

ANÁLISE DE FALHA EM UM SEGMENTO DE MANDRIL DE BOBINADEIRA DE LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE¹

Árysson Penna de Alcântara²
Sara Silva Ferreira de Dafé³
André Barros Cota⁴
Leonardo Barbosa Godefroid⁴

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a análise de falha em um segmento de mandril de bobinadeira de um laminador de tiras a quente. A análise de falha compreendeu as seguintes etapas: caracterização do problema, ensaios não-destrutivos, análise química, análise microestrutural, ensaio de dureza e análise fractográfica. Chegou-se à conclusão que o aço utilizado sofreu fadiga térmica durante a operação do equipamento.

Palavras-chave: Análise de falhas; Fadiga térmica; Mandril; Bobinadeira.

FAILURE ANALYSIS OF A MANDREL SEGMENT USED IN A HOT STRIP MILL

Abstract

This paper presents a failure analysis methodology to characterize a failure (root causes) of a mandrel segment used in a hot strip mill. The basic steps adopted were: background data about the performance of the equipment, visual examination of the failure area to determine the origin of the failure, non-destructive tests, chemical analysis of the mandrel fractured and comparison with standards, metallographic examination to evaluate microstructural features, microhardness testing to identify the presence of residual stresses, and fractographic examination to determine the failure mode. The mandrel failed by thermal fatigue.

Key words: Failure analysis; Thermal fatigue; Mandrel; Coiler.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Engenheiro Mecânico da ArcelorMittal Tubarão, mestrando da REDEMAT/UFOP.*

³ *Aluna de graduação em física, UFOP, Ouro Preto/MG.*

⁴ *Membro da ABM, Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT/UFOP, Ouro Preto/MG.*

1 INTRODUÇÃO

A fratura de um componente estrutural geralmente é considerada um acontecimento indesejável, uma vez que ela coloca em risco vidas humanas e provoca a perda de materiais e perda de tempo (\$\$). A história da engenharia está repleta de exemplos catastróficos, em que o projeto mal feito, a seleção indevida de materiais, ou a operação inadequada do equipamento levaram a uma falha estrutural, com consequentes mortes e avarias diversas.

As razões principais para se conduzir uma análise de falhas consistem na determinação e na descrição dos fatores responsáveis para a falha do componente estrutural ou da própria estrutura. Esta determinação pode ser motivada tanto pela prática de engenharia como por considerações de ordem legal.

Neste contexto, surgem as diversas técnicas de previsão do comportamento mecânico dos materiais e de análise de possíveis falhas estruturais. Seja numa etapa preventiva ou posterior ao processo de falha, torna-se imperativo o conhecimento acerca da resistência dos materiais à fratura, para que a sua aplicação estrutural esteja segura contra este fenômeno. Esta resistência à fratura deve ser, portanto, convenientemente avaliada através de ensaios mecânicos que forneçam propriedades relacionadas com a degradação dos materiais. O tipo de fratura do material em questão deve ser caracterizado, através de técnicas padronizadas de análise macroscópica e fractográfica. A detecção de prováveis danos superficiais e/ou internos do material deve ser buscada a partir de ensaios não destrutivos.

De uma maneira geral, existe uma metodologia padrão que é adotada para se conduzir uma análise de falha. Trata-se de uma sequência de procedimentos, que deve ser aplicada para se entender as causas da falha do componente estrutural, de tal sorte a propiciar a confecção de um laudo técnico sobre a questão. Nesta metodologia podem ser destacadas as seguintes etapas:^[1]

- a) História prévia, compreendendo tanto a fabricação quanto a utilização do material;
- b) Seleção e limpeza de partes a serem analisadas;
- c) Ensaios não destrutivos, incluindo análise macroscópica, ensaio de dureza e análise química;
- d) Ensaios destrutivos, incluindo microscopia e ensaios mecânicos;
- e) Análise de resultados e confecção de um relatório, com conclusões e recomendações.

O presente trabalho apresenta a análise de falha realizada em um segmento de mandril de uma bobinadeira do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão. Segundo informações da empresa, este equipamento fraturou-se após cerca de 18 meses de operação, após o aparecimento de uma malha de trincas na superfície do segmento. Este tempo corresponde a cerca de 65% da vida útil de um mandril antes de reparo, de acordo com informações do fornecedor.

2 FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

O laminador de tiras a quente da empresa é composto de duas bobinadeiras. Ambas são localizadas abaixo da linha de rolos e possuem (cada) um conjunto de rolos puxadores, três rolos abraçadores e um mandril de bobinamento composto por quatro segmentos. As Figuras 1 e 2 ilustram esquematicamente este sistema. À medida que a tira se aproxima das bobinadeiras, ela é centrada e guiada por guias

laterais ajustáveis, sendo conduzida através da mesa de rolos até o enrolamento no mandril. Normalmente, durante a laminação, trabalha-se com ambas bobinadeiras, revezando-as operacionalmente com o intuito de garantir maior produtividade e conferir desgaste igualmente distribuído. O mandril da bobinadeira é o equipamento onde a bobina será enrolada em torno de si, formando-se o diâmetro interno das bobinas a quente. Esse equipamento trabalha com a velocidade de giro média de cinco a oito por cento superior à velocidade da tira, estabelecendo a tensão de bobinamento. Essa tensão é importante para evitar os espaços entre as espiras, minimizando/impossibilitando a origem de defeitos de bobinamento. O mandril encontra-se retraído ao receber a tira, e é expandido após a formação das primeiras espiras sobre ele. Essa seqüência de movimentos auxilia o controle da tensão de bobinamento.

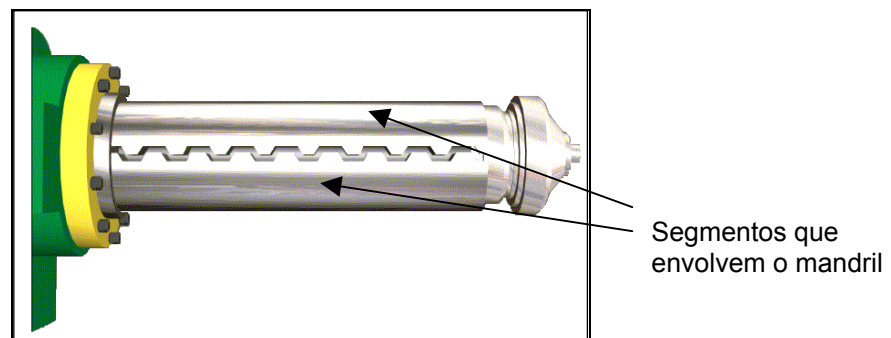


Figura 1: Representação esquemática do mandril e seus segmentos.

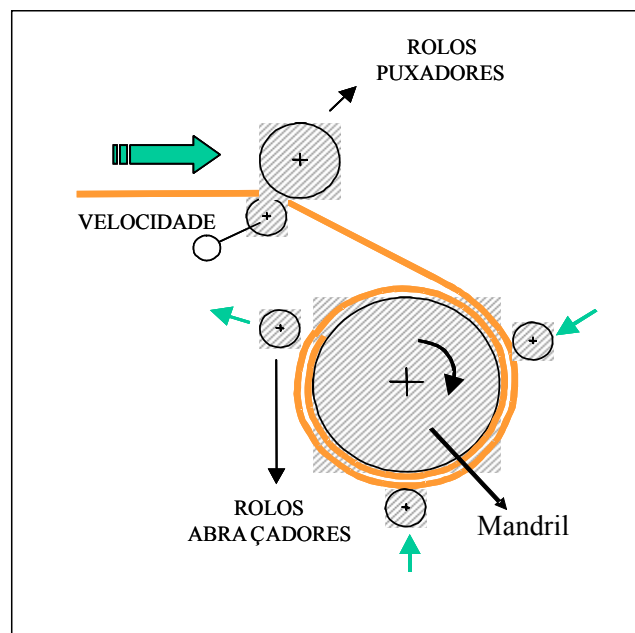


Figura 2: Vista esquemática do funcionamento da bobinadeira.

Os quatro segmentos do mandril da bobinadeira são as peças que envolvem o miolo do mandril, sendo as peças que mantêm o contato com a tira durante todo o bobinamento. Essas peças são de aço inoxidável, de acordo com a norma DIN 17240 para o aço 22CrMoV12, submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.^[2] Devido aos segmentos serem a parte externa do mandril, essas peças ficam expostas a condições adversas, como impacto, atrito, bem como à ciclagem térmica. Como a velocidade média da tira ao iniciar o processo de

bobinamento é de 1.500 rpm e as bobinas têm peso médio de 25 t, o impacto que o segmento recebe é muito elevado. Outro fator agravante para a vida útil dos segmentos é a ciclagem térmica. Em média, a cada cinco minutos uma tira é bobinada. Como a temperatura de bobinamento dessas tiras, em função do *mix* de produção, varia entre 150 ~ 700°C, é inevitável que a elevação e a queda de temperatura sejam transmitidas para os segmentos.

3 ANÁLISE MACROSCÓPICA E ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

A Figura 3(a,b) ilustra o segmento do mandril fraturado, após um ensaio não-destrutivo de líquidos penetrantes. Pode-se perceber uma extensa malha de trincas superficiais na parte central do segmento e próxima à fratura. Para se ter uma idéia da densidade de trincas presente nesta malha, foi feita uma contagem numa área de 40x40mm, próxima à região da fratura. Foram contadas 31 trincas longitudinais e 12 trincas transversais, no sentido da maior dimensão do segmento.

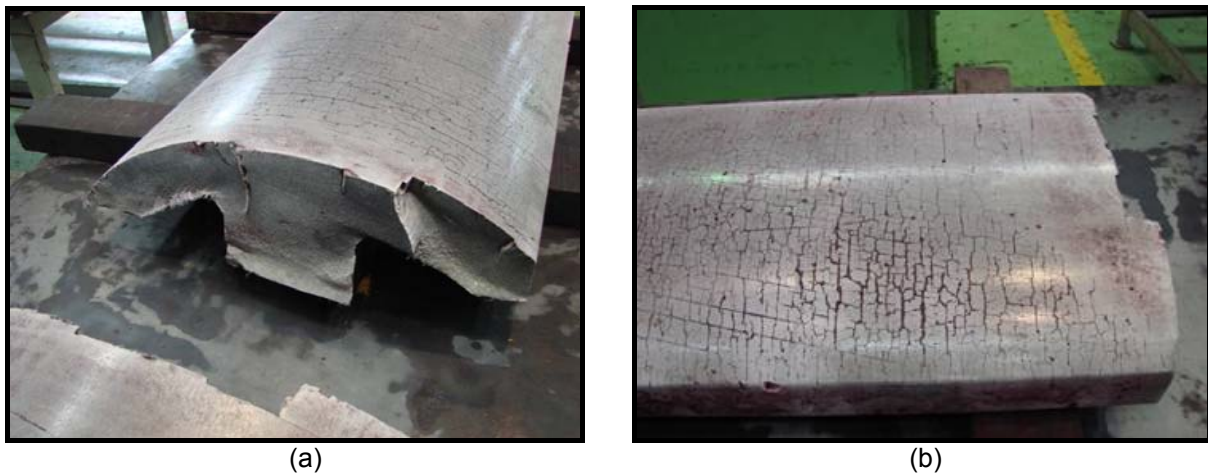


Figura 3: Malha de trincas próxima à região de fratura do segmento do mandril.

Para evidenciar a penetração das trincas ao longo da espessura do segmento, foi realizado um ensaio não-destrutivo de ultra-som. Detectaram-se descontinuidades distribuídas numa profundidade de até 22 mm da superfície de trabalho. A Figura 4 apresenta esta distribuição.

A análise macrofratográfica foi realizada com uma máquina fotográfica digital, modelo CANON, de 8,0 megapixels. A Figura 5(a,b) ilustra uma região da fratura. Pode-se observar o início de um trincamento típico de degradação por fadiga(fratura plana, marcas radiais, marcas de praia). A Figura 6 é uma fotografia tirada em um plano imediatamente abaixo da região de fratura, confirmando que as trincas que se formam na superfície do segmento crescem ao longo de sua espessura.

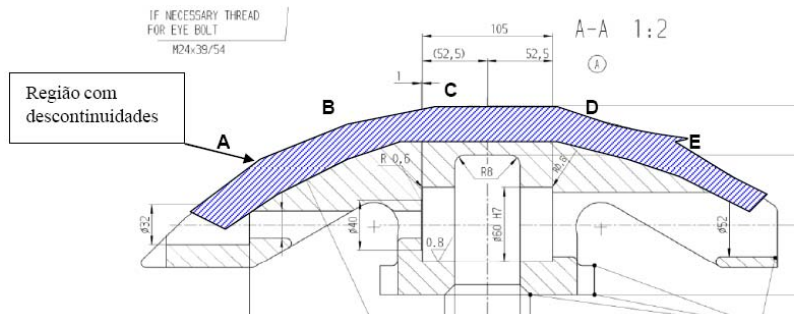


Fig. 01 – Corte transversal do mandril, em destaque a região afetada

Tab. 01 – Descontinuidades detectadas em algumas regiões

Ponto	A	B	C	D	E
Profundidade da descontinuidade	18	22	21	15	12

Figura 4: Distribuição de trincas segundo a profundidade no segmento do mandril.



(a)



(b)

Figura 5: Detalhe da iniciação (a) e da propagação (b) de trinca na fratura do segmento do mandril. As setas indicam o sentido de trincamento.



Figura 6: Seção imediatamente abaixo da fratura, mostrando a malha de trincas, com profundidade.

4 ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 1 apresenta a composição química do material utilizado na confecção do segmento do mandril. A análise foi realizada em um espectrômetro de plasma. A Tabela 2 mostra a composição química do aço especificado para esta aplicação. A comparação entre as duas tabelas permite concluir que o aço em questão atendeu a especificação, a menos de um teor um pouco mais baixo de vanádio.

Tabela 1: Composição química do aço do segmento do mandril (% em peso).

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Ti	P	S
0,186	0,67	0,33	0,67	11,2	0,83	0,18	0,008	0,022	0,001

Tabela 2: Composição química típica de um aço DIN 1740 22CrMoV12 (% em peso).

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Pmax	Smax
0,18- 0,24	0,30- 0,80	0,10- 0,50	0,30- 0,80	11,0- 12,5	0,80- 1,20	0,25- 0,35	0,035	0,035

5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Amostras para análise metalográfica foram preparadas para caracterização microestrutural do aço empregado no segmento do mandril, o tipo de tratamento térmico empregado e a presença de precipitados. A análise foi realizada em uma região paralela à superfície de fratura do segmento.

As amostras metalográficas foram submetidas ao procedimento padrão de desbaste, lixamento, polimento, ataque e observação através do microscópio ótico. Os reativos utilizados foram de Vilella e de Murakami. A metalografia foi realizada através da utilização de um microscópio ótico, marca LEICA, com analisador de imagens QWIN. A Figura 7(a,b) ilustra a microestrutura do aço e a distribuição de precipitados.

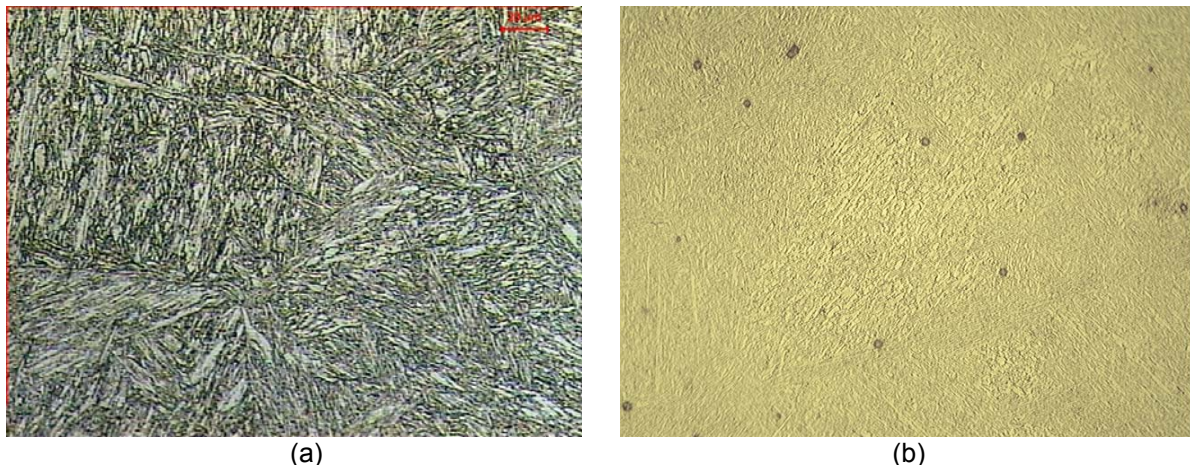


Figura 7: Microestrutura do aço do segmento do mandril, microscópio ótico. (a) Reativo de Vilella, 500X, estrutura de martensita revenida; (b) Reativo de Murakami, 400X, precipitados.

Com relação à microestrutura, realizou-se uma difração de raios-X, para identificação de fases. Trata-se de martensita revenida, sem presença de austenita residual. Esta microestrutura está presente em todo o segmento, e atende a especificação para o mandril. Sobre os precipitados, eles estão distribuídos de forma homogênea na microestrutura. Acredita-se que são do tipo $M_{23}C_6$, pois estes carbonetos são típicos de aços com teores de Cr entre 9% e 12% e possuem alta

estabilidade térmica, o que aumenta a resistência a elevadas temperaturas do material em estudo.

6 PERFIL DE MICRODUREZA

A Figura 8 apresenta dois perfis de microdureza, obtidos ao longo da espessura do segmento do mandril, próximo e mais afastado da região de fratura. Estes perfis foram obtidos a partir da utilização de um aparelho de microdureza Vickers, modelo Wolpert, com carga de 50g. Os valores de dureza são relativamente baixos, ligados ao tipo de tratamento térmico realizado. A diferença de dureza entre as duas regiões pode indicar a presença de um pequeno gradiente de tensões internas.

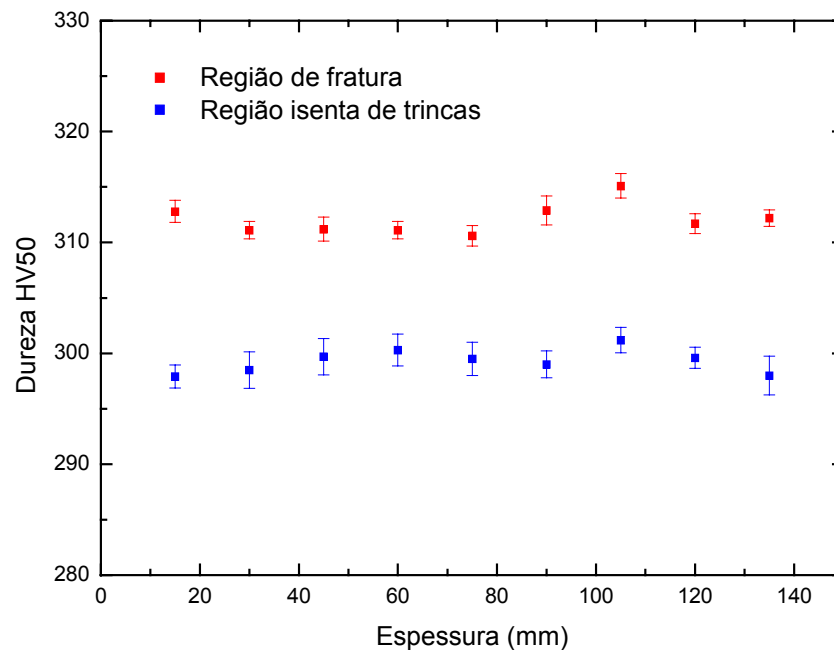


Figura 8: Perfis de microdureza ao longo da espessura do segmento do mandril.

7 ANÁLISE MICROFRATOGRAFICA

A análise microfratográfica foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura - MEV, modelo JEOL JSM 5510.

A Figura 9(a,b,c) apresenta microfratografias de algumas regiões da fratura do segmento do mandril. Confirmou-se a análise macrofratográfica, mostrando que o processo de trincamento do aço foi por fadiga, iniciando na malha de trincas externa e propagando ao longo de sua espessura.

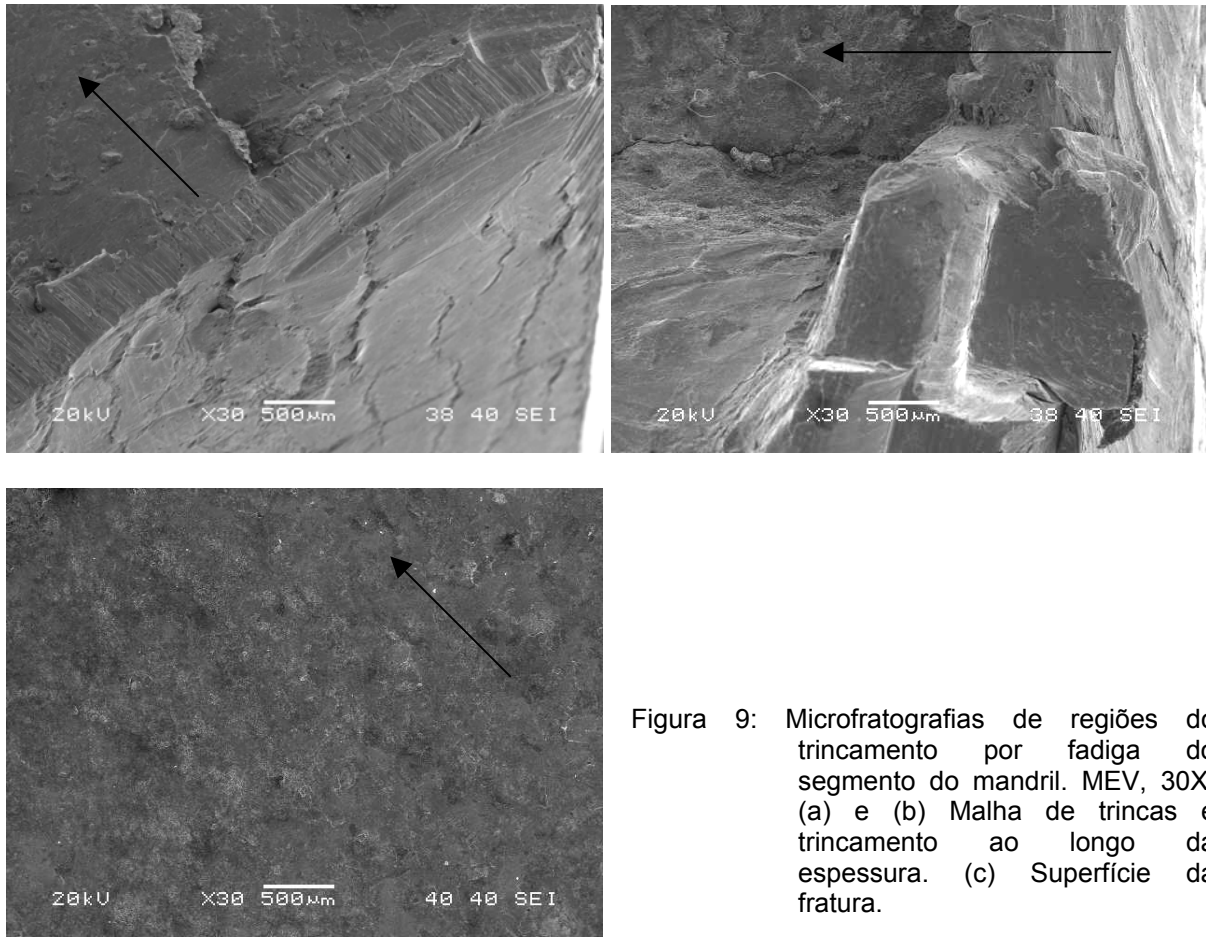


Figura 9: Microfratografias de regiões do trincamento por fadiga do segmento do mandril. MEV, 30X. (a) e (b) Malha de trincas e trincamento ao longo da espessura. (c) Superfície da fratura.

8 DISCUSSÃO

Pela análise fratográfica realizada no segmento do mandril, pode-se verificar que o trincamento ocorreu por fadiga. Por outro lado, considerando as características de funcionamento do equipamento, esta degradação por fadiga foi associada à ciclagem térmica, daí a conclusão de que o fenômeno atuante foi fadiga térmica.^[3] Uma outra característica para corroborar esta conclusão é a presença da malha de trincas na superfície do segmento: o trincamento por fadiga térmica é identificado por uma malha de trincas, sendo que a fadiga mecânica não gera esta malha em elevadas temperaturas.^[4]

Os aços inoxidáveis apresentam um coeficiente de expansão térmica relativamente elevado, e uma condutividade térmica relativamente baixa.^[5] Estas propriedades conferem a esta classe de aços uma baixa resistência à fadiga térmica. Desta forma, a escolha adequada de composição química e de tratamento térmico, aliados a um eficaz sistema de refrigeração do sistema, são aspectos importantes a serem considerados no projeto do segmento do mandril.

Recomendou-se à empresa uma análise mais aprofundada de propriedades mecânicas do aço empregado, como obtenção da tenacidade à fratura e da resistência ao trincamento por fadiga, nas temperaturas ambiente e de serviço, e comparação com outros materiais.

9 CONCLUSÕES

A partir da análise de falha realizada, podem ser enumeradas as seguintes conclusões:

- 1) O aço em questão atendeu a especificação em termos de composição química, a menos do teor mais baixo do elemento vanádio.
- 2) Sua microestrutura indicou a presença de martensita revenida, sem austenita retida, com precipitação de carbonetos homogeneamente distribuídos.
- 3) O perfil de microdureza indicou diferença ao longo da espessura do componente, sugerindo a presença de um pequeno gradiente de tensões residuais.
- 4) As características da fratura e o tipo de funcionamento do componente levam à conclusão de que o fenômeno de degradação foi fadiga térmica.

REFERÊNCIAS

- 1 Cândido, L.C.; Godefroid, L.B.; Morais, W.A.; *Análise de Falhas*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, São Paulo, 2006.
- 2 *Deutsches Institut für Normung. DIN 17 240* – Heat resisting and highly heat resisting materials for bolts and nuts: Quality specifications. July, 1976.
- 3 *Metals Handbook, Volume XI – Failure Analysis and Prevention*, American Society for Materials, 10th Edition, 1990.
- 4 Colangelo, V.J., Heiser, F.A.: *Analysis of Metallurgical Failures*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1987.
- 5 Callister, W.D.: *Materials Science and Engineering, an Introduction*, John Wiley & Sons, 4th Edition, 1997.