

# LASCAMENTO DE CILINDROS DECORRENTES DE TRINCAS SUPERFICIAIS QUE APRESENTAM MAIS DE UMA FRENTE DE PROPAGAÇÃO<sup>1</sup>

Felipe Gustavo Bernardes<sup>2</sup>  
Waldemar Braatz Krueger<sup>3</sup>  
Sergio Alves Araujo<sup>4</sup>  
Marcelo Arantes Rebellato<sup>5</sup>  
Sergio Roberto Antonio<sup>6</sup>

## Resumo

Neste trabalho objetiva-se caracterizar um tipo de lascamento e correlacioná-lo com a literatura de mecânica da fratura. Serão apresentadas caracterizações de lascamento observados em campo. Além dos casos clássicos, apresenta-se também um tipo de lascamento no qual há nucleação de trincas superficiais, mas que, diferentemente do tipo de lascamento clássico, observa-se mais de uma frente de propagação desta trinca. Esta propagação ocorre em 2 etapas. Primeiramente há propagação da trinca perpendicularmente à superfície do cilindro. Após atingir um tamanho crítico esta trinca se divide e segue propagando em, pelo menos, mais de um sentido culminando com o lascamento do cilindro. Conclui-se que é possível correlacionar este tipo de fratura com a literatura de mecânica da fratura.

**Palavras-chave:** Cilindro de laminação; Análise de falha; Lascamento.

## ROLLS SPALLING DUE TO SUPERFICIAL CRACKS WICH PRESENTS MORE THAN ONE PROPAGATION FRONT

### Abstract

The object from this article is to characterize a spalling type and find relation of it and the fracture mechanics literature. There will be presented spalling characterizations observed in field. Beyond the classical cases, it is presented a type of spalling wich occurs a superficial crack nucleation, but, different from the classical spalling, the crack growth happens with more than one front. This crack growth occurs in two steps. First comes the crack growth perpendicularly from the surface. After it reaches a critical size, the crack divides itself and continues to growth, in more than one way, until the spalling occurs. It is conclude that it is possible to find a relation between this type of fracture and the mechanical fracture literature.

**Key words:** Rolling mill rolls; Failure analyses; Spalling.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 44º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 16 a 19 de outubro de 2007, Campos do Jordão – SP, Brasil.

<sup>2</sup> MsC Engenharia Mecânica, Engenheiro Técnico de Vendas, Aços Villares – Grupo Sidenor, SP;

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Trainee, Aços Villares – Grupo Sidenor, SP;

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Supervisor de Engenharia, Aços Villares – Grupo Sidenor, SP;

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista, Gerente Comercial, Aços Villares – Grupo Sidenor, SP;

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro Técnico de Vendas, Aços Villares – Grupo Sidenor, SP;

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história tem-se observado uma grande evolução do ponto de vista de melhoria de produtividade e qualidade no processo de laminação. Esta evolução tem sido alcançada mediante a implementação de novas tecnologias no processo produtivo. Com isso, as solicitações as quais os cilindros de laminação são submetidos são cada vez mais severas. Demandando-se, por tanto, melhorias de qualidade nos cilindros capazes de suprir estas novas exigências. As melhorias alcançadas no desenvolvimento de cilindros foram obtidas em termos de melhoria de performance, qualidade superficial e resistência a acidentes.<sup>(1-4)</sup>

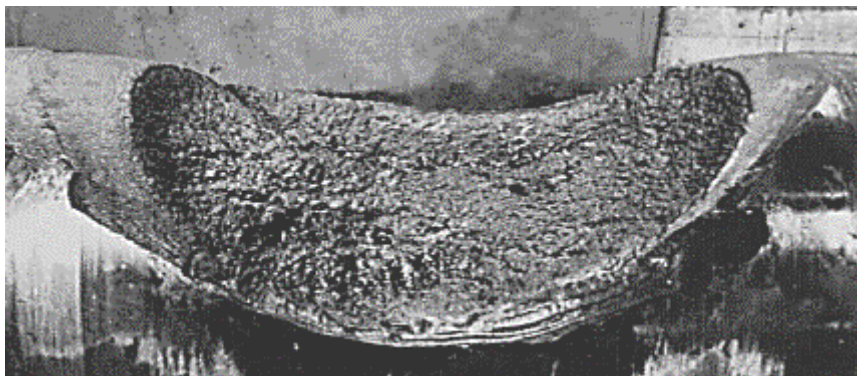
A caracterização das solicitações as quais os cilindros são submetidos é, portanto, fundamental no processo de desenvolvimento de novas qualidades de cilindro. Em particular, o desenvolvimento de cilindros mais resistentes a acidentes demanda entender a origem destes acidentes. É neste contexto que a análise de falhas de cilindro se encaixa e se faz peça importante na busca constante por melhores desempenhos no processo produtivo de tiras laminadas.

Algumas falhas observadas em cilindros de laminação são bem características e estão bem documentadas na literatura e nos manuais de falhas de cilindros. Neste trabalho pretende-se documentar uma morfologia de falha observada em cilindros de trabalho do LTQ. Segundo o observado na literatura esta morfologia é pouco conhecida entre os usuários de cilindro. Como por exemplo, pode-se citar o manual de falhas de cilindros da associação europeia de fundição.<sup>(5)</sup> Segundo esta referencia as falhas observadas em cilindros de trabalho do LTQ, em termos de morfologia, podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Lascamentos;
- Trincas térmicas;
- Danos mecânicos;
- Defeitos superficiais e subsuperficiais;
- Condições superficiais durante a laminação.

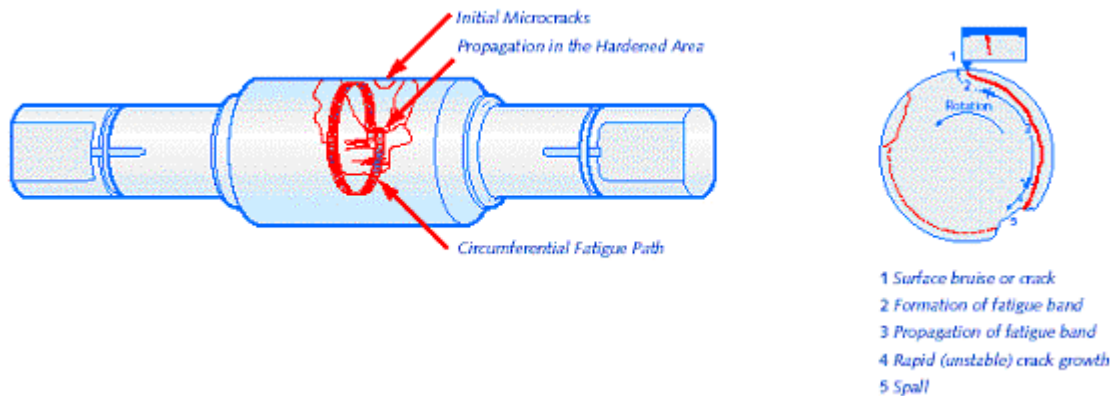
A classificação descrita acima pode ainda ser subdividida em função da característica da origem da falha. Nos casos de falha por lascamento pode-se ainda observar a seguinte subdivisão:

- Lascamentos originado no núcleo – Lascamento causado por fadiga no núcleo. Neste tipo de lascamento é possível notar linhas de fadiga partindo do núcleo do cilindro e caminhado em direção a superfície (Figura 1).

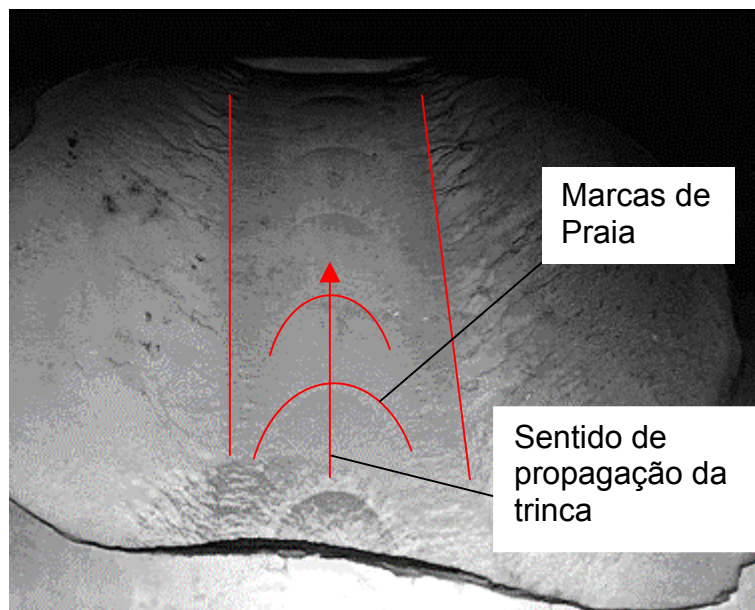


**Figura 1** – Saddle Spall.

- Trincas Mecânicas com propagação circunferencial – Este tipo de lascamento decorre da formação e propagação de uma trinca superficial. Sendo que, em um primeiro estágio a trinca se propaga em direção ao núcleo do cilindro (propagação radial) e em seguida segue propagando na direção circunferencial no sentido contrário ao de rotação do cilindro (Figura 2). A propagação no sentido circunferencial apresenta morfologia bastante característica. Nota-se marcas de propagação conhecidas como "marcas de praia" que indicam o sentido de propagação da trinca (Figura 3).

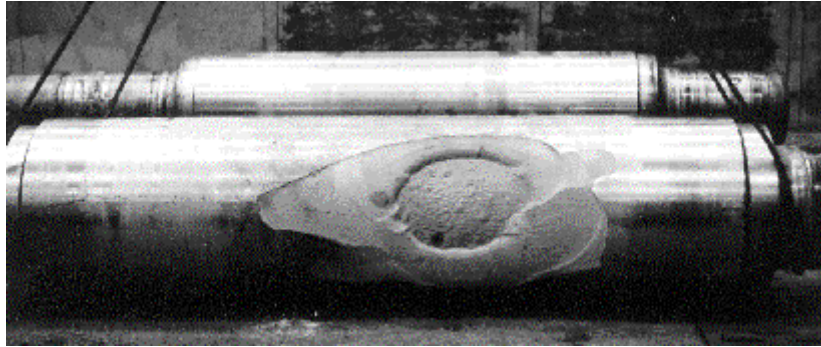


**Figura 2** – Desenho esquemático ilustrando o ocorrência de lascamento originado por trinca superficial



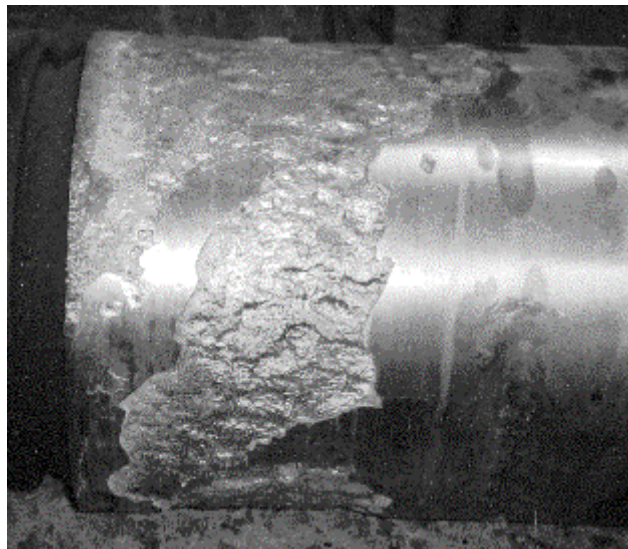
**Figura 3** – Propagação de trinca na direção circunferencial

- Falhas metalúrgica na interface - Lascamento devido ao descolamento da interface casca-núcleo. Geralmente neste tipo de lascamento a região que apresentou a descontinuidade fica pronunciada na região central da lasca.



**Figura 4** – Lascamento devido a descontinuidade na interface

- Profundidade de camada insuficiente – Notam-se lascamentos localizados devido camada com profundidade insuficiente. Considerando que o cilindro está sendo utilizado dentro da faixa de diâmetro especificada, este problema é um problema de fabricação.



**Figura 5** – Lascamento devido a camada insuficiente.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Foram realizadas caracterizações em algumas falhas por lascamentos com aspectos similares. Estas caracterizações foram feitas por meio de observações macroscópicas, realizações de ensaios de líquido penetrante, ultra-som e micrografia. As observações apresentadas foram realizadas em cilindros de trabalho de diferentes laminadores de tiras a quente.

Em um dos casos analisados foi possível analisar não só a região lascada, mas também a lasca gerada durante o acidente. Neste caso procederam-se também na casca uma análise microestrutural, ensaio de líquido penetrante e ultra-som. Estes ensaios foram realizados com objetivo de indicar o ponto de início da trinca que originou o lascamento. Nos casos nos quais não foi possível analisar a lasca, documentou-se o aspecto macroscópico da região lascada.

Os aspectos em comum observados nos lascamentos são apresentados.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise do Cilindro de Ferro Acidentado na Cadeira F6 do Laminador da Cosipa

Segue abaixo análise realizada em um cilindro ferro fundido indefinido (ICDP) CI82S acidentado durante campanha na cadeira F6 do LTQ da Cosipa.

##### Exame visual

Na Figura 6 está apresentada uma imagem da superfície do cilindro após o acidente. Nota-se na mesa marcas diagonais de chapa. Além disso, haviam restos de chapa caldeados, conforme as Figuras 7a e 7b. Há ainda uma trinca semi-circunferencial, atingindo uma área de 240 mm x 490 mm próxima à borda da mesa no lado motor. Observando-se ainda nessa mesma região, a presença de uma trinca longitudinal com 40 mm de comprimento, distante 50 mm da borda, conforme as Figuras 8a e 8b.

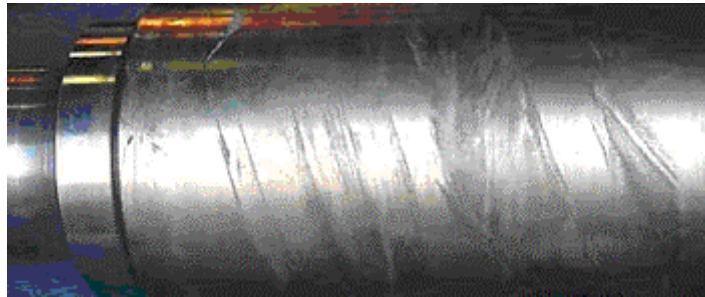


Figura 6: Marcas de chapa no sentido diagonal.

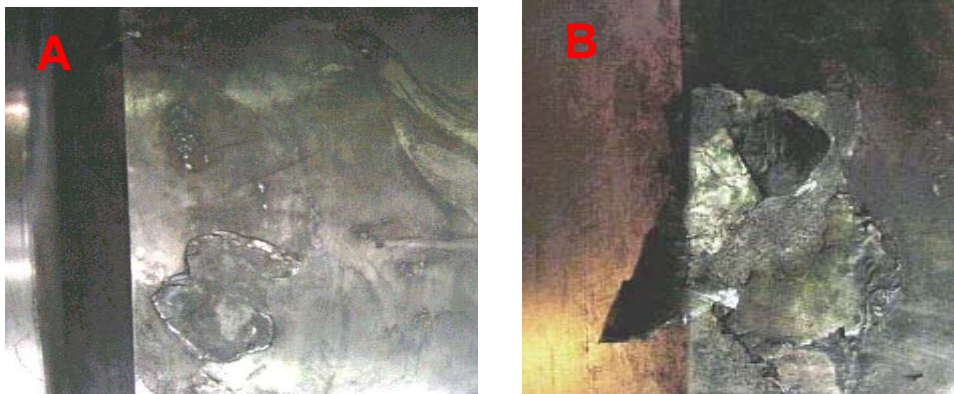


Figura 7(a) Resto de chapa caldeada; (b) Detalhamento da região caldeada.

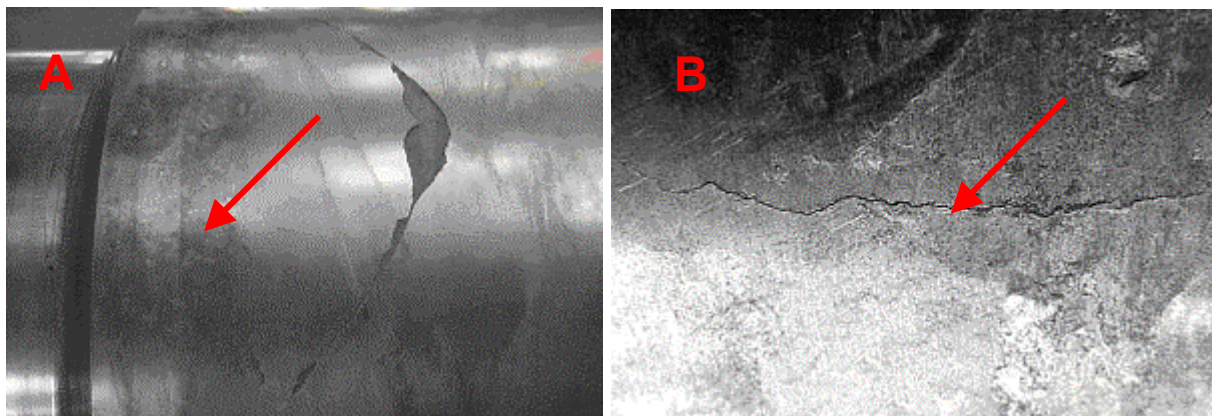
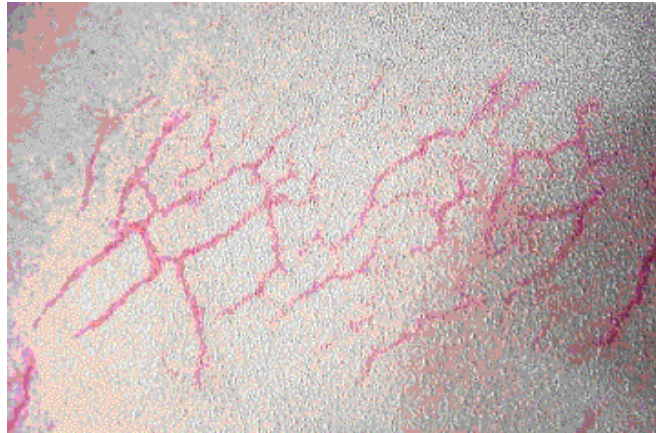


Figura 8 (a) Trinca semi-circunferencial; (b) detalhe da trinca longitudinal existente na mesma região, indicada pelas setas.

Após o ensaio de líquido penetrante observou-se na borda lado motor a presença de regiões com malha de trincas térmicas, conforme ilustra a figura 9. Estas trincas também podem ser observadas dentro da região com trinca circunferencial e circundando a trinca longitudinal, conforme as Figuras 10a e 10b.

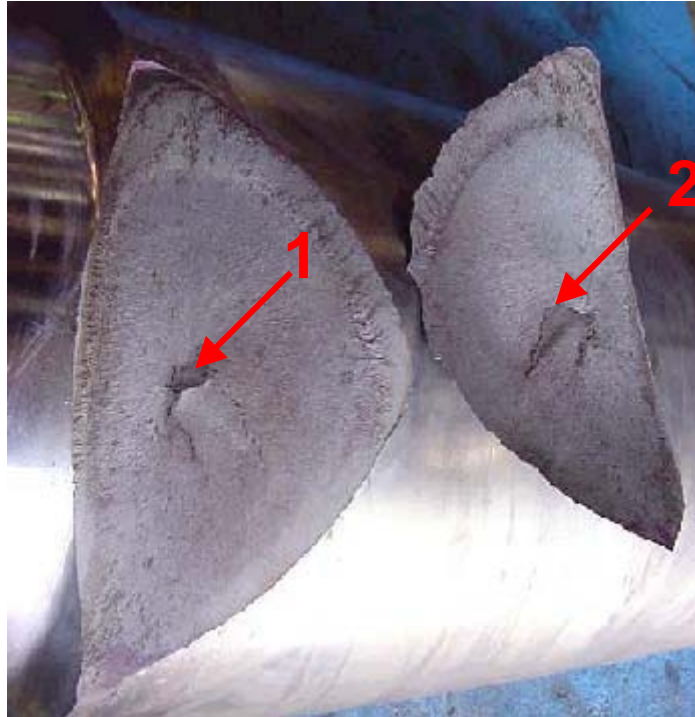


**Figura 9:** Região da borda inferior com malha de trinca por tensão térmica.

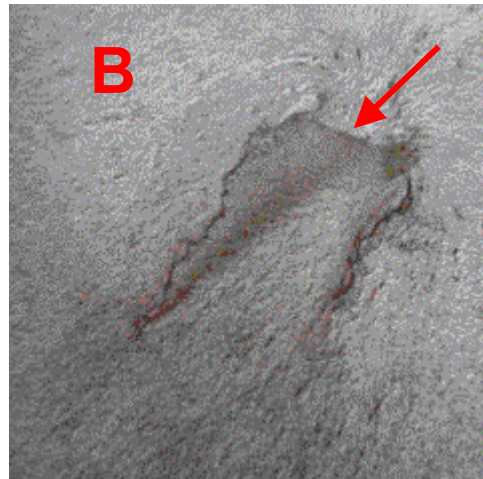
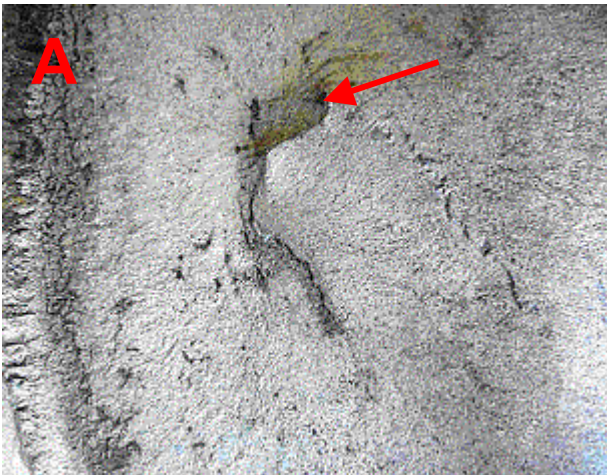


**Figura 10** (a) Mesmo defeito da Figura 9, existente na região da trinca semi- circunferencial; (b) Detalhamento da trinca longitudinal indicada pelas setas, circundada por malha de trinca por tensão térmica.

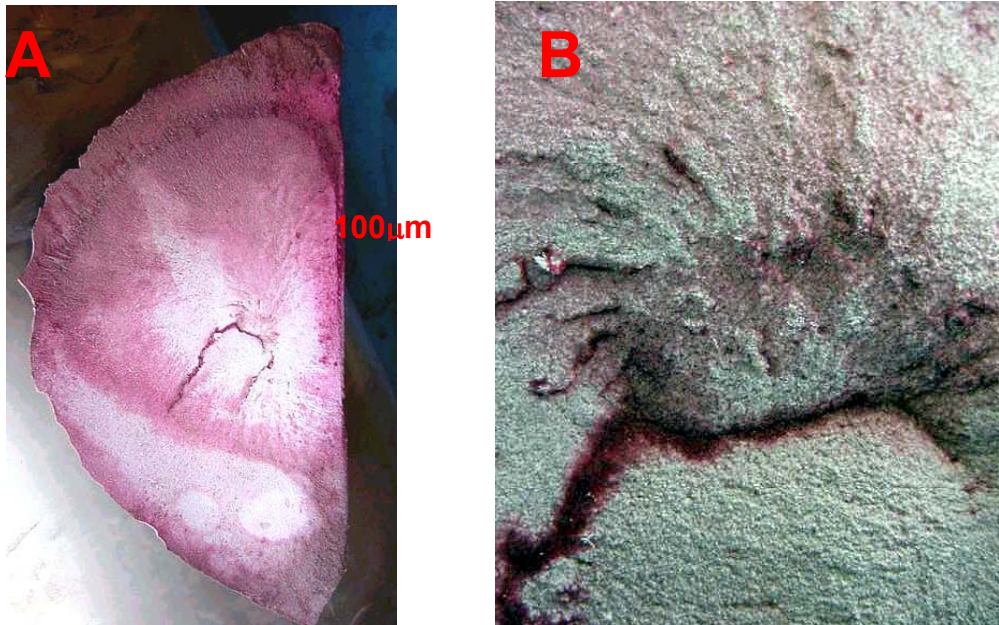
Após a retirada da região que estava com descolamento, notou-se que a trinca longitudinal, existente a 50 mm da borda da mesa do lado motor, se propagava perpendicularmente, em direção ao núcleo, com até 20 mm de profundidade. A seguir a trinca propagou-se em duas direções com ângulo aproximado de 45%, até atingir a superfície. Pode-se notar a presença de uma protuberância na região de divisão da trinca, devido ao ângulo de separação de 45%, conforme as Figuras 11, 12 e 13.



**Figura 11:** Face da fratura da região com descolamento



**Figura 12** (a) Detalhe da face fratura mostrando região do final da trinca no cilindro; (b) e na lasca.

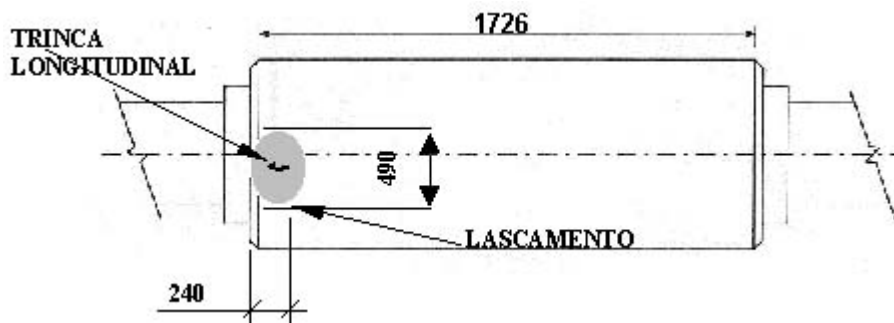


**Figura 13** (a) Face de fratura da lasca; (b) detalhe do final da trinca existente na superfície, após ensaio de líquido penetrante.

### Exame de ultra som

Na Figura 14 apresenta-se um desenho esquemático da região onde apresentou o lascamento. Antes de destacar a região lascada, procedeu-se o exame de ultra-som nesta região. A análise mostrou que a região com a trinca longitudinal e as trincas térmicas estava praticamente descolada (solta), sendo que a lasca atingiu uma profundidade de 0 mm a 47 mm.

A trinca existente no centro dessa área (situada a 50 mm da borda) apresentava 40mm de comprimento e atingia uma profundidade de 20 mm.



**Figura 14:** Croqui detalhando posição e tamanho do defeito.

### Exame microestrutural

O exame microestrutural apresentou na superfície da mesa carbonetos eutéticos em matriz constituída de martensita revenida, notando-se a presença de grafita, conforme ilustra a Figura 15a.

O núcleo da mesa apresentou ocorrências de carbonetos eutéticos em matriz perlítica e grafita nodular do tipo I e II, conforme ilustra a figura 15b.

Realizou-se análise micrográfica na região com a chapa caldeada. Notou-se a ocorrência de encruamento neste material (indicada pela seta 1). Fica evidenciado também que a região da superfície do cilindro, que está logo abaixo, foi



termicamente afetada. Isto pode ser concluído devido à presença de austenita retida (indicada pela seta 2), conforme a figura 16.

Portanto, a análise microestrutural não revelou qualquer desvio de ordem de fabricação que pudesse justificar a ocorrência do acidente.

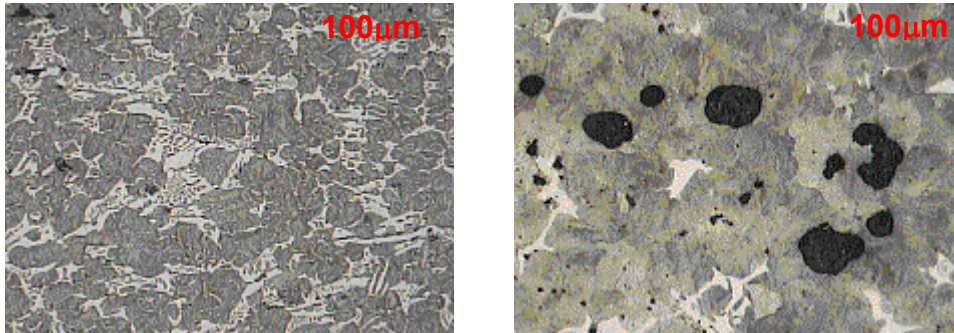


Figura 15: Fotomicrografia 100x com ataque Nital 2% v/v, (a) superfície da borda inferior; (b) núcleo da borda inferior.

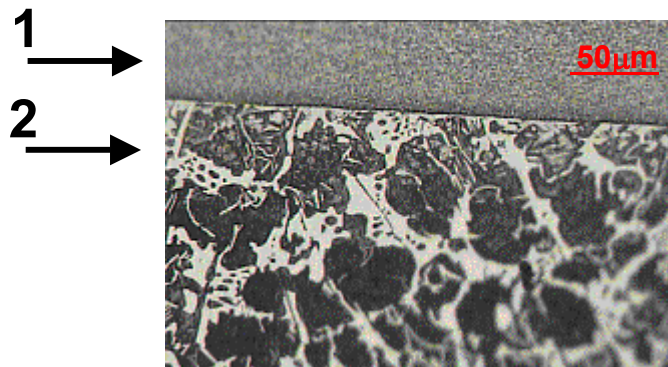


Figura 16: Fotomicrografia 200x com ataque Nital 2% v/v, mostrando região caldeada, (seta 1) microestrutura da chapa e (seta 2) microestrutura da superfície da borda inferior do cilindro

### 3.2 Análise do Cilindro de Ferro Acidentado na Cadeira F6 do Laminador da CSN

Na Figura 17 segue apresentada a característica superficial de um cilindro de alto cromo após acidente no LTQ da CSN.

Conforme observado no caso anterior, nota-se uma região protuberante (indicado pela linha tracejada na Figura 17). No entanto, não foi possível encontrar o início da trinca devido à perda da lasca. Observam-se também regiões com marcas de propagação de trinca, outro indicativo que a propagação ocorreu a partir da região mais protuberante.

Ou seja, embora não foi possível localizar o início da trinca que originou o lascamento, as características observadas indicam que o lascamento ocorreu de forma similar ao observado anteriormente.



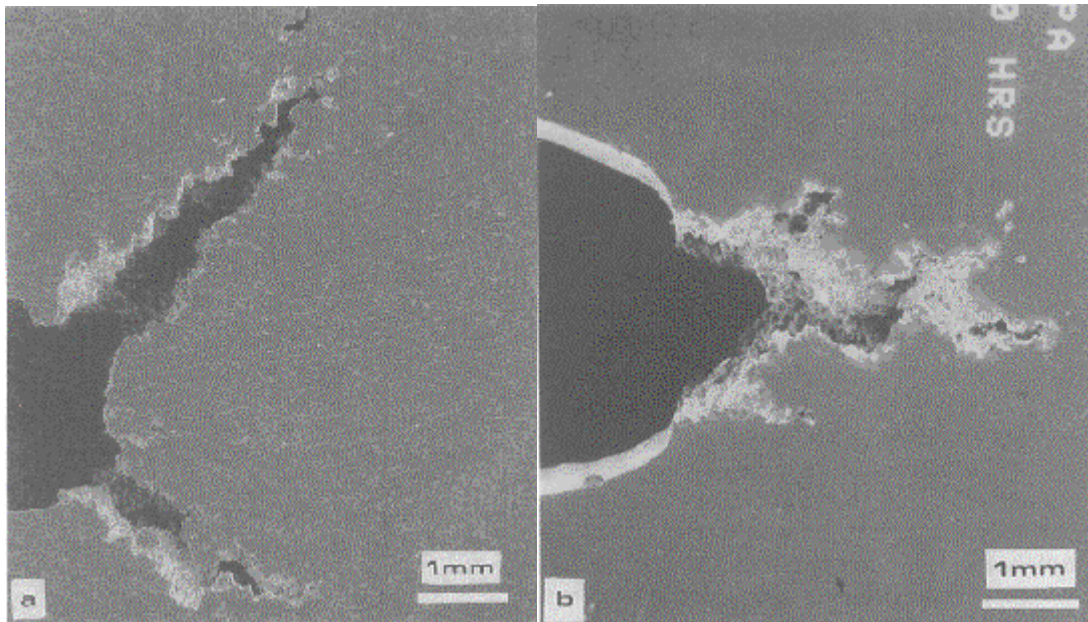
Figura 17 – Morfologia de lascamento de cilindro alto-cromo

#### 4 DISCUSSÃO

Conforme apresentado anteriormente, no caso clássico de lascamento decorrente de propagação de trincas superficiais, observa-se que a propagação da trinca inicia-se caminhando perpendicularmente a superfície do cilindro e, em um segundo estágio, segue propagando na direção circunferencial e com sentido contrário ao de rotação do cilindro.

Conforme os resultados apresentados neste trabalho, há um outro tipo de lascamento que também é decorrente de trinca superficial e em um primeiro estágio propaga perpendicularmente à superfície, mas em um segundo estágio a trinca se divide em duas e segue propagando em duas direções. As propagações destas duas trincas culminam com o lascamento do cilindro.

Na literatura justifica-se a ocorrência de bifurcação de trinca em função do estado de tensão na ponta da trinca. Um dos fatores que pode influenciar o campo de tensão na ponta da trinca é o próprio formato da trinca, conforme indicado na Figura 18.<sup>(6)</sup> Na Figura 18 está apresentado um caso de propagação de trinca com bifurcação e outro de propagação quasi-planar. Estas imagens foram feitas após ensaio de flexão em corpo de prova um entalhe inicial. Sendo que, no ensaio referente à Figura 18(a) o entalhe inicial foi feito com formato agudo e no outro, referente à Figura 18(b), realizou-se um entalhe com a ponta arredondada. Ou seja, o formato do entalhe determinou a ocorrência ou não de bifurcação da trinca.



**Figura 18** – Dois diferentes modos de propagação de trinca observadas em aço inoxidável 304. (a) frente bifurcada de propagação de trinca partindo de uma trinca inicial com formato agudo; (b) frente quasi-planar de propagação de trinca partindo de uma trinca inicial com formato arredondado.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho evidenciam a existência de um tipo de lascamento com características diferentes daqueles tradicionalmente conhecidos na literatura.

Este trabalho contribui no sentido de auxiliar futuras análises de falhas a serem realizadas em cilindros de laminação.

## REFERÊNCIAS

- 1 JUNIOR, A. R., XAVIER, R. R., SANTOS, C. E. R., CARVALHO, M. A., SINATORA, A. “*Desenvolvimento de Cilindros em Aço Rápido para a Laminação de Não Planos*”, 40º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, ABM, Vitória/ES, 2003;
- 2 CAITHNESS, L.; COX, S. X.; EMERY S. “*Surface behaviour of HSS in hot strip mills*”, Rolls 2000 Conference of Institute of Materials, Birmingham, U.K., April, 1999;
- 3 KERR, E. J., “*High Speed Steel work roll at Dofasco*”, Iron and Steel Maker USA, vol. 27, no. 1, pp. 27-30, Jan. 2000;
- 4 BOCCALINI JR., M.; C.L. SERANTONI, A. SINATORA., Y. MATSUBARA, Science of Casting and Solidification, Brasov, edited by D.M. Stefanescu (Lux Libris, Brasov, 2001) 393, May 2001;
- 5 CAEF – THE FOUNDRY ASSOCIATION. Roll Failures Manual Hot Mill Cast Work Rolls. Dusseldorf: CAEF, roll section, p. 5-26, 2002;
- 6 ARGON, A. S., “Topics in Fracture and Fatigue”, Springer Verlag, p. 237-239.