

# ANÁLISE DE FALHA DE UM CILINDRO PARA LAMINAÇÃO DE VIDRO<sup>1</sup>

Edwan Anderson Ariza Echeverri<sup>1</sup>  
Mario González Ramírez<sup>2</sup>  
André Paulo Tschiptschin<sup>3</sup>

## Resumo

Cilindros de laminação de vidro operam sob condições severas de solicitação térmica, suportando tensões compressivas e trativas decorrentes de choques térmicos em pequenos intervalos de tempo. A presença de eventuais defeitos de fabricação intensifica as solicitações mecânicas e térmicas tornando mais crítica a sua utilização, comprometendo a vida útil do cilindro e elevando os custos de manutenção. O objetivo desse trabalho é analisar a causa da falha de um cilindro para laminação de vidro que rompeu após seis campanhas de laminação. Para isso, foram comparados os resultados metalográficos, fractográficos, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e os de modelagem do tratamento térmico de têmpera ao ar, a fim de avaliar as tensões residuais térmicas e de transformação no cilindro. A modelagem pelo método dos elementos finitos focou tanto as tensões térmicas e de transformação durante o tratamento térmico como as tensões decorrentes dos gradientes térmicos desenvolvidos durante operação do cilindro, abaixo da temperatura de transformação. O estudo permitiu obter uma boa correlação das tensões simuladas com os resultados das análises da fratura do cilindro.

**Palavras-chave:** Cilindro de laminação de vidro; Modelagem por elementos finitos; Tensões residuais.

## FAILURE ANALYSIS OF GLASS ROLLING MILL ROLL

### Abstract

Glass rolling mill rolls operate under severe thermal stresses. Compressive and tensile stresses resulting from thermal shocks arise in short time periods. Manufacturing defects intensify thermal and mechanical stresses impairing the cylinder's lifespan and increasing maintenance costs. The aim of the study is to analyze the cause of failure of a glass rolling mill roll which broke after six rolling campaigns. The broken roll was characterized by metallographic and fractographic techniques. Mathematical modeling of the air quenching process was carried out, in order to assess the residual stresses that arise from thermal gradients and phase transformation during heat treatment of the roll and also from thermal gradients developed during the cylinder operation, below the transformation temperature. A good correlation between the numerical simulations and metallographic and fractographic results were obtained.

**Key words:** Rolling mill glass roll; Finite element modeling; Residual stress.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67<sup>o</sup> Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Estudante de Doutorado, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), Brasil.

<sup>3</sup> Professor Titular, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, USP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

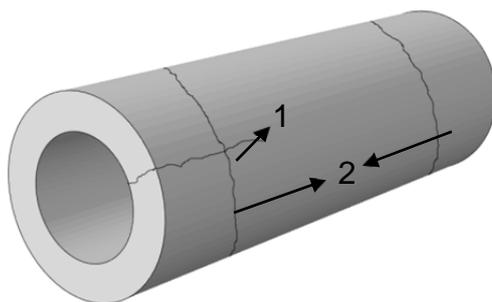
O cilindro de laminação de vidro é um elemento de conformação mecânica que opera sob a ação de gradientes térmicos acentuados, originando tensões compressivas e trativas que flutuam em curtos intervalos de tempo. Durante o processo de laminação, ocorrem variações de temperatura de trabalho, que levam ao surgimento de tensões térmicas. Essas tensões surgem devido ao aquecimento da superfície externa do cilindro em contato com o material laminado, em temperaturas elevadas e ao resfriamento de sua superfície interna em contato com a água de refrigeração. O aquecimento da superfície externa do cilindro gera uma diferença grande de temperatura em relação à superfície interna e uma dilatação do cilindro não uniforme. Em consequência são acumuladas tensões residuais que podem causar seu trincamento.

Os cilindros de laminação de vidro são geralmente fabricados em aço inoxidável martensítico da classe AISI 410, temperados ao ar, podendo ser utilizados os métodos da trepanação de barras cilíndricas laminadas ou forjadas, ou por processo mais barato de fundição centrífuga.

O objetivo deste trabalho é o de analisar a causa da falha de um cilindro de laminação de vidro, AISI 410, fabricado por fundição centrífuga, que rompeu após seis campanhas de laminação. Após a sexta campanha de laminação o cilindro foi tirado da máquina e pouco tempo depois fraturou catastróficamente. A metodologia empregou análises metalográfica, fractográfica, por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, foi feito modelamento pelo método dos elementos finitos do tratamento térmico de têmpera ao ar, para avaliar as tensões térmicas e de transformação durante a têmpera e das tensões térmicas devidas aos gradientes desenvolvidos durante as operações de laminação do vidro, abaixo da temperatura de transformação.

### 1.1 Descrição do Problema

O cilindro de laminação de vidro analisado é um cilindro oco. A geometria do cilindro está ilustrada na Figura 1.



**Figura 1.** Desenho esquemático do cilindro de laminação com indicação dos dois tipos de trincas formadas. 1, trinca axial; 2, trincas tangenciais.

Durante a laminação o cilindro trabalha em contato com vidro fundido na temperatura de 1.100°C. Para garantir que sua superfície não ultrapasse temperaturas entre 425°C e 475°C, o mesmo é refrigerado durante a operação de laminação, por água que circula pela parte interna. O cilindro fraturou após seis campanhas de laminação. A fratura ocorreu por trincamento na direção axial, próximo de uma das extremidades, com formação de duas trincas circunferenciais

em regiões situadas cerca de 70% a 80% da distância entre o centro do cilindro e suas extremidades, como apresentado na Figura 1.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O rolo laminador de vidro é um cilindro oco fabricado em aço inoxidável AISI 410 centrifugado. Possui diâmetros externo e interno iguais a 265 e 165 mm, respectivamente, com espessura de parede de 50 mm. A composição química do aço é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química do aço AISI 410 (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,15	1,00	1,00	0,04	0,03	12,5

A retirada de amostras foi iniciada por corte do cilindro em uma seção transversal, para observação das superfícies de fratura axial e tangencial. As superfícies de fratura foram limpas em ultrassom com álcool por 25 minutos e em seguida em acetona pelo mesmo tempo para posteriormente ser secada com jato de ar quente.

A amostra para análise metalográfica foi extraída da espessura do cilindro na direção radial. A amostra foi lixada até grana 1000 e polida com pasta de diamante até 1  $\mu$ m. Foi feito macroataque com reagente Villela (5 ml de HCl, 1g de ácido pícrico em 100 ml de álcool etílico (95%)) durante 60 segundos.

As macrografias da fratura e do macroataque foram feitas por meio de uma lupa estereoscópica marca Nikon com câmara fotográfica acoplada a um sistema de aquisição de dados micrométricos. A observação metalográfica foi realizada em microscópio óptico Olympus BX-80 e por MEV em equipamento Phillips XL30 com analisador de elementos químicos por EDS.

A simulação numérica do tratamento térmico de têmpera ao ar do cilindro, e das tensões térmicas durante operação, foi feita utilizando o método dos elementos finitos (MEF - software ABAQUS 6.9), com a finalidade de avaliar o estado de tensões resultantes na superfície externa e interna do cilindro. O modelo matemático feito utiliza informações fornecidas pelas curvas de transformação em resfriamento contínuo e previsão da microestrutura do material em 20 posições entre a superfície e o centro do cilindro, para alimentar o modelo não linear elasto-plástico de acoplamento termomecânico desenvolvido através do método dos elementos finitos. As curvas de resfriamentos são calculadas, usando a condutividade térmica, capacidade calorífica, temperatura do meio de têmpera e o coeficiente de transferência de calor para a superfície<sup>(1)</sup>. O programa divide a curva de resfriamento em 54 intervalos iguais e avalia o estado de transformação para cada ponto, determinando se o ponto se encontra em uma região de transformação, fornecendo quanto de cada fase ou microconstituente há no interior do material, na região considerada.

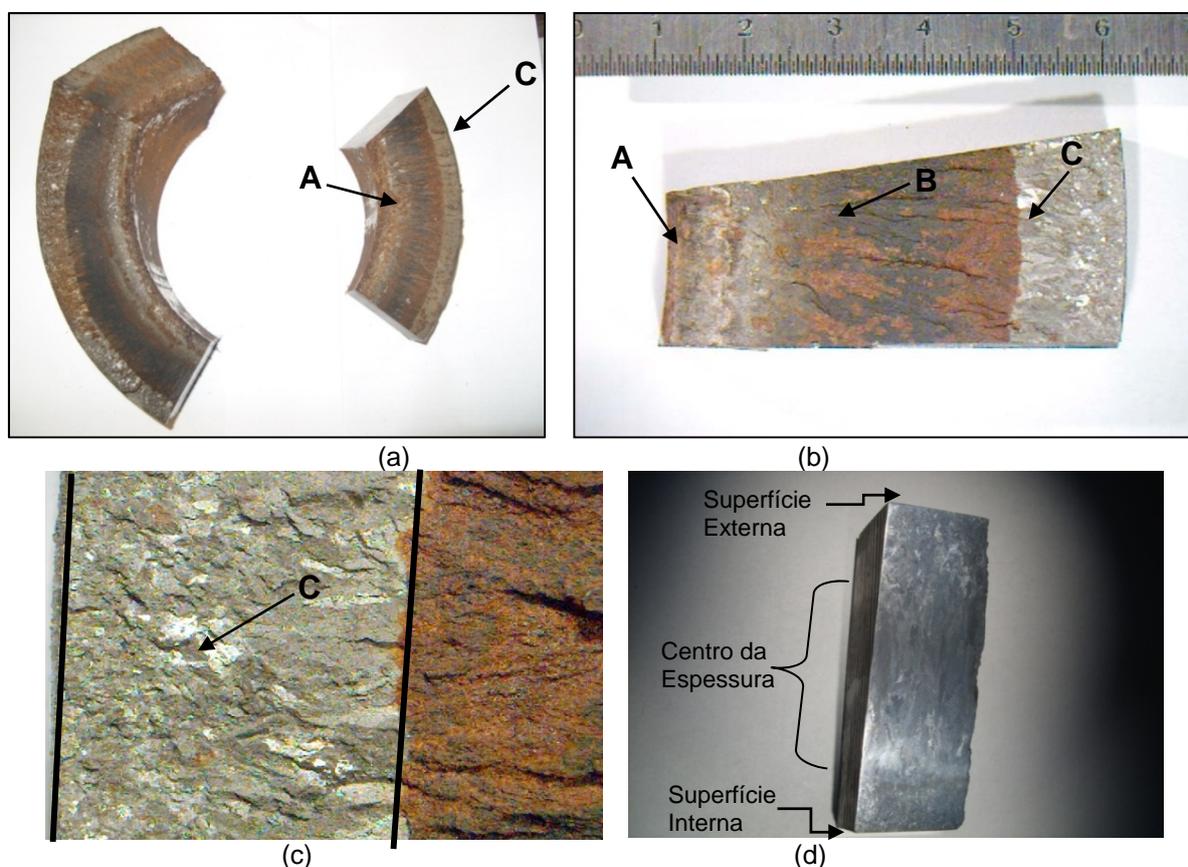
Para facilitar a análise dos dados de simulações e o acoplamento com o modelo de elementos finitos, foi desenvolvido o programa conversor escrito em linguagem Java<sup>(2)</sup>, que utiliza a biblioteca de interfaces gráficas SWT<sup>(3)</sup> gerando uma tabela com a fração de cada constituinte em cada anel.

Foram consideradas as propriedades elasto-plásticas do material em função da temperatura e da fração parcial de cada constituinte na microestrutura obtidas a partir da interpolação dos resultados obtidos por Schröder<sup>(4)</sup> e Pietzsch<sup>(5)</sup>. Visto que a geometria analisada é cilíndrica, uma representação axissimétrica foi utilizada na

geração da malha de elementos finitos, com 12.341 elementos de ordem geométrica quadrática CAX4T.

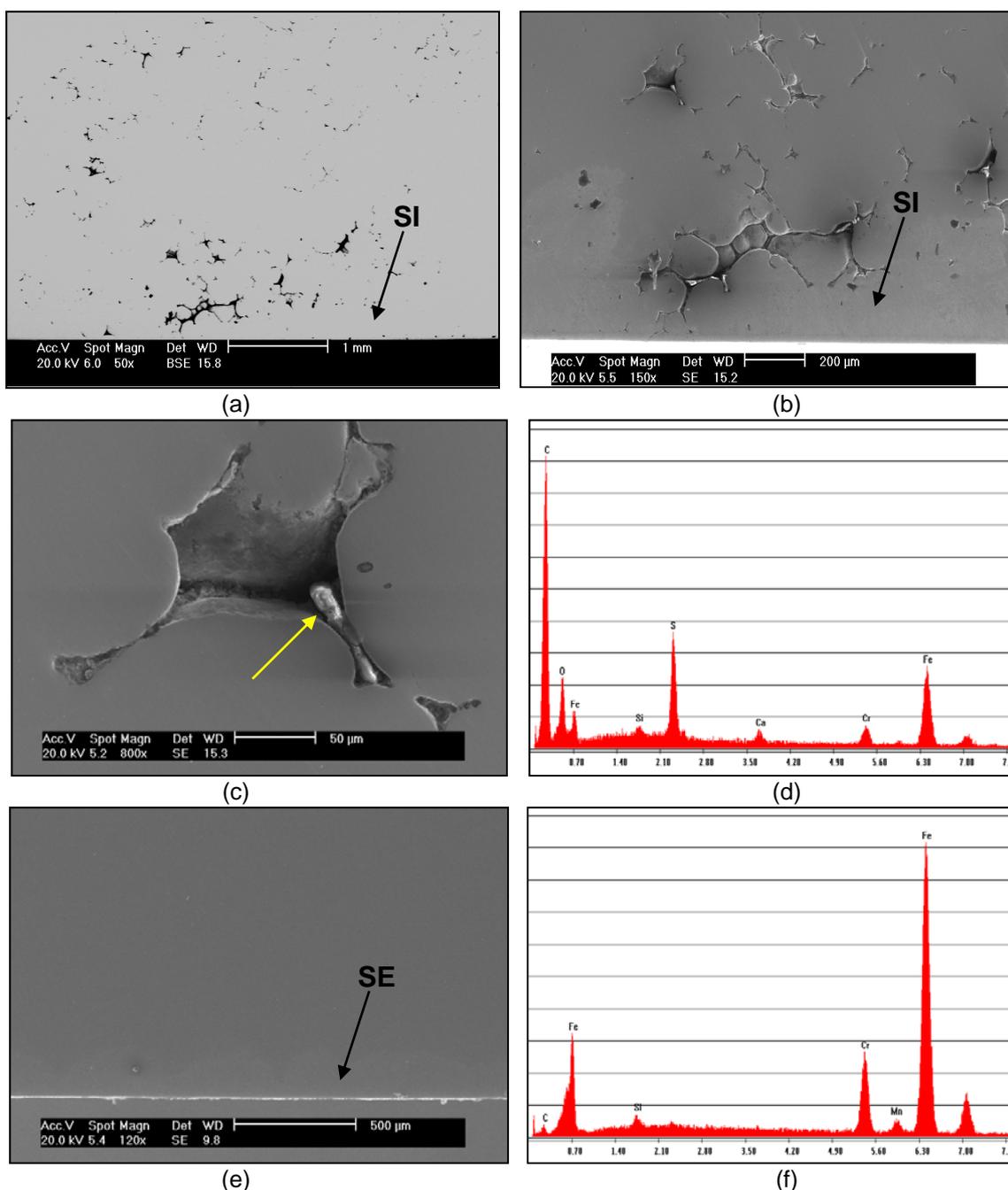
### 3 RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a peça de estudo e as macrografias das superfícies de fratura na seção transversal e axial do cilindro. A superfície interna do cilindro é assinalada pela seta A e a superfície externa é assinalada pela seta C, na Figura 2a. Observa-se que a fratura apresenta diferenças de morfologia e coloração. Perto da superfície interna do cilindro que trabalha em contato com a água de refrigeração (Figuras 2a e 2b) observam-se uma fratura de cor cinza fosco e algumas marcas de corrosão cor de laranja. Perto da superfície externa de trabalho a fratura apresenta-se não oxidada (Figura 2b), como mostrado na área delimitada da Figura 2c, indicativo de ocorrência de fratura frágil sem oxidação, ou seja, na temperatura ambiente. A região central da fratura, assinalada com a seta B na Figura 2b, é uma região que fraturou em temperatura elevada ou estava fraturada e oxidou durante serviço em uma das campanhas. Esta região apresenta coloração alaranjada e cinza escuro, característica do óxido de ferro formado a 400°C. Trata-se, portanto, de uma trinca pré-existente antes da falha catastrófica final, ocorrida ao término da campanha. A análise macrográfica da seção transversal do cilindro, na direção axial, foi feita após ataque com reagente Vilella e revelou uma estrutura com grãos finos nas superfícies externa e interna do cilindro (Figura 2d). Já o núcleo do cilindro (centro da Figura 2d) apresentou grãos colunares crescidos na direção radial durante a solidificação.



**Figura 2.** (a) e (b) Macrografias da fratura 2 na espessura da seção radial do cilindro. (c) Fratura perto da superfície externa. (d) Macrografia da seção transversal contendo a espessura do cilindro na direção axial.

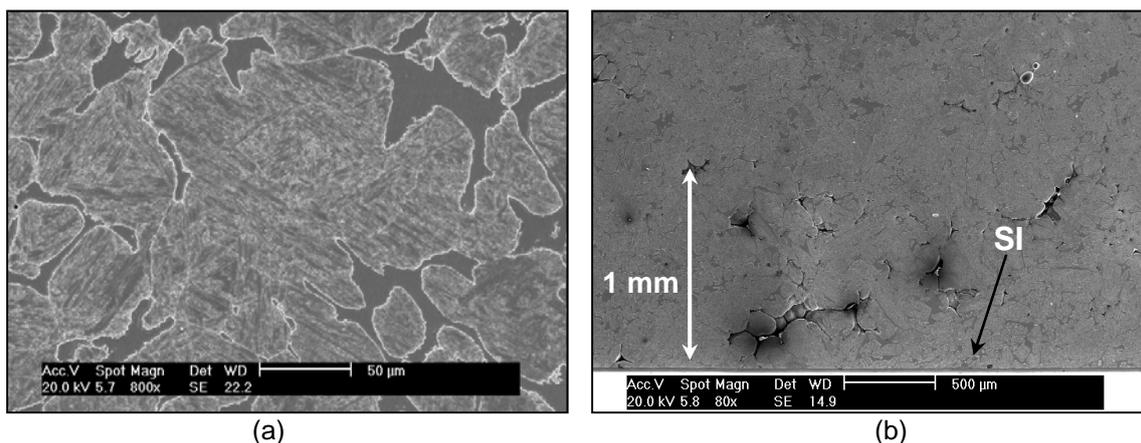
A análise da microestrutura do cilindro por MEV sem ataque é apresentada na Figura 3. Observa-se que a região próxima da superfície interna do cilindro centrifugado apresenta elevada quantidade de microporosidades. Observam-se braços de dendritas e vazios interdendríticos resultantes da contração de solidificação. Além disso, foram observados precipitados localizados nos contornos de grão (Figura 3c), identificados por EDS como carbonetos de ferro, carbonetos de cromo e sulfetos (Figura 3d). Perto da superfície externa do cilindro, superfície de trabalho, não foram observados vazios ou quaisquer outros tipos de defeitos (Figura 3e). A análise EDS de raios X da matriz resultou na composição química característica do aço AISI 410 (Figura 3f).



**Figura 3.** Micrografias sem ataque da seção transversal do cilindro na direção axial. (a) Visão global da distribuição das microchupagens usando (BSE) perto da superfície interna (SI). (b) Microchupagens perto da superfície interna. (c) e (d) Precipitados como carbonetos de ferro, carbonetos de cromo e sulfetos.

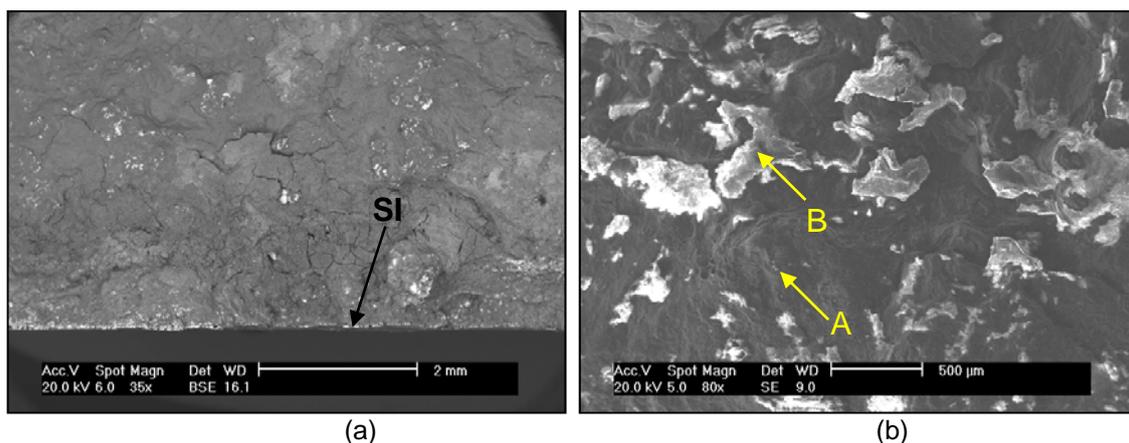
carbonetos de cromo e sulfetos localizados em contorno de grão ao longo de 1 mm a partir da superfície interna. (e) Micrografia perto da superfície externa (SE) do cilindro sem presença de microporosidades, chupagens ou inclusões. (f) Análise por EDS da composição do aço.

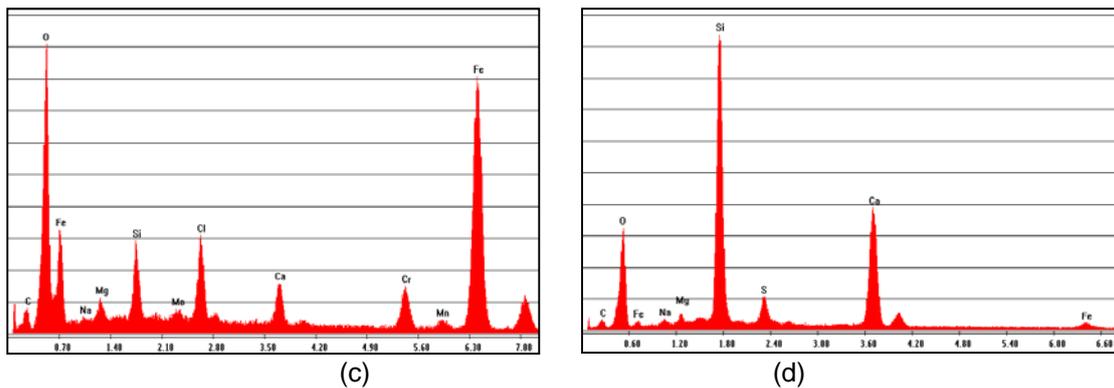
A observação da microestrutura após ataque com reagente Vilella mostrou que a microestrutura do aço é formada por dendritas de martensita e grãos de ferrita (Figura 4a). A fase ferrítica está em menor proporção e rodeia as dendritas de martensita. A microestrutura se apresentou com essas características em toda a espessura do cilindro. Observam-se, novamente, na Figura 4b, microchupagens até aproximadamente 2,0 mm de profundidade a partir da superfície interna.



**Figura 4.** Microestrutura da superfície transversal do cilindro na direção axial. (a) Microestrutura formada por dendritas de martensita que contornam a ferrita. (b) Microchupagem perto da superfície interna (SI).

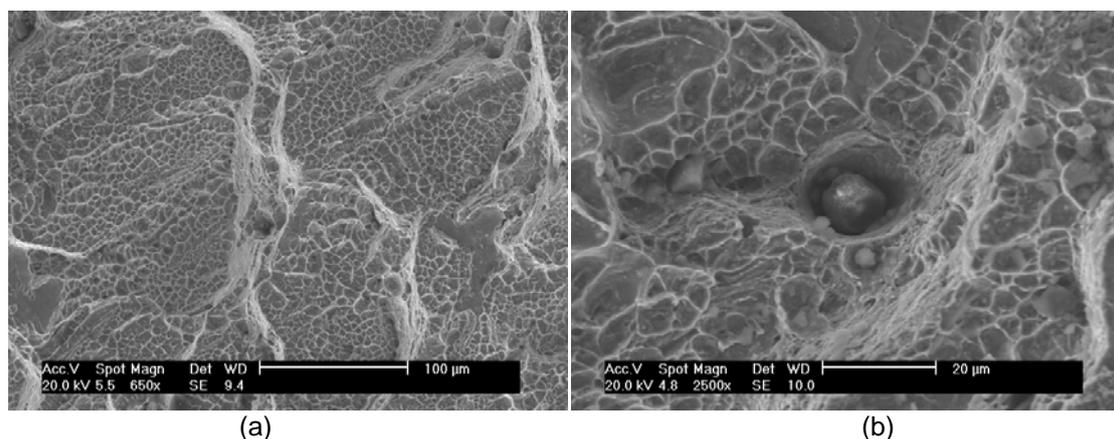
A limpeza da fratura por ultra-som não foi suficiente para evidenciar o tipo de fratura perto da superfície interna do cilindro, como mostrado nas Figuras 5a e 5b. A superfície ficou recoberta principalmente de óxido de ferro, cloro e cálcio (Figura 5c) na região sinalizada com a seta A na Figura 5b, e óxido de cálcio e sulfetos (Figura 5d) na região sinalizada com a seta B, na Figura 5b.





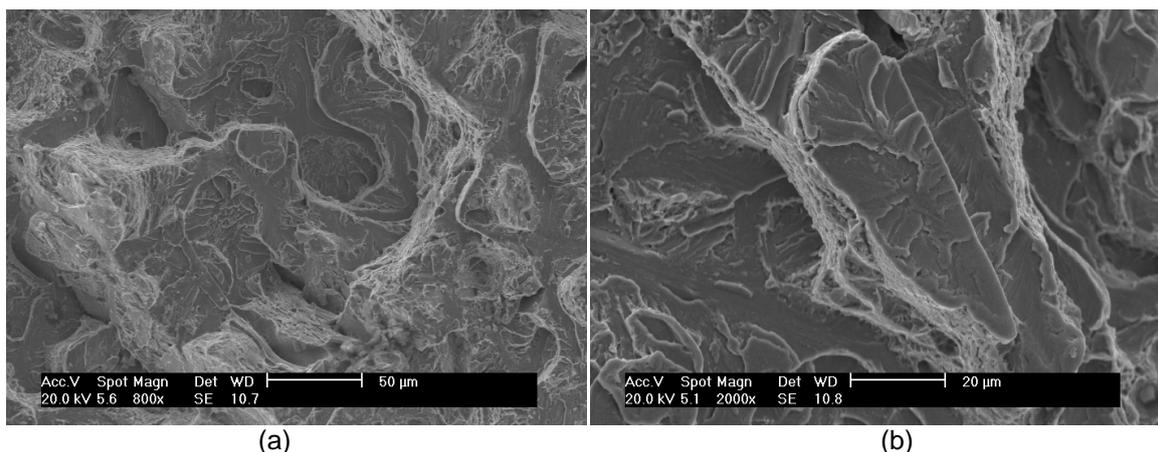
**Figura 5.** Micrografias da fratura radial do cilindro (Fratura 2) perto da superfície interna do cilindro, coberta por contaminantes. (a) Fratura perto da superfície interna (SI) BSE. (b) Fratura perto da superfície interna. (c) e (d) EDS das regiões indicadas com as setas A e B na Figura 5(b), respectivamente

Na análise da superfície de fratura no centro da espessura do cilindro, foram observados alvéolos (dimples) que evidenciam uma fratura por coalescimento de microcavidades, mecanismo de fratura dúctil ou fratura alveolar (Figura 6a). Alguns alvéolos apresentam inclusões não metálicas em seu interior (Figura 6b).



**Figura 6.** Micrografias da fratura radial (Fratura 2) do cilindro. (a) Alvéolos de fratura dúctil. (b) Inclusão no alvéolo.

A fratura perto da superfície externa do cilindro é uma fratura frágil, com aspecto típico de quase-clivagem (Figura 7).

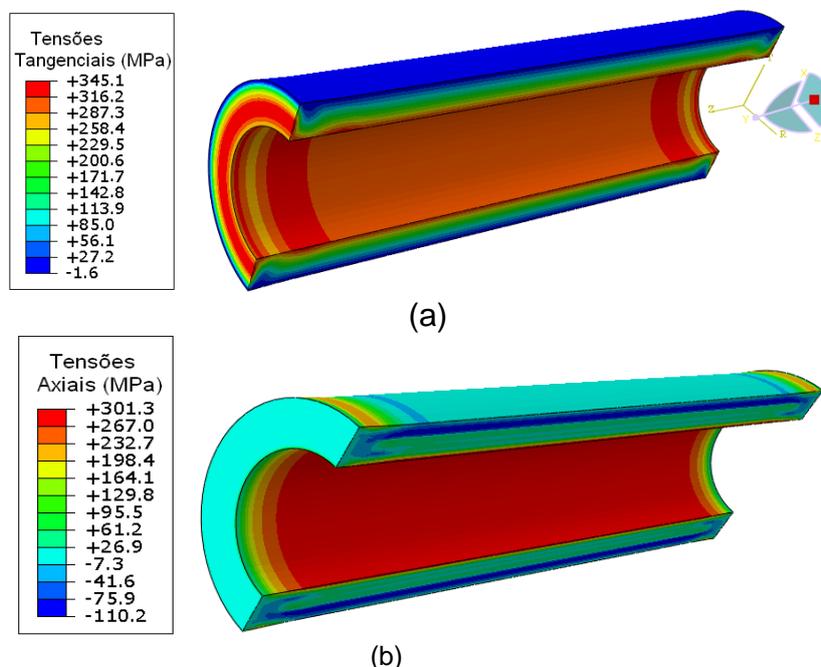


**Figura 7.** Micrografias da fratura radial (Fratura 2) do cilindro. (a) e (b) Fraturas por quase-clivagem perto da superfície externa do cilindro a 50 e 20  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

### 3.1 Análise das tensões residuais pelo método dos elementos finitos

#### 3.1.1 Tensões residuais devidas à transformação e aos gradientes de temperatura desenvolvidos na têmpera do cilindro

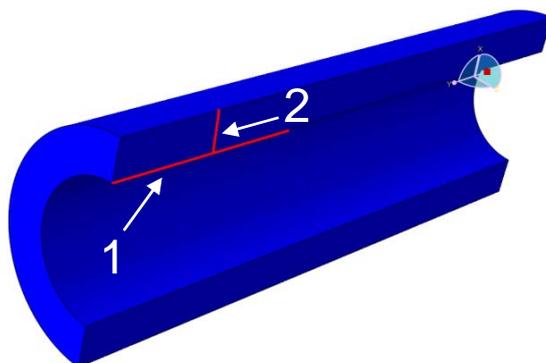
Para avaliar as tensões desenvolvidas ao final do tratamento térmico de têmpera, foi feita a simulação por elementos finitos envolvendo análise termomecânica acoplada com os efeitos das transformações de fase. As Figuras 8a e 8b apresentam os campos de tensões de von Mises resultantes nas direções tangencial (ou circunferencial) e axial, respectivamente, após têmpera ao ar a partir da temperatura de austenitização de  $1.050^{\circ}\text{C}$ . A tensão de tração recebe o sinal positivo ( $+\sigma$ ) e a de compressão recebe o sinal negativo ( $-\sigma$ ).



**Figura 8.** Distribuição das tensões residuais calculadas através do MEF para o cilindro de aço AISI 410, após têmpera. (a) Tangenciais (b) Axiais.

Para avaliação destes resultados, foram escolhidos dois caminhos de nós, um axial desde o topo do cilindro até o centro (caminho 1), ao longo da superfície interna, e

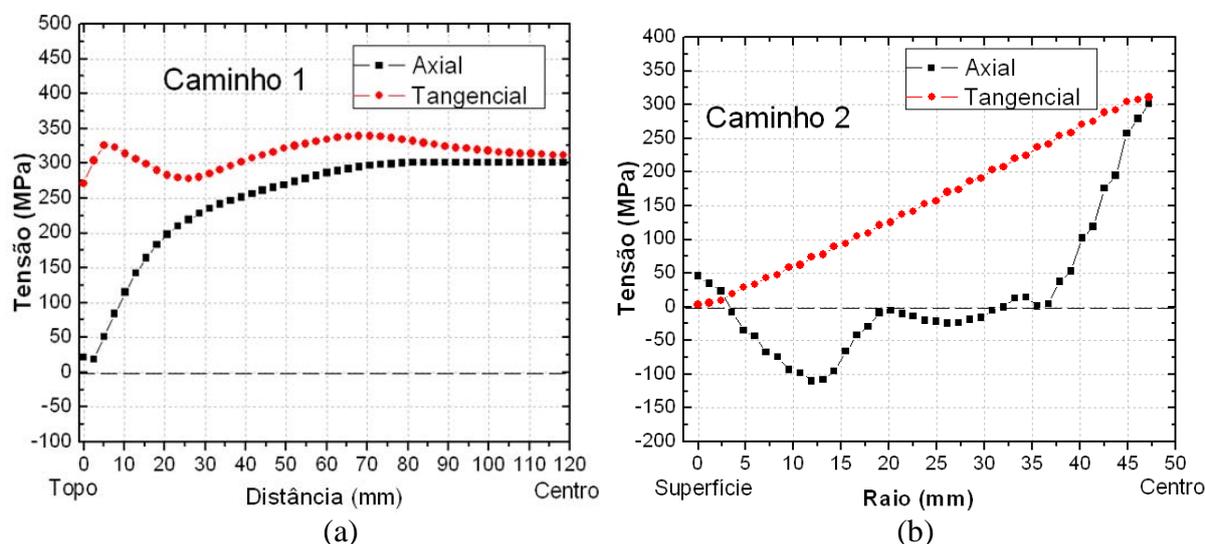
um outro desde a superfície externa até a parede interna, na altura de  $\frac{3}{4}$  do comprimento do cilindro, como mostrado na Figura 9.



**Figura 9.** Caminhos para determinação dos valores das tensões resultantes. Caminho de nós 1 na superfície interna do cilindro e o caminho de nós 2 na espessura do cilindro.

Os resultados das tensões axiais e tangenciais em cada caminho são apresentados na Figura 10. Os resultados do caminho na superfície interna do cilindro, Figura 10a, mostraram um estado predominantemente de tração na direção tangencial do cilindro, com valores na faixa de 270 a 340 MPa. Já na direção axial, houve um aumento da tensão ao longo do caminho com valores de 21 MPa no topo e de 300 MPa no centro do cilindro.

Os resultados da Figura 10b, avaliando o caminho de nós através da espessura do cilindro, mostram um estado predominantemente de tração na parte interna do cilindro, tanto na direção tangencial, como axial com valores de 311 e 300 MPa, respectivamente. Já na superfície do cilindro, nesse caminho, os resultados são de 5 MPa e 50 MPa nos sentidos tangencial e axial, respectivamente.



**Figura 10.** Resultados das tensões axiais e tangenciais, ao longo dos caminhos 1 e 2. (a) 1 – Na superfície interna do cilindro e (b) 2 – Na espessura do cilindro a  $\frac{3}{4}$  do raio do caminho 1.

### 3.1.2 Resultados da modelagem por elementos finitos do resfriamento do cilindro nas condições de trabalho

Na Figura 11, são apresentados os resultados das tensões térmicas em condições de trabalho durante o resfriamento, desenvolvidas a 600, 500 e 350°C. Estes resultados indicam que surgem tensões térmicas durante o resfriamento de tração na parte interna e de compressão na superfície externa do cilindro.

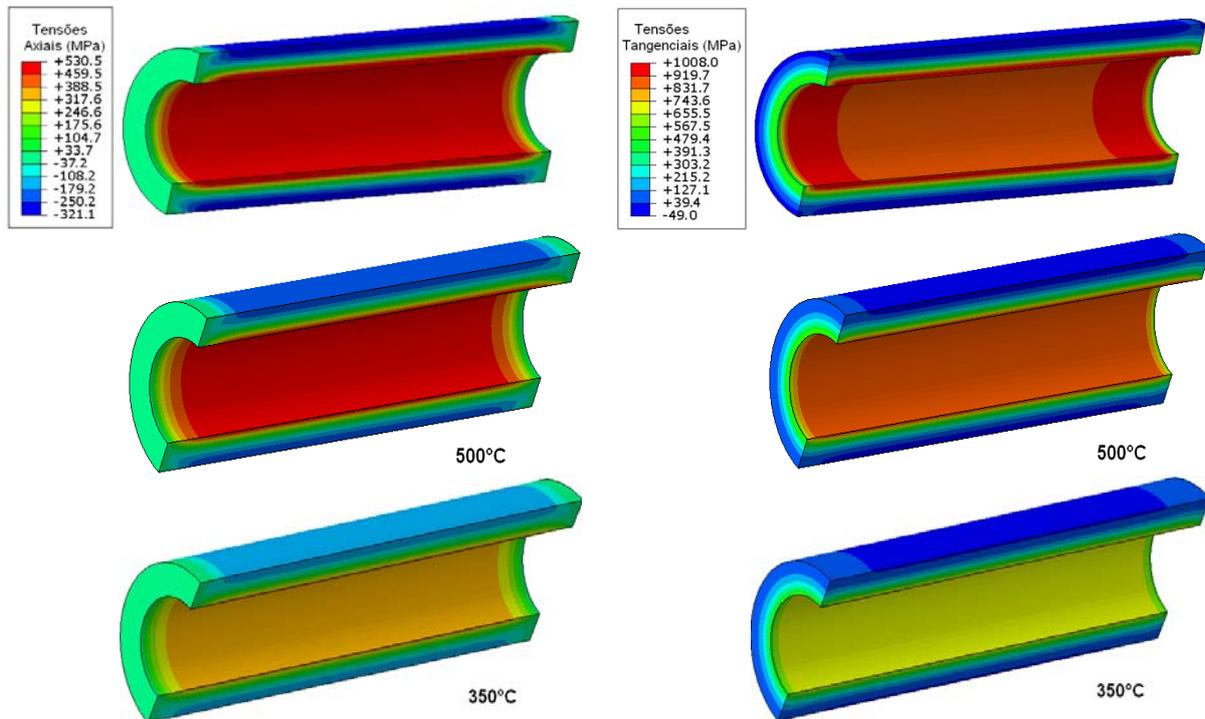


Figura 11. Tensões térmicas desenvolvidas durante o resfriamento do cilindro de laminação na direção axial (coluna esquerda) e tangencial (coluna direita) a 600, 500, e 350°C.

## 4 DISCUSSÃO

A fratura iniciou na superfície interna do cilindro (Figura 2b) e se propagou em temperaturas moderadas de trabalho até chegar a uma tensão crítica para fraturar subitamente próximo da superfície externa (Figura 2c). A fratura catastrófica é frágil e é caracterizada por apresentar quase-clivagem (Figura 7).

A presença de microrechupes perto da superfície interna do cilindro até uma profundidade de 1 mm a partir da superfície interna do cilindro (Figura 3b) ajudaram a concentrar as tensões no interior da peça, diminuindo a tenacidade e as propriedades mecânicas do material. As tensões residuais de tração desenvolvidas na superfície interna do cilindro, por tratamento térmico de têmpera ao ar e também durante resfriamento do cilindro em condições de serviço, associadas aos defeitos de fundição encontrados nessa região, possibilitaram o desenvolvimento de trincas, que cresceram em temperaturas moderadas durante uma ou mais campanhas de laminação.

A fratura apresentou regiões com diferentes colorações, devido à propagação em três estágios:

- Fratura nucleada no interior do cilindro. Esta fratura de cor mais clara assinalada com a seta A na Figura 2b, apresenta em algumas áreas (cavidades de microchupagem), corrosão e acúmulo de resíduos brancos,

com composição química típica de produtos utilizados no tratamento da água industrial. Estes resíduos não deixam exposta a topografia da fratura.

- Fratura no meio da espessura do cilindro (Figuras 2a e 2b). A propagação da fratura nesta região foi lenta, tendo ocorrido oxidação durante serviço em uma das campanhas. Esta região apresenta coloração alaranjada e cinza escuro, produzido pelo óxido de ferro a 400°C. A morfologia é do tipo alveolar típica de fratura dúctil.
- Fratura perto da superfície externa do cilindro (Figura 2c). Este foi o último estágio da fratura catastrófica. Não se apresenta corroída já que fraturou pouco tempo depois da retirada do cilindro laminador.

É importante ressaltar que o tempo de austenitização do cilindro não foi suficiente para solubilizar os precipitados e/ou a taxa de resfriamento não foi o suficientemente rápida para evitar a formação dos carbonetos no contorno de grão. Além disso, a austenitização feita em condições não apropriadas resultou na presença de ferrita na estrutura martensítica do aço inoxidável.

Cabe notar que a superfície interna do cilindro apresentava corrosão superficial e deposição de produtos de tratamento da água de refrigeração. A presença desses depósitos pode ter diminuído a transferência de calor do aço para a água. Além disso, o fluxo de água no interior do cilindro também pode ter sido insuficiente para retirar o calor, prejudicando o controle da temperatura de trabalho.

Os resultados das tensões residuais devidas à transformação e aos gradientes de temperatura desenvolvidos na têmpera do cilindro, apresentados na Figura 10, mostraram que as tensões axiais e tangenciais são de tração na parte interna e de compressão ou quase nulas na superfície externa do cilindro.

## 5 CONCLUSÕES

- A superfície interna contém microrechupes concentradores de tensão.
- A superfície interna do cilindro oco está submetida a tensões residuais de tração, produzidas tanto pelo tratamento térmico de têmpera ao ar, quanto pelo resfriamento em condições de serviço.
- A presença de tensões residuais de tração associada à presença de microrechupes na região da superfície interna do cilindro oco, levou à nucleação de trincas devidas ao choque térmico.
- A trinca foi nucleada na superfície interna do cilindro de laminação, em contato com a água de refrigeração e se propagou em três etapas na direção radial no sentido da superfície externa. Ao final da sexta campanha de laminação o cilindro rompeu catastroficamente sob efeito de tensões residuais, desenvolvidas durante resfriamento.
- A temperatura de austenitização e a velocidade de resfriamento não foram adequadas para evitar a presença de precipitados e de ferrita nos contornos das dendritas de martensita.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo auxílio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 SEDIGHI, M., SALEK, M. Modeling and experimental study of quenching process for AISI 4340 aeronautical steel under different cooling conditions. **Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering**, v. 32, n.1, p. 1-8, jan. 2008.
- 2 ECKEL, B. Thinking in Java. 4 ed. Prentice Hall, 2006.
- 3 NORTHOVER, S.; WILSON, M. SWT: The Standard Widget Toolkit. Addison-Wesley Professional, v. 1. 2004.
- 4 SCHRÖDER, R. Influences on development of thermal and residual stresses in quenched steel cylinders of different dimensions. **Materials Science and Technology**, v. 1, n. 10, p. 754-764, out.1985.
- 5 PIETZSCH, R.; BRZOZA, M.; KAYMAK, Y.; SPECHT, E. Simulation of the Distortion of Long Steel Profiles during Cooling. **Journal of Applied Mechanics**. ASME, v. 74, p. 427-437, may. 2007.