

ESTUDO DA FADIGA TERMO-MECÂNICA EM UM AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO DA SÉRIE X22¹

Árysson Penna de Alcântara²
Leonardo Barbosa Godefroid³
André Barros Cota³

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a análise de falha e a caracterização microestrutural e comportamental de um aço empregado em segmentos de mandril de bobinadeira de um laminador de tiras a quente. A análise de falhas envolveu os procedimentos convencionais para avaliação das causas de fratura do componente estrutural, notadamente análise macroscópica e microfratográfica da fratura, assim como a verificação das especificações para o aço. A caracterização microestrutural foi realizada por microscopia ótica e difratometria de raios-X. A avaliação comportamental envolveu ensaios de tenacidade à fratura (integral J e curva de resistência), ensaios de crescimento de trinca por fadiga, e uma tentativa de simulação de comportamento real do aço, através de ensaios com aplicação de ciclos térmicos. O processo de degradação do material foi caracterizado como sendo de fadiga térmica.

Palavras-chave: Integral J; Crescimento de trinca por fadiga; Fadiga térmica; Mandril.

MARTENSITIC STAINLESS STEEL X22 THERMO-MECHANICAL FATIGUE STUDY

Abstract

This paper had as objective the analysis of failure and microstructural characterization and behavioral of a steel used in coiler mandrel segments of hot strip mill. The failures analysis involved the conventional procedures for evaluation of fracture causes of the structural component, especially macroscopic and microscopic analysis of the fracture and the verification of steel specifications. The microstructural characterization was done by optical microscopy and X-ray diffraction. The behavioral evaluation involved tests of fracture toughness (J integral and resistance curve), tests of crack growth by fatigue, and an attempt to simulate the actual behavior of steel, through tests with application of thermal cycles. The material degradation process was characterized as being of thermal fatigue.

Keywords: J integral; Fatigue crack growth; Thermal fatigue; Mandrel.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico da ArcelorMittal Tubarão, M.Sc. Redemat/UFOP.

³ Membro da ABM, Professor, M.Sc., D.Sc., Redemat/UFOP, Ouro Preto/MG.

1 INTRODUÇÃO

As condições inerentes ao processo de produção de tiras laminadas a quente, tais como a alta velocidade de processamento, os fortes impactos entre a tira e os equipamentos e as altas temperaturas de trabalho⁽¹⁻⁴⁾ são fatores que podem propiciar falhas prematuras dos componentes. Dentre essas falhas, destaca-se a formação de trinca na superfície do segmento do mandril da bobinadeira do LTQ da ArcelorMittal Tubarão.

O laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão, inaugurado em agosto de 2002, permite a obtenção de produtos denominados como bobinas a quente (BQ's), que atendem as tolerâncias mais restritivas do mercado, seja a espessura (1,20 mm a 19,00 mm) ou a largura (700 mm a 1.880 mm).⁽¹⁻⁴⁾ Este laminador é composto de duas bobinadeiras, ambas 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. O mandril da bobinadeira é o equipamento onde a bobina é enrolada em torno de si, formando-se o diâmetro interno das bobinas a quente.^(1,4-6) O intervalo de tempo entre os bobinamentos faz com que o mandril da bobinadeira esteja constantemente submetido a uma ciclagem térmica, influenciada pelas altas temperaturas em que as bobinas são bobinadas e pelo resfriamento após a extração das BQ's.

Os quatro segmentos do mandril da bobinadeira são de aço inoxidável, de acordo com a norma DIN 17240 para o aço 22CrMoV12, submetidos aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.⁽⁷⁾ Os segmentos são a parte externa do mandril que ficam expostas a condições adversas.

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. O segmento fraturou-se após 18 meses de operação, aliado ao aparecimento de uma malha de trincas na superfície do segmento. Este tempo corresponde a 65% da vida útil de um mandril antes de reparo, de acordo com informações do fornecedor.

Especificamente, esse estudo visou:

- identificar o mecanismo de fratura encontrado neste material;
- avaliar a microestrutura e o comportamento mecânico do material, através de ensaios de tenacidade à fratura e de crescimento de trinca por fadiga; e
- simular o comportamento real do material, através de ensaios de fadiga térmica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química do material do mandril foi medida por espectrometria de plasma e está listada na Tabela 1. A Tabela 2 mostra a composição química do aço especificado pela norma DIN 17240⁽⁷⁾ para esta aplicação.

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

Nesse trabalho foi adotada uma metodologia padrão que, normalmente, é utilizada para se conduzir uma análise de falha. Ou seja, levou-se em consideração uma sequência de procedimentos, visando a conhecer as causas da falha catastrófica. Nessa metodologia destacam-se as seguintes etapas:⁽⁸⁾

- I. Histórico, compreendendo tanto o princípio de funcionamento do equipamento denominado de bobinadeira, quanto algumas propriedades do aço em questão;
- II. Seleção e limpeza de partes a serem analisadas;
- III. Ensaios não destrutivos, incluindo análise macroscópica, ultra-som, líquido penetrante e análise química;
- IV. Ensaios destrutivos, incluindo microscopia e ensaios mecânicos;
- V. Ensaios de resistência ao trincamento (tenacidade à fratura e Integral J);
- VI. Simulação de fadiga térmica;
- VII. Medição do perfil térmico aplicado ao mandril e da malha de trinca formada na superfície do mandril.

2.1 Análise Macroscópica e Ensaios Não-Destrutivos

Para a realização dos diversos ensaios foram utilizadas amostras retiradas do segmento do mandril da bobinadeira, após estar submetido a ciclos térmicos durante a operação de bobinamento e sofrido fratura catastrófica. Foram retiradas amostras em três regiões distintas, conforme a Figura 1, sendo: região isenta de trinca (ensaios de análise química, tração, impacto, microscopia e ultra-som); região próxima à superfície de fratura (ensaios de microscopia, ultra-som, tração e impacto); região denominada de “cabeça” do segmento (ensaios de fadiga térmica, tenacidade à fratura e crescimento de trinca por fadiga).



Figura 1: Regiões do mandril onde foram retiradas as amostras.

2.1.1 Ensaio de líquido penetrante

Foi realizado nas duas partes fraturadas do segmento do mandril. Etapas: - limpeza da superfície do segmento com o removedor E 59; - aplicação do líquido penetrante VP-31 por 12 minutos; - limpeza superficial do excesso do líquido avermelhado; - aplicação do revelador D 70; - medição de malha de trinca na superfície do mandril, em uma região muito próxima à região de fratura, na superfície de contato tira-mandril, no centro da largura, em uma região de 40x40mm.

2.1.2 Ensaio de ultra-som

Utilizado para avaliar a profundidade das malhas de trincas e possíveis trincas/descontinuidades sub-superficiais existentes nos segmentos do mandril. Foram feitos ensaios de ultra-som em uma amostra retirada em região isenta de trabalho e em outra região próxima à fratura, utilizando um cabeçote do tipo USM-35, aplicando um ângulo de 0° . O transdutor utilizado foi do tipo MSEB-4HB B4SN e a metodologia adotada foi a pulso-eco.

2.1.3 Análise fractográfica

Para a realização desse ensaio utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JEOL JSM-5510 da Escola de Minas da UFOP, através do qual se analisaram as diferentes superfícies de fratura da região fraturada do mandril, bem como dos corpos-de-prova ensaiados.

2.1.4 Microscopia

As amostras foram avaliadas por microscopia ótica (ataque químico com reativo Vilella) e eletrônica de varredura, com o objetivo de identificar as principais fases presentes e caracterizar as superfícies de fratura das amostras após os ensaios. Os ensaios foram realizados nos laboratórios da UFOP.

2.2 Propriedades Mecânicas

2.2.1 Ensaio de tração

A direção de retirada dos corpos-de-prova (3 cp's na região isenta de trincas e 3 cp's na região próxima a superfície de fratura) para o ensaio de tração foi no sentido do raio, conforme a Figura 2.



Figura 2: Sentido de retirada de amostras.

De acordo com a norma ASTM E8 determinou-se o limite de escoamento, o limite de resistência, o alongamento total e a redução de área.

2.2.2 Ensaio de impacto do tipo Charpy

Este ensaio foi realizado à temperatura ambiente. O procedimento para a retirada dos cp's foi o mesmo utilizado para os cp's dos ensaios de tração. Os ensaios, bem como os corpos-de-prova foram usinados de acordo com a norma ASTM E23.

2.2.3 Tenacidade a fratura - ensaios de integral J

Estes ensaios foram realizados no laboratório do DEMET da Escola de Minas da UFOP. Os ensaios de integral J foram realizados com monitoramento através de

computador, à temperatura ambiente, em torno de 23°C e com umidade relativa em torno de 60%. A medição da carga aplicada no corpo-de-prova durante o ensaio foi feita pela célula de carga da própria máquina, enquanto que para se medir o deslocamento, foi usado um *clip on gage*. Foram ensaiadas cinco amostras do segmento do mandril, retiradas na região denominada de “cabeça” do mandril. Os cp's foram confeccionados com a geometria do tipo *compact tension* – C(T). As dimensões dos corpos-de-prova se baseiam na norma ASTM E1820. A orientação dos corpos-de-prova foi no sentido do raio. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova com entalhe lateral, onde a espessura foi reduzida de 25%. Inicialmente, foi confeccionada a pré-trinca de fadiga, conforme estabelece a norma ASTM E1820. Após a confecção da pré-trinca de fadiga, iniciou-se o carregamento objetivando conhecer a curva $J \times \Delta a$ (crescimento de trinca). Através de uma rotina computacional calculou-se uma curva normalizada individual para o corpo-de-prova através dos pares de dados carga e deslocamento da linha de carga, bem como tamanho inicial e final da trinca. Uma vez definida essa curva, ficou estabelecida uma relação única entre carga, deslocamento e comprimento de trinca que permitiu a obtenção da curva J_R . O ensaio J_R foi projetado, admitindo-se que a trinca deveria se propagar de tal forma a validar o ensaio de integral J. Como isto não ocorreu, optou-se por calcular o valor de J no ponto de carga máxima, de acordo com a norma ASTM E1820.

2.2.4 Ensaio de propagação de trinca por fadiga

Foram ensaiadas três amostras, na máquina MTS servo-hidráulica de 10 t. Os corpos-de-prova para os ensaios de fadiga foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E647-00. As amostras foram retiradas no sentido do raio do segmento do mandril. A pré-trinca de fadiga exigida nos corpos-de-prova foi inserida de acordo com a norma ASTM E647-00, com um tamanho igual a 3,0mm. Após os corpos-de-prova serem pré-trincados eles foram submetidos a uma ciclagem em torno de uma tensão média e de acordo com uma razão $R (= \sigma_{min}/\sigma_{max})$ igual a 0,1. O comprimento da trinca foi monitorado durante todo o ensaio através de um *clip on gage* colocado na “boca” do corpo-de-prova. A frequência dos ensaios foi de 30 Hz e a temperatura dos ensaios foi de 25°C.

2.2.5 Ensaio de Fadiga Térmica

Foram realizados no Centro de Pesquisas da ArcelorMittal Stainless Europe, localizada em Isbergues (França). Para a confecção dos corpos-de-prova, foram retiradas tiras de 20 x 140 mm no sentido do raio do segmento, com espessura de 3,00 mm. Foi feito um entalhe central de 20 mm e 1,50 mm de espessura. O aquecimento foi feito através de uma resistência elétrica, sendo aquecido o corpo-de-prova pelo efeito *joule*. A temperatura foi medida através de termopares instalados em contato com o corpo-de-prova. O resfriamento foi realizado de forma natural, ou seja, ao ar. Em todas as amostras não houve tempo de permanência nem na temperatura mínima, nem na temperatura máxima. Foram realizados quatro ensaios, descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga térmica

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Temperatura mínima (°C)	25	200	25	100
Temperatura máxima (°C)	500	500	350	600
Taxa de aquecimento (°C/s)	16	12	15	15
Número de ciclos	5500	500	500	2300

2.3 Medição de Perfil Térmico

Com o intuito de avaliar o ciclo térmico ao qual o segmento é submetido em regime de trabalho foram realizadas medições de temperaturas nas superfícies do segmento do mandril durante os intervalos de laminação, abrangendo desde a saída da bobina do mandril até a chegada da próxima bobina. As medições foram feitas através de pirômetro óptico, sendo coletados os dados e registrados através de carta gráfica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Macroscópica e Ensaios Não-Destrutivos

A Figura 3 mostra uma fotografia do 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, próxima à fratura. Nas laterais o mandril apresenta-se íntegro. Para se ter uma idéia da densidade de trincas presente nesta malha, foi feita uma contagem numa área de 40x40 mm, próxima à região da fratura. Foram contadas 31 trincas longitudinais e 12 trincas transversais, no sentido da maior dimensão do segmento.

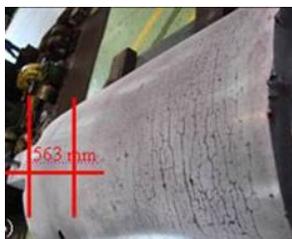
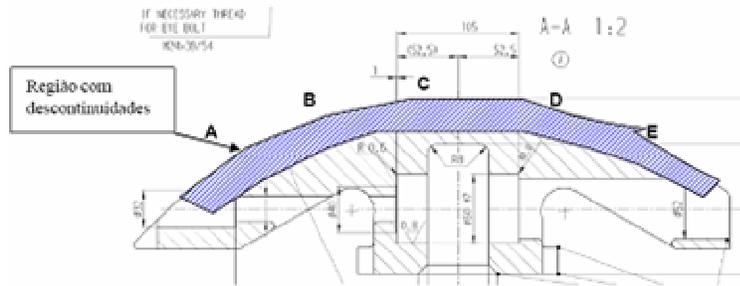


Figura 3: Malha de trincas próxima à região de fratura do segmento do mandril.

Através do ensaio não-destrutivo de ultra-som, detectaram-se descontinuidades distribuídas numa profundidade de até 22 mm da superfície de trabalho (região central do segmento). A Figura 4 mostra a distribuição das descontinuidades.

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.



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.⁽⁶⁾

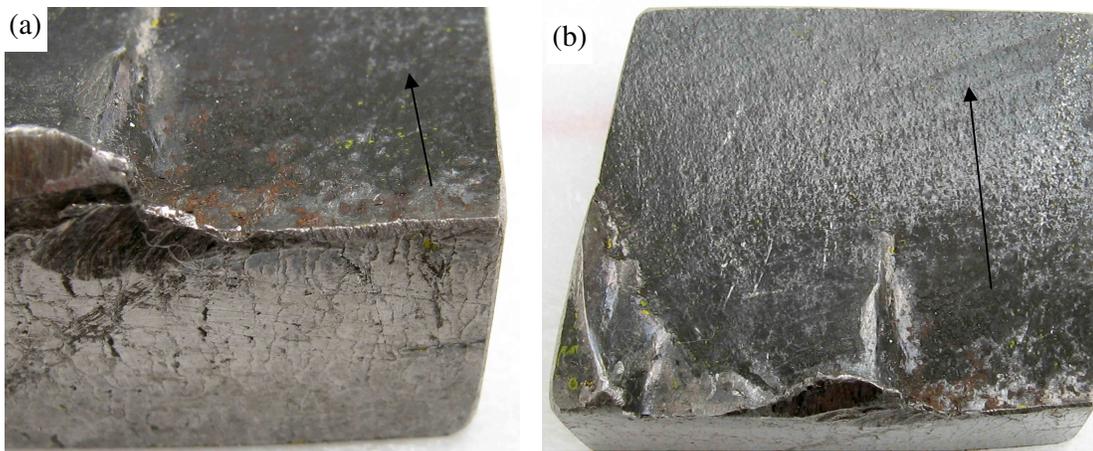


Figura 5: Detalhe da iniciação (a) e da propagação (b) de trinca na fratura do segmento do mandril. As setas indicam o sentido de trincamento.⁽⁶⁾

Assim como ficou evidenciado no ensaio de líquido penetrante que as bordas do segmento do mandril não apresentaram trincas, no ensaio de ultra-som essa constatação foi ratificada. Essa evidência também correlaciona a forte influência da degradação com a ciclagem térmica sofrida pelo segmento.

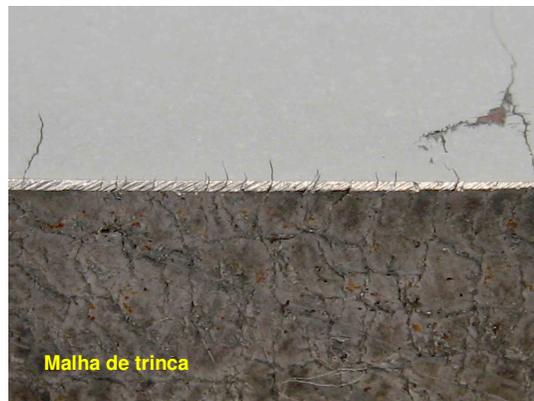


Figura 6: Seção imediatamente abaixo da fratura, mostrando a malha de trincas, com profundidade.⁽⁶⁾

3.2 Análise Microestrutural

A Figura 7 apresenta a microestrutura do aço, constituída essencialmente de martensita revenida, revelada por ataque com reativo Vilella.



Figura 7: Microestrutura do aço do segmento do mandril, microscópio ótico. Reativo de Vilella, 500X.

3.3 Propriedades Mecânicas

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos dos ensaios convencionais de tração. Observa-se que as amostras retiradas na região próxima à fratura apresentaram um limite de resistência, em média, 11% superior às amostras retiradas na região isenta de trincas. Essa diferença pode indicar a presença de um gradiente de tensões internas, provavelmente em função da deformação ocorrida nessa região em consequência da iniciação e propagação de trincas. Não existe diferença significativa com relação ao limite de escoamento e ao alongamento. Comparando esses dados com a especificação, observa-se que o limite de resistência teve uma tendência ao limite inferior da norma.

Tabela 4: Propriedades mecânicas em tração

Amostras	σ_e (MPa)	σ_r (MPa)	AI (%)	RA (%)
Região isenta de trincas	740	865	14	31
Desvio Padrão	50	3	2	8
Região próxima à superfície de fratura	756	908	17	35
Desvio Padrão	5	4	1	2

Na Tabela 5 estão listados os resultados dos ensaios de impacto Charpy: EA - energia absorvida e FD - % da superfície que apresenta fratura dúctil.

Tabela 5: Resultados obtidos no ensaio de impacto

Amostra	EA (J)	FD (%)
Região isenta de trincas	34	30
Desvio Padrão	3	0
Região próxima à superfície de fratura	26	23
Desvio Padrão	1	6

Todas as amostras foram rompidas no ensaio realizado à temperatura ambiente. Analisando a Tabela 5 observa-se que as amostras retiradas na região próxima à

fratura apresentaram valores de EA, em média, 25% inferior às amostras retiradas na região isenta de trabalho. Essa diferença está relacionada com o maior valor de limite de resistência na região próxima a fratura.

3.4 Análise Microfratográfica

A Figura 8 (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.

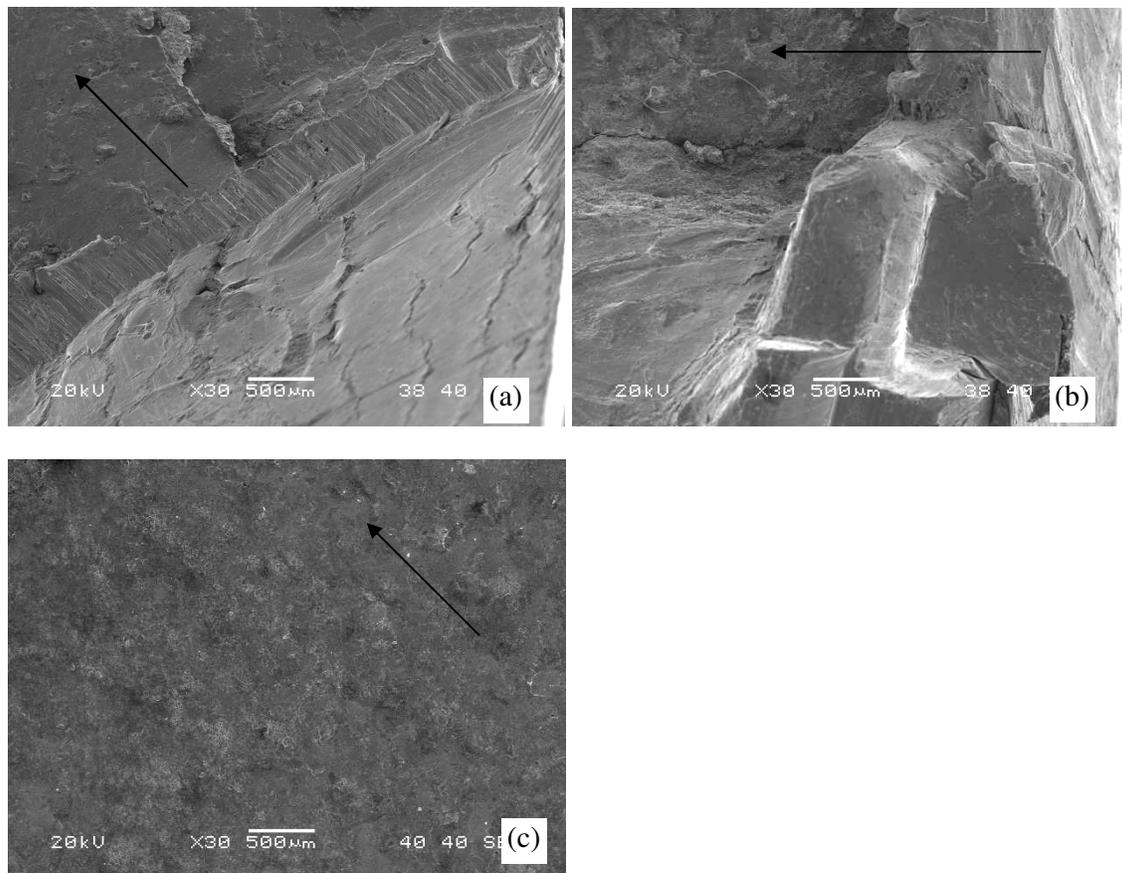


Figura 8: Microfratografias de regiões do trincamento por fadiga do segmento do mandril. (a) e (b) Malha de trincas e trincamento ao longo da espessura. (c) Superfície da fratura.⁽⁶⁾

3.5 Tenacidade à Fratura

Para a realização do ensaio de tenacidade à fratura, foi feita a opção pelo ensaio de Integral J. O ensaio foi feito em cinco amostras, retiradas na “cabeça” do mandril. A tenacidade à fratura na instabilidade após o rasgamento estável médio foi $J_{qu}=245,5\text{kJ/m}^2$. Observou-se que ocorreu um pequeno crescimento de trinca (crescimento de trinca médio = 1,3 mm). O material apresentou um comportamento entre frágil e dúctil, e dessa forma, não apresentou o número suficiente de pontos conforme a norma (≥ 8) para que fizesse a curva de resistência por completo.

3.6 Crescimento de Trinca por Fadiga

Na Figura 9 pode-se observar a curva do crescimento de trinca como função do número de ciclos do ensaio de fadiga de um dos corpos-de-prova e na Figura 10 observa-se a curva da/dn como função de ΔK .

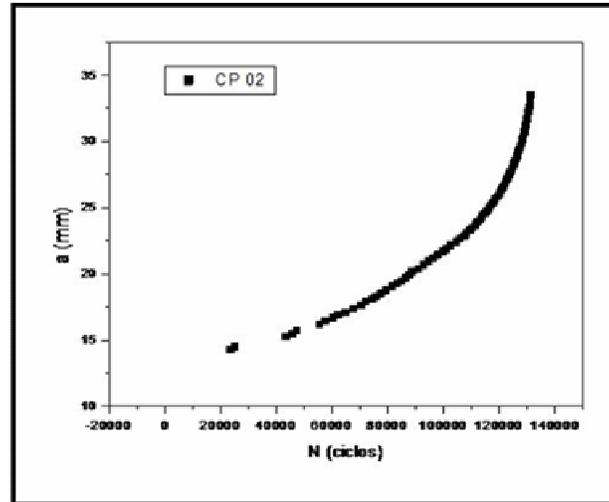


Figura 9: Curva do ensaio de fadiga de um dos corpos-de-prova.

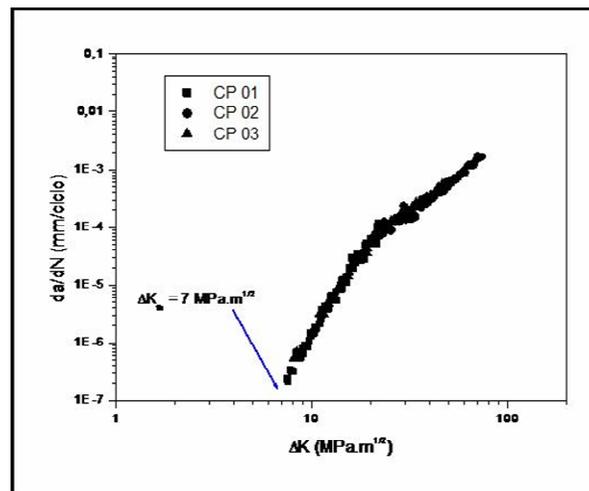
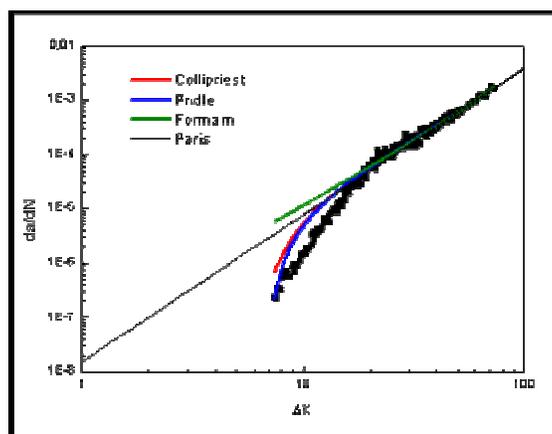


Figura 10: Curvas da/dN X ΔK de três corpos de prova.

Os resultados obtidos da aplicação dos modelos matemáticos à curva da/dN como uma função de ΔK estão listados na Tabela 6 e o ajuste das curvas aos dados experimentais são mostradas na Figura 11. Verifica-se que os valores de K_c são praticamente os mesmos, independente do modelo adotado (exceto Paris e Erdogan), indicando que este método pode ser utilizado para a determinação deste parâmetro. Assim, pode-se concluir que o valor de K_c para esta liga é de aproximadamente $186 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Considerando apenas a região I de propagação de trinca por fadiga, dos modelos utilizados, o que melhor representou o comportamento da curva da/dN como uma função de ΔK foi o de Priddle e o de Collipriest. Na região II, todos os modelos têm um comportamento semelhante.

Tabela 6: Comparação entre as constantes dos modelos aplicados ao aço em estudo

Modelos	Constantes			
	C	n	K_c (MPa.m ^{1/2})	R ²
Paris e Erdogan	$1,6 \times 10^{-8} \pm 2 \times 10^{-9}$	$2,70 \pm 0,03$	-----	0,988
Forman	$1,0 \times 10^{-5} \pm 1,98 \times 10^{-8}$	$2,26 \pm 0,01$	193 ± 32	0,9885
Priddle	$0,003 \pm 0,001$	$1,62 \pm 0,07$	180 ± 18	0,9889
Collipriest	$3,0 \times 10^{-8} \pm 7 \times 10^{-9}$	1,25	186 ± 20	0,9889

**Figura 11:** Curva da taxa de crescimento de fadiga para R=0,1, com o ajuste de todos os modelos.

3.7 Fadiga Térmica

Após a realização dos ensaios de fadiga térmica, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de líquido penetrante e ultra-som, não sendo observada nenhuma descontinuidade. Em seguida, as amostras foram cortadas ao meio, para avaliar o aparecimento de possíveis descontinuidades e/ou mudança de microestrutura. Entretanto, não foi encontrada nenhuma descontinuidade, bem como alteração de microestrutura.

Pela análise fractográfica 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⁽⁹⁾. 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.⁽¹⁰⁾

3.8 Medição de Perfil Térmico

As medições foram feitas através de pirômetro óptico, sendo coletados os dados e registrados através de carta gráfica, de acordo com as Figuras 12 e 13. Na situação apresentada na Figura 12 a queda de temperatura seria ainda maior, pois foi necessário cortar os jatos de água para não influenciar na medição.



Figura 12: Medição da temperatura no centro do segmento do mandril entre o bobinamento de tiras (sem resfriamento à água). Aço SAE1008, temperatura de bobinamento = 600°C, dimensão 3,80 x 1.450 mm, peso 18,5t.



Figura 13: Medição da temperatura no centro do segmento do mandril entre o bobinamento de tiras (com resfriamento à água). Aço SAE10006, temperatura de bobinamento = 580°C, dimensão 3,30 x 1.340 mm, peso 19,0t.

Os resultados dos gráficos acima mostram a forte ciclagem térmica que os segmentos estão sujeitos quando estão em regime normal de trabalho. As medições foram feitas no centro da largura (maior dimensão) do segmento. A ciclagem varia em função da temperatura de bobinamento da bobina que está em processo, mas, puderam-se observar ciclagens da ordem de 60 a 560°C, o que representam uma variação muito grande entre a temperatura mínima e máxima. Além da ciclagem térmica, puderam-se observar que a amplitude também é curta, ou seja, de cinco a dez minutos, o que favorece o fenômeno de fadiga.

4 CONCLUSÕES

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

1. A análise de falha realizada no aço do segmento do mandril mostrou que o material sofreu trincamento por fadiga térmica;
2. A microestrutura de martensita revenida promoveu certa fragilidade no material, evidenciada pelos resultados dos ensaios de tração, dureza e impacto;
3. A resistência ao trincamento do material, avaliada pelos ensaios de tenacidade à fratura (integral J) e crescimento de trinca por fadiga, também demonstraram que o material apresenta certa fragilidade;
4. A simulação do processo de fadiga térmica no laboratório não chegou a evidenciar trincamento superficial do material;
5. Considerando apenas a região I de propagação de trinca por fadiga, dos modelos utilizados, o que melhor representou o comportamento da curva da/dN como uma função de ΔK foi o de Priddle e o de Collipriest. Na região II, todos os modelos apresentaram um comportamento semelhante.

REFERÊNCIAS

- 1 Aquino, D., Costa, A. F. L., Barros, J. A. G., Salles, A. C., Brágio, E. B., Mourão, F. C. C., *Lubrificação e passe – evolução e desenvolvimento no Itq da CST*, 41º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, p. 659-666, ABM, Joinville, 2004.
- 2 Carvalho, V. R., Jesus, R. E., Fontes, L. E., Silva, M. P., Brágio, E. B., *Comissionamento do coil box do laminador de tiras a quente da CST*, 40º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, p. 121-127, ABM, Vitória, 2003.
- 3 Fernandes, H. O., Dadalto, J., Dornelas, F. C., Bellon, J. C., Silva, C. N., *Evolução da produção e qualidade de processo do laminador de tiras a quente da CST*, 40º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, p. 299-307, ABM, Vitória, 2003.
- 4 Xavier, R. R., Oliveira, M. J., Murad, B., Carvalho, J. G., *Desenvolvimento de cilindros para as últimas cadeiras do laminador de tiras a quente da CST*, 41º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos, p. 23-29, ABM, Joinville, 2004.
- 5 Blazevic, D. T., *Operação de laminador de tiras a quente*, trad. Vol. I, Olympia Fields, Illinois, 1990.
- 6 Alcântara, A. P., Dafé, S. S. F., Cota, A. B., Godefroid, L. B., *Análise de falha em um segmento de mandril de bobinadeira de laminador de tiras a quente*, 63º Congresso Anual, p. 2541-2549, ABM, Santos, 2008.
- 7 *Deutsches Institut für Normung. DIN 17 240 – Heat resisting and highly heat resisting materials for bolts and nuts: Quality specifications*. July, 1976.
- 8 Cândido, L.C.; Godefroid, L.B.; Moraes, W.A.; *Análise de Falhas*, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, São Paulo, 2006.
- 9 *Metals Handbook, Volume XI – Failure Analysis and Prevention*, American Society for Materials, 10th Edition, 1990.
- 10 Colangelo, V.J., Heiser, F.A.: *Analysis of Metallurgical Failures*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 1987.