

ANÁLISE DE FALHA DE GARFOS DE EMPILHADEIRA FRATURADOS DURANTE LEVANTAMENTO DE CARGA*

Fábio Arielo Guastala¹
André de Almeida Grilo²
Marcelo Tadeu Milan³

Resumo

Empilhadeiras são equipamentos essenciais na movimentação de cargas em praticamente qualquer ambiente industrial e devem receber atenção especial em caso de falhas, pois podem comprometer operações e colocar em risco a saúde e a segurança de colaboradores. Este trabalho apresenta uma análise de falha dos garfos de uma empilhadeira que romperam durante uma operação rotineira de levantamento de carga. Amostras dos garfos fraturados foram submetidas à análise química, análise macrográfica, micrografia óptica, análises de dureza e microdureza e ensaios de tração e impacto. Além disso, foram analisadas as tensões as quais os garfos estavam submetidos, considerando a carga levantada, a especificação do equipamento e análises de fadiga e de tenacidade à fratura. Dessa maneira foi possível identificar o material dos garfos, suas características e também de que maneira ocorreu a fratura, resultando em recomendações que possam prever e/ou evitar ocorrências desse tipo futuramente.

Palavras-chave: Análise de falha; Fadiga; Tenacidade à fratura; Inspeção.

FAILURE ANALYSIS OF FORKLIFT FORKS FRACTURED DURING LOAD LIFTING

Abstract

Forklifts are essential equipment in cargo handling in virtually any industrial environment and should receive special attention in case of failure, because they may compromise operations and the health and safety of employees. This paper presents a failure analysis of the forks of a forklift that broke during a routine operation of load lifting. Samples of the fractured forks were subjected to chemical analysis, macrographic analysis, optical micrography, hardness and microhardness analysis and tensile and impact tests. Additionally, the tensions which the forks were subjected to were analyzed, considering the load being lifted, the specification of the equipment and analysis of fatigue and fracture toughness. This way it was possible to identify the material of the forks, its characteristics and also how the fracture occurred, resulting in recommendations that may predict and / or prevent such occurrences in the future.

Keywords: Failure analysis; Fatigue; Fracture toughness; Inspection.

¹ Engenheiro de Materiais, Mestre, Departamento de Pelotização, Vale S.A., Vitória/ES, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Departamento de Pelotização, Sereng - Vale S.A., Vitória/ES, Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Doutor, Materials Institute of Brazil – MIB, São Carlos/SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Empilhadeiras são equipamentos essenciais na movimentação de cargas em praticamente qualquer ambiente industrial. Devido a isso, seus garfos sofrem solicitações rotineiramente e estão sujeitos a falhas que podem comprometer operações e colocar em risco a saúde e a segurança de colaboradores. Dessa maneira, quando um desses componentes falha, é importante realizar uma análise das possíveis causas para que, no futuro, ocorrências deste tipo sejam previstas e/ou evitadas.

A falha apresentada neste trabalho ocorreu durante uma operação rotineira, o levantamento de um carro de grelha de massa igual a 9,8 toneladas, cujo centro de massa estava a 1,52 m de distância do início dos garfos. Após o rompimento dos garfos, amostras foram retiradas e enviadas para análise com o objetivo de identificar a possível causa da falha. A Figura 1 apresenta as amostras retiradas dos garfos fraturados e enviadas para análise e a Figura 2 apresenta os garfos fraturados em campo.



Figura 1. Amostras enviadas para análise. [1]



Figura 2. Garfos fraturados em campo. [1]

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras retiradas dos garfos fraturados passaram por diversas análises, inicialmente para identificar o material e suas características e, posteriormente, para obter os valores de tensões admissíveis para os garfos e analisar as possíveis causas da falha.

Primeiramente, foi realizada uma Análise Macrográfica a partir da limpeza, registro fotográfico e identificação de aspectos da falha. Foi realizada também uma Análise Química por espectrometria de emissão óptica e uma Micrografia Óptica a partir do corte, embutimento em baquelite, lixamento, polimento e ataque Nital 2%.

Em termos de propriedades mecânicas, o Ensaio de Dureza do tipo Rockwell B foi feito com carga 100kgf e penetrador esférico, conforme norma ASTM E18-12. [2] O Ensaio de Impacto foi realizado em máquina Time JB300 com martelo de 150J, sendo Charpy - tipo A e à temperatura ambiente, conforme ASTM E23-12. [3] Já o

Ensaio de Tração foi realizado em máquina Instron 2382 com 100 kN de capacidade e controle de deslocamento de 0,7 mm/min até o escoamento e 6 mm/min até a fratura e $L_0=4D=35\text{mm}$, conforme ASTM A370-12. [4]

A Análise das Tensões foi separada em três partes. A primeira parte é a Análise Estática, em que se compara a tensão máxima na fratura, considerando o peso do carro de grelha, com a tensão máxima admissível pela especificação da empilhadeira [1].

A segunda parte é a Análise de Fadiga, em que, como os garfos sofrem solicitações cíclicas, eles estão susceptíveis a falhas por fadiga e, portanto, deve-se analisar a tensão máxima admissível nesse regime, considerando o limite de fadiga efetivo do material [5].

A última parte é a Análise de Tenacidade à Fratura, em que calcula-se uma tensão máxima admissível para um defeito de fadiga já presente no material a partir do valor de tenacidade à fratura do material (K_{IC}) [6]. A comparação entre as tensões obtidas nos cálculos dessas três análises elucida qual a provável causa da falha.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Macrográfica

A análise macrográfica da amostra revela uma pequena região de nucleação por fadiga localizada na região de maior momento fletor, junto ao raio de curvatura de ambos os garfos, conforme a Figura 3. A área de propagação por fadiga sugere um material de baixa tenacidade e/ou uma carga muito elevada de operação.

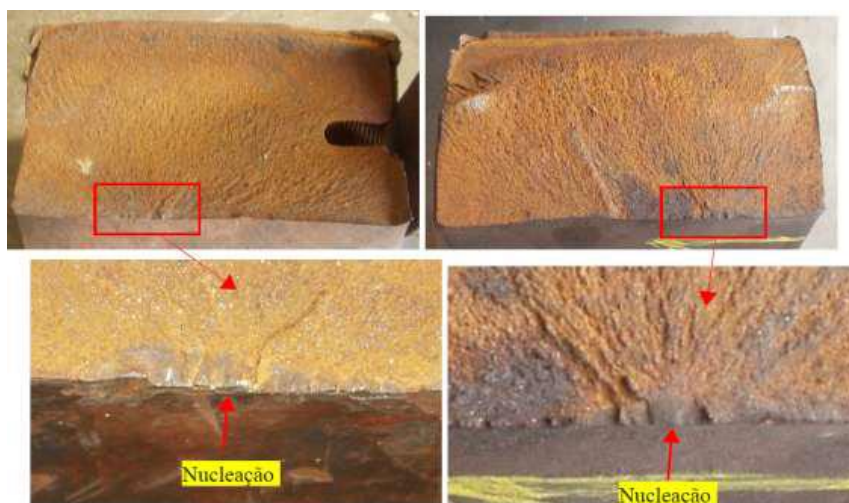


Figura 3. Detalhe das superfícies de fratura dos garfos, LE e LD. A nucleação por fadiga é indicada por uma seta. [1]

3.2 Análise Química

De acordo com os resultados de análise química, Tabela 1, pode-se afirmar que o material do garfo apresenta composição química de um aço microligado, de 0,3% de C com adições de Mn e Cr. A composição do aço SAE 1030 é dada para comparação.

Tabela 1. Análise química (% em peso) [1]

Amostra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Garfo	0,31	0,26	1,25	0,024	0,032	0,51	0,03
SAE 1030	0,28- 0,34	NE	0,60- 0,90	0,040 max	0,050 max	NE	NE
Amostra	Mo	V	Ti	Nb	Al	Cu	Fe
Garfo	0,06	0,005	0,036	ND	0,033	0,010	Bal
SAE 1030	NE	NE	NE	NE	NE	NE	-

ND - não detectado, NE - Não especificado

3.3 Análise Micrográfica Óptica e de Dureza

A análise micrográfica óptica da região de nucleação, apresentada na Figura 4, mostra uma descarbonetação superficial, com dureza mais baixa do que a região subsuperficial, o que favorece a nucleação de trincas de fadiga no material. Essa descarbonetação ocorre quando a peça é submetida a um tratamento térmico sem atmosfera controlada durante a sua fabricação.

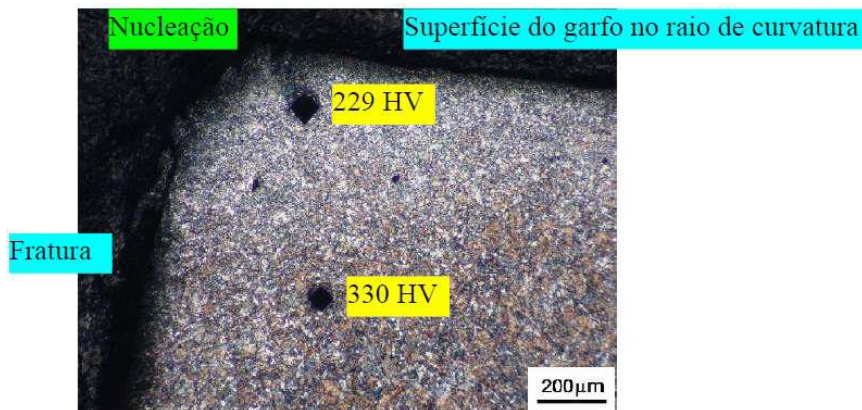


Figura 4. Micrografia óptica da região de nucleação. [1]

A análise micrográfica óptica de uma amostra removida do núcleo do material, Figura 5, indica a presença de martensita e bainita revenidas. Como pode ser visto, o tamanho de grão é relativamente pequeno, portanto, essa característica não é o que causa a baixa tenacidade apresentada pelo material. A Tabela 2 apresenta a análise de dureza do núcleo do material.

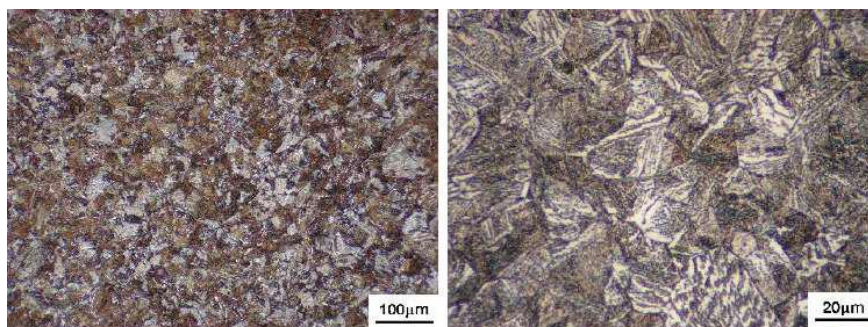


Figura 5. Micrografia óptica do núcleo. [1]

Tabela 2. Análise de dureza do núcleo [1]

Medidas (HRC)					Média (HRC)	Média (HB)*
25	23	27	25	28	25,6	256

* Conversão feita de acordo com a norma ASTM A370-12 para fins de comparação

3.4 Ensaios de Impacto

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de impacto. Observa-se que o material apresenta uma tenacidade ao impacto muito baixa à temperatura ambiente. Considerando-se o tamanho da peça, é provável que o material esteja fragilizado pelo mecanismo de “fragilidade do revenido”. Este tipo de fragilização ocorre quando aços microligados são resfriados lentamente ou mantidos por muito tempo na faixa de temperatura entre 250°C e 450°C. Este efeito é comum em peças de grande porte, pois resfriam lentamente após o tratamento de revenimento, uma vez que a peça é retirada do forno e resfriada ao ar, passando por tempo suficiente na faixa crítica para que o problema se manifeste.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de impacto [1]

Energia(J)	
Valores	Média
8	
6	7
6	

3.5 Ensaios de Tração

A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de tração. Os valores são compatíveis com a microestrutura e dureza do material. O alongamento é relativamente baixo provavelmente devido à fragilidade do revenido.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de tração [1]

S_e (MPa)	S_r (MPa)	A (%)	RA (%)
696,9	888,3	8,7	20,9

Legenda: S_e = limite de escoamento 0,2% offset, S_r = limite de resistência à tração, A = alongamento em 4D=35 mm, RA = redução de área

3.6 Análise Estática

A Figura 6 mostra o gráfico de cargas permitidas em função da distância de carregamento, conforme especificação da empilhadeira. Pela extrapolação do gráfico de carga máxima permitida em função do braço fletor, apresentada na Figura 7, para a distância de erguimento de 1,52m, a máxima carga permitida seria de 8,8 ton, ou seja, houve uma sobrecarga estática nos braços da empilhadeira de acordo com a especificação do fabricante.

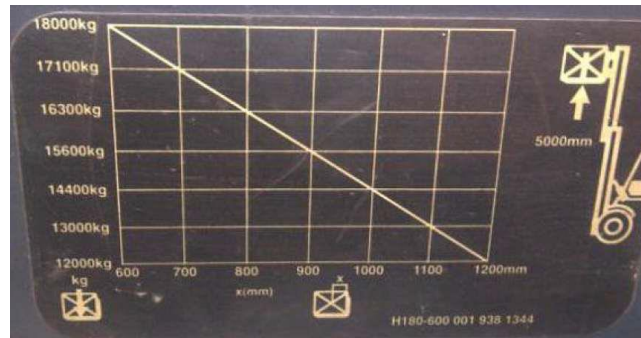


Figura 6. Gráfico de carga máxima permitida em função da distância de carregamento. [1]

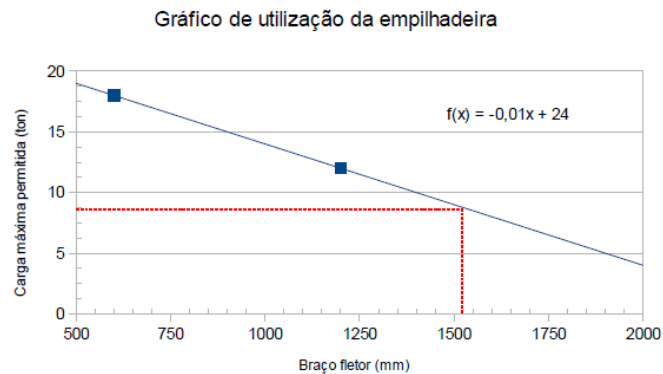


Figura 7. Gráfico da relação entre o braço fletor e a carga máxima permitida. [1]

Considerando-se as dimensões da seção transversal dos garfos, $b=180\text{mm}$, $h=90\text{mm}$, a carga do carro $P=9,8\text{ton}=96040\text{N}$ e o braço $d=1,52\text{m}$ dado pela distância do centro de massa do carro até o início do garfo, é possível estimar a tensão nominal na região de fratura pela Equação 1 (considerando-se 2 garfos):

$$S = \frac{6Pd}{2bh^2} = \frac{(6 \times 96040 \times 1520)}{2 \times 180 \times 90^2} = 300 \text{ MPa} \quad (1)$$

- Que é a **Tensão Máxima na Fratura**.

É importante ressaltar que exatamente na região de maior momento fletor estão localizados dois furos de fixação de parafusos em cada lado de cada um dos garfos, como apresentado na Figura 8. O valor exato da concentração de tensão só é possível calcular por meio de uma simulação por elementos finitos, mas essa análise não influenciaria o resultado deste relatório, pois a nucleação não aconteceu a partir destes furos, porém, é evidente que deve haver um aumento significativo de tensões na região.

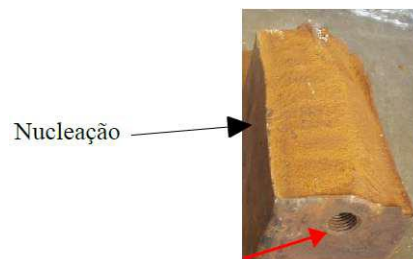


Figura 8. Detalhes de um dos furos roscados na região de maior momento fletor. [1]

Fazendo-se um cálculo semelhante, adotando 8,8 ton de carga máxima permitida, a tensão máxima nominal admissível, estimada pelo gráfico da empilhadeira, seria de:

$$S = 6Pd/2bh^2 = (6 \times 86240 \times 1520) / 2 \times 180 \times 90^2 = 270 \text{ MPa} \quad (2)$$

Que é a **Tensão Máxima Admissível pelo Gráfico**.

Apesar de haver uma sobrecarga, conforme o gráfico da empilhadeira, o valor de 300 MPa é insuficiente para provocar uma falha por sobrecarga estática, uma vez que o limite de escoamento do material é de cerca de 700 MPa, ou seja, os garfos foram superdimensionados com uma margem de segurança de mais de 100%, e não houve indícios de deformação plástica do material.

3.7 ANÁLISE DE FADIGA

O valor de tensão máxima admissível calculado anteriormente deve ser comparado à tensão máxima admissível para o eixo sob fadiga, levando-se em conta o limite de fadiga (LF) efetivo do material e as condições de carregamento.

Para aços com dureza inferior a 400 HB, o valor de LF (sob carregamento fletor alternado, ou seja, $R=-1$) pode ser dado pela Equação 3 abaixo [5]:

$$LF = 1,73 \times HB \quad (3)$$

Para o aço em questão, assumindo o valor de dureza médio na superfície do eixo (229 HV = 229 HB):

$$LF = 1,73 \times 229 = 396 \text{ MPa} \quad (4)$$

Entretanto, o valor acima calculado deve levar em conta fatores de modificação empíricos devido ao acabamento superficial (C_s) e tamanho (C_t), obtendo-se um limite de fadiga efetivo LF' :

$$LF' = LF \cdot C_s \cdot C_t \quad (5)$$

O fator C_s é estimado em torno de 0,4 considerando-se um acabamento de como forjado, pelo gráfico da Figura 9.

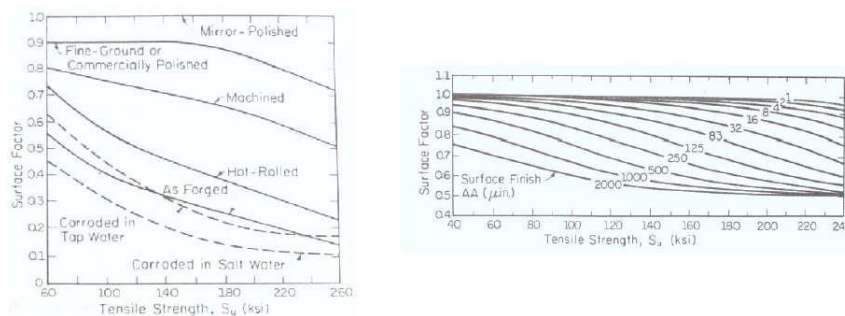


Figura 9. Fatores de correção do limite de fadiga para acabamento superficial para aços. [5]

O fator de tamanho é dado pela Equação 6 [5]:

$$C_t = 1,189d - 0,097 = 1,189 \times 90 - 0,097 = 0,77 \quad (6)$$

Assim sendo, substituindo-se os valores na Equação 5, obtém-se:

$$LF' = 394 \times 0,4 \times 0,77 = 121,5 \text{ MPa} \quad (7)$$

Como a tensão aplicada é pulsante, ou seja, $R=0$, variando de zero até uma carga máxima, a tensão máxima admissível de fadiga deve ser calculada considerando-se o efeito da tensão média pela Equação de Goodman (Equação 8) [5]:

$$S_a/LF + S_m/LR = 1 \quad (8)$$

Em que S_a é a amplitude de tensão, S_m é a tensão média, LF é o limite de fadiga e LR é o limite de resistência à tração, neste caso estimado pela dureza superficial em 793,5 MPa. Como $R=0$, $S_a=S_m=S$ e assim:

$$S/121,5 + S/793,5 = 1 \quad (9)$$

$$S = 105,4 \text{ MPa} \rightarrow S_{\max} = 2 \times S = 211 \text{ MPa} \quad (10)$$

- Que é a **Tensão Máxima Admissível sob Fadiga**.

Portanto, a tensão máxima admissível sob fadiga (211 MPa) é menor do que a tensão máxima permitida pelo gráfico da empilhadeira (270 MPa). Em outras palavras, considerando-se a natureza cíclica do carregamento, os garfos da empilhadeira estão suscetíveis a falhar por fadiga dependendo do histórico de carregamento ao longo do tempo.

3.7 Análise de Tenacidade à Fratura

O valor da tenacidade à fratura do material K_{IC} pode ser estimada pela Equação 11 [6]:

$$K_{IC} = [5 \cdot Se \cdot (E - Se/20)]^{1/2} \quad (11)$$

Em que Se é o limite de escoamento em ksi e E é a energia de impacto Charpy em lb.ft. Substituindo os valores correspondentes, tem-se que o valor estimado de K_{IC} do material é:

$$K_{IC} = 31,3 \text{ ksi} \cdot \text{in}^{1/2} = 34,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \quad (12)$$

Que é um valor baixo quando comparado a valores para o aço (um aço usualmente exibe valores entre 100 e 120 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, por exemplo). Um valor baixo de K_{IC} significa que uma pequena trinca no material pode se propagar quando submetida a tensões mais baixas e causar uma fratura catastrófica.

O comprimento de trinca medido na superfície de fratura é $a = 5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m}$ e o valor da tensão máxima admissível tolerável por este defeito de fadiga é dada pela equação a seguir, sendo que Y é um fator geométrico que leva em conta a concentração de tensões na trinca, cujo valor de 1,12 é o padrão para trincas de pequena dimensão:

$$\sigma = K_{IC} / Y \sqrt{\pi a} = 34,5 / 1,12 \sqrt{\pi \times 0,005} = 246 \text{ MPa} \quad (13)$$

- Que é a **Tensão Máxima Admissível pela Mecânica da Fratura para um Defeito de 5 mm**.

Ou seja, o garfo fraturou catastrófica pois a tensão aplicada nos garfos de 300 MPa foi maior do que a tensão máxima admissível pela mecânica da fratura de 246 MPa, para o defeito presente.

É importante ressaltar que mesmo que o garfo estivesse operando dentro dos limites impostos pelo gráfico da empilhadeira, que supõe uma tensão máxima admissível de 270 MPa, ele teria fraturado devido à presença do defeito de fadiga.

Porém, se o carro de grelha estivesse mais próximo do início do garfo, a tensão exercida pelo carro seria menor do que a tensão máxima admitida pela mecânica da fratura, já que, pela fórmula da análise estática (Equação 1), a tensão varia diretamente com a distância do centro de massa do carro ao início do garfo.

Como a trinca presente no material seria pequena demais para fraturar o garfo a uma tensão mais baixa, o material sofreria fadiga por mais algum tempo.

Entretanto, esse mecanismo de fadiga faria a trinca crescer aos poucos, o que faria a tensão admitida pela mecânica da fratura diminuir aos poucos. Quando esse valor decrescesse abaixo da tensão exercida pelo carro, isso significaria que a trinca atingiu um tamanho crítico, o que causaria a fratura catastrófica do material.

4 CONCLUSÕES

Com os resultados das análises, pode-se afirmar que o material do garfo apresenta composição química compatível com um aço médio carbono ligado ao Mn e Cr.

A análise micrográfica óptica do interior da peça indicou a presença de uma microestrutura de martensita e bainita revenida, de baixa tenacidade à fratura, provavelmente devido ao mecanismo de fragilidade do revenido.

As superfícies dos garfos apresentam uma camada descarbonetada de dureza inferior à camada subsuperficial, favorecendo a nucleação de trinca por fadiga. Essa descarbonetação é proveniente de um tratamento térmico realizado sem atmosfera controlada durante a fabricação da peça.

A análise de tensões mostra que os garfos estão bem dimensionados do ponto de vista estático, porém, não estão adequadamente dimensionados para solicitações de fadiga. O tempo de falha por fadiga depende do histórico de carregamento dos garfos.

Dessa maneira, recomenda-se empregar material de maior dureza, tal como aço SAE 4140 ou SAE 4340 na condição de temperado e revenido, com cerca de 40 HRC de dureza.

Empregar também atmosfera controlada durante o tratamento térmico para evitar descarbonetação superficial dos garfos. Além disso, rever os procedimentos de tratamento térmico do material, com o objetivo de evitar a fragilidade do revenido. Sugere-se um resfriamento rápido, após o revenimento da peça, para evitar que a mesma permaneça dentro da faixa crítica de temperatura por muito tempo.

Adicionalmente, é importante realizar inspeções periódicas com o objetivo de avaliar a presença de trincas nos garfos, principalmente na região de curvatura do braço. As inspeções podem ser realizadas via líquido penetrante ou ultrassom.

Por fim, reprojeter os garfos de empilhadeira considerando-se as solicitações de fadiga. Aconselha-se eliminar os furos roscados da região de maior momento fletor.

Agradecimentos

A equipe de Engenharia da Pelotização Vale agradece a todas as pessoas envolvidas neste trabalho e também agradece a ajuda do Materials Institute of Brazil (MIB) pelo apoio nas análises. Esta cooperação foi essencial para a realização e publicação deste estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Guastala, F.A.. 0312 - Análise de Falha do Material dos Garfos da Empilhadeira 11EA. Relatório Técnico Pelotização Vale; 2013;
- 2 ASTM E18-12 *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*;
- 3 ASTM E23-12 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*;
- 4 ASTM A370-12 *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*;
- 5 Bannantine, J.A., Comer, J.J., Handrock, J.L.. *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*. Nova Jersey: Prentice Hall; 1989;
- 6 Rolfe S.T., Barsom J.M.. *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*. Nova Jersey: Prentice Hall; 1977..