados na laminação a frio:

- a. Dente; saliência na borda da tira proveniente de descontinuidades das arestas cortantes das navalhas.
- b. Rebarba; resíduo de material na borda advindo de navalhas cegas ou desajustadas. Aqui um fator importante é a observância da troca de conjuntos de navalhas quando se passa a processar material fino ( $< 2,25\text{mm}$ ) logo após o processamento de espessuras acima de 2,65 mm.

Quanto ao manuseio, é óbvio que o cuidado nas operações de transporte e estocagem é essencial, assim como o uso de equipamento adequado para essas operações. É também fundamental obter-se um bom enrolamento após decapagem, evitando espiras salientes, e garantir uma cintagem que resista ao transporte e estocagem.

#### 3.4. LAMINAÇÃO A FRIO

As altas taxas de deformação que são desenvolvidas nos laminadores modernos, associadas às tensões de tração entre cadeiras são os fatores que fazem surgir trincas nas bordas das tiras laminadas a frio.

Do que foi exposto anteriormente deduz-se que esses esforços característicos da laminação a frio vêm acima de tudo contribuir para tornar crítico um trincamento de origem anterior. Entretanto é reconhecido que o processo de laminação a frio oferece vários recursos para se evitar as trincas de bordas, atuando sobre o coroamento dos cilindros, refrigeração, lubrificação, escalas de reduções, velocidade de processamento e tensões entre cadeiras.

Quando originadas no próprio LTF, as trincas de borda podem ter quatro causas principais:

- a. Guias estreitas, especialmente na primeira cadeira.
- b. Resíduos de aço ("sucata") agarrados nas guias
- c. Cilindros marcados
- d. Procedimento incorreto.

Fatores que levam à ocorrência de trincas são principalmente a lubrificação deficiente, tensões excessivas entre cadeiras, reduções elevadas nas últimas cadeiras, deficiências de refrigeração, velocidades de processamento exageradas e coroamento de cilindros inadequado, fatores esses que normalmente atuam de forma conjugada.

Por exemplo, é notório que uma lubrificação deficiente provoca a elevação das cargas de laminação, o que induz à utilização de maiores tensões entre cadeiras (principalmente as últimas) para manter a produtividade, o que favorece o surgimento de trincas.

Um defeito de aplainamento típico da laminação a frio, caracterizado como repuxado central (fig. 6), provoca o distensionamento da região central da tira e concentra as tensões trativas nas bordas, tornando-as mais suscetíveis a trincamentos. Este defeito provem principalmente de um coroamento exagerado dos cilindros induzido por refrigeração inadequada ou insuficiente (6).

Por outro lado, quando cresce a incidência do trincamento de bordas, é normal que a ocorrência de arrebentamentos no LTF tenda a aumentar. É comum observar neste caso que, num esforço para preservar o laminador, adote-se maior taxa de redução na última cadeira, transferindo-se a trinca para as linhas de processamento seguintes onde, submetida a tira a tensões menores, poderá não arrebentar.

#### 4. CONCLUSÕES

A origem das trincas de borda das tiras laminadas a frio está ligada à concentração de tensões nas regiões em que haja bruscas variações de propriedades mecânicas - descontinuidades, inclusões, tensões residuais ou induzi-



das. Tais "acidentes metalográficos" em sua maioria fazem parte, em maior ou menor grau, da própria natureza de cada tipo de aço que é laminado a frio. Isto determina que o nível "normal" da ocorrência de trincas varie de produto para produto.

Apesar de só se tornar aparente após a laminação a frio, a trinca de borda tem sua origem ligada a todas as etapas do processo de fabricação, inclusive e especialmente, à própria laminação a frio.

Para se reduzir o nível de ocorrência desse defeito, os principais pontos a controlar são:

- a. Níveis de porosidade e inclusões nos aços
- b. Perfil e rigidez das tiras laminadas a quente
- c. Aparamento lateral nas decapagens contínuas
- d. Lubrificação de processo e taxas de redução na laminação a frio.

Os autores agradecem as colaborações recebidas, que não foram poucas, de parte de colegas de todas as áreas envolvidas neste trabalho, especialmente dos setores de controle técnico do aço e da laminação a quente.

B I B L I O G R A F I A

- (1) Lins, M.F.G. e Souza, A.H. - Estudo da incidência de trincas nas bobinas laminadas a frio - Relatório interno CSN, Set./82.
- (2) Dieter, G.E. Mechanical Metallurgy - Mc. Graw - Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 1961.
- (3) Tselikov.A. - Stress and Strain in Metal Rolling - Mir Publish., Moscow, 1967.
- (4) Especialistas da Superintendência de Engenharia de Qualidade do Aço da CSN - Comunicação Interna, Jun./83.
- (5) Yarita, I. et alli-Controle de perfil e aplainamento na laminação de tiras de aço a quente e a frio - Kawasaki Steel Technical Report 11/1979.
- (6) Schey, J.A. - Metal Deformation Processes (Friction and Lubrication) - Marcel Dekker Inc., New York, 1970.

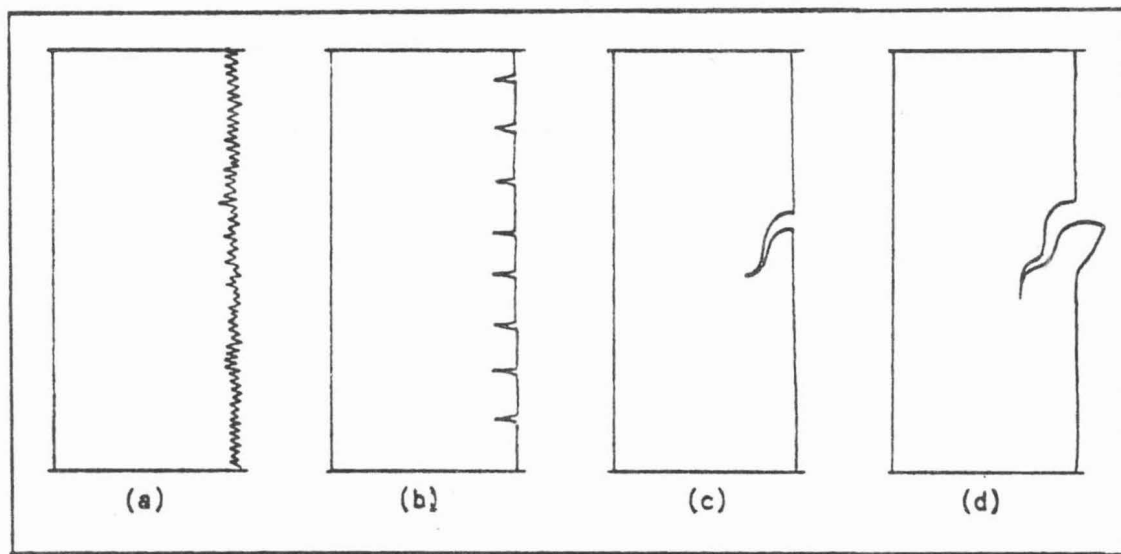


FIGURA 1 - Aspecto visual do defeito trinca de borda, nas ocorrências mais comuns

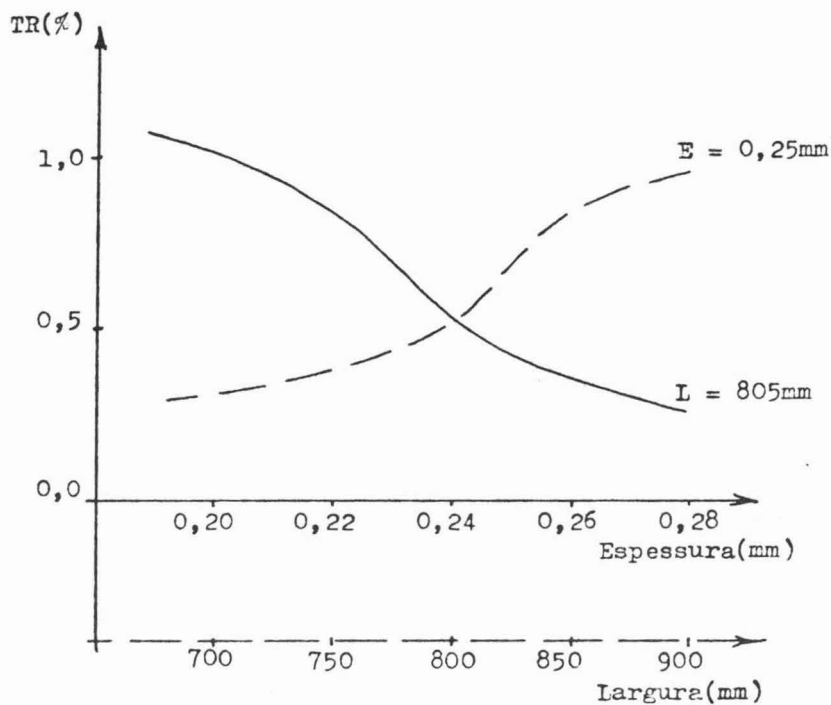


Figura 2 - Ocorrência de desvios por trinca no LTF 1 da CSN (agosto de 1982) em função das dimensões nominais do produto.

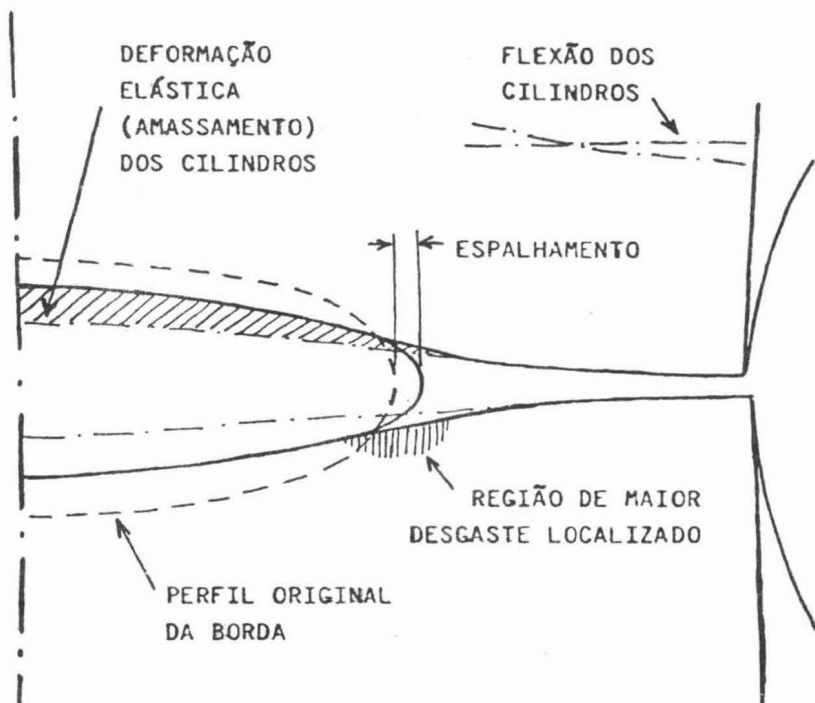


FIGURA 3 - Detalhe do vão entre os cilindros junto à borda da tira.

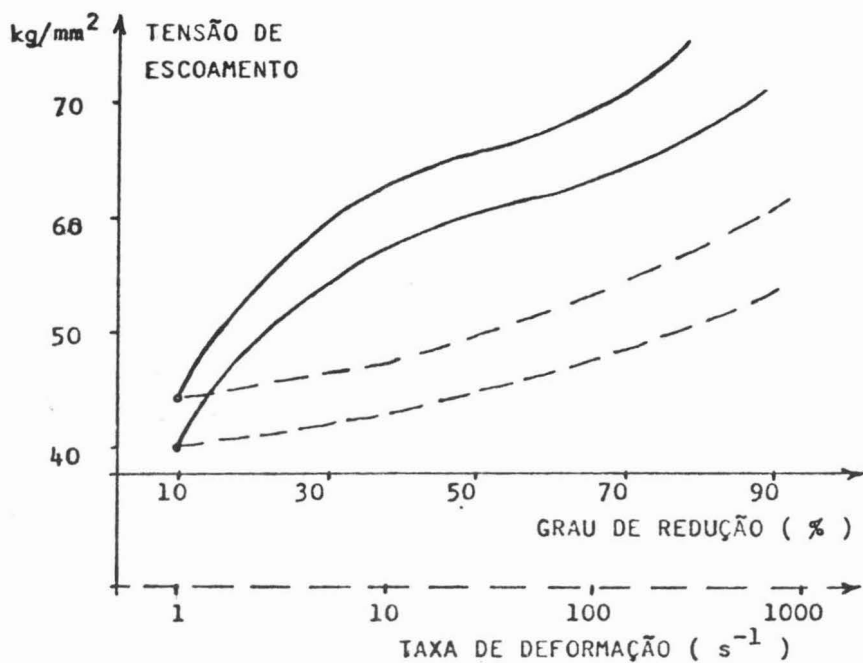


FIGURA 4 - Evolução da tensão de escoamento em função do grau de redução acumulado e da taxa de deformação, para um aço baixo carbono trabalhado a frio.

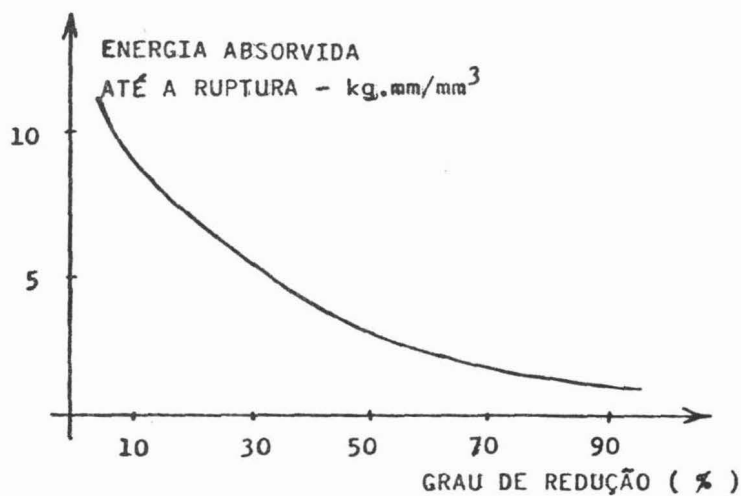


FIGURA 5 - Fragilização de um aço baixo carbono em função do encruamento por trabalho a frio.



FIGURA 6 - Aparência típica do defeito de aplainamento conhecido na CSN como repuxado.

