

## **ANÁLISE DE CONFIABILIDADE OPERACIONAL DE UMA EMPILHADEIRA DE LANÇA DUPLA E UM RETOMADORA E MINÉRIO**

**Jéferson Silveira Martins, jeferson.martins@magnor.com.br<sup>1</sup>**

**Luiz Brandão, luiz.brandão@magnor.com.br<sup>1</sup>**

**Cássio Silveira Martins, cassio.silveira.martins@gmail.com<sup>1</sup>**

**Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Magnor Consulting, Av. Afonso Pena, 952, Sala 315, Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 30130-906

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 31901-270

**Resumo:** *Esse trabalho apresenta a análise de confiabilidade operacional que foi desenvolvida pela MAGNOR Consulting para aumento de capacidade de uma empilhadeira de lança dupla e seu tripper. Para cumprir esse objetivo foram criados modelos computacionais em elementos finitos e planilhas de verificações analíticas que foram balanceadas com os dados e medições colhidas em campo numa visita técnica. Com os modelos e planilhas de cálculo balanceados, foram calculadas as tensões e deformações para todas condições operacionais, e a partir disso foi feita a verificação da confiabilidade estrutural. Foi concluído que a empilhadeira, mesmo para a carga operacional extra, se encontrava bem dimensionada, mas seu tripper necessitava de reforço.*

**Palavras-chave:** *empilhadeira de lança dupla, análise de integridade estrutural, análise de confiabilidade operacional*

### **1. INTRODUÇÃO**

A empilhadeira de lança dupla possui aproximadamente 29 anos de operação e tem capacidade nominal de 2000 t/h e deseja-se aumentar sua capacidade para 2500 t/h. Sendo assim, solicitou à MAGNOR a análise de integridade estrutural tanto da empilhadeira, como do seu respectivo tripper, e repotenciamento estrutural para 2500 t/h.

### **2. METODOLOGIA**

Para desenvolver um estudo de análise de integridade estrutural, é necessário seguir uma metodologia específica para máquinas de pátio. A equipe da MAGNOR Consulting realiza tanto as inspeções e monitoramento de tensões, quanto desenvolvem os cálculos estruturais em elementos finitos, verificações analíticas e os projetos e soluções de melhorias, possuindo, desta forma, a visão integrada de conjunto para obter a melhor solução e melhor relação custo benefício.

Esta sinergia nas informações promove excelência nos cálculos e projetos, sendo um diferencial para qualidade do produto final. Esta metodologia consiste em um conjunto de ações de inspeções, cálculos e projetos descritos a seguir:

#### **2.1. Inspeções e Ensaios**

Os vários ensaios e testes descritos a seguir têm como objetivo a identificação de possíveis falhas e anormalidades estruturais que a empilhadeira pode apresentar:

- ✓ Levantamento das informações, desenhos e histórico de falhas dos equipamentos;
- ✓ Inspeção visual na: nestas inspeções serão identificadas e registradas todas as falhas estruturais encontradas no equipamento:
  - Corrosões e deformações estruturais;
  - Funcionamento e conservação dos mecanismos;
  - Desgaste de rodas;
  - Conexões parafusadas;
  - Rótulas.
- ✓ Levantamento topográfico da Empilhadeira, para verificação das principais dimensões e deformações estruturais (caso existam);
- ✓ Ensaios de ultrassom, partículas magnéticas e/ou líquido penetrante;

## 2.2. Monitoramento por Extensometria (“Strain Gages”)

Extensometria é um método utilizado para medir a deformação à qual um componente estrutural está submetido, utilizando-se sensores chamados extensômetros, “strain gages”. Estes sensores são resistências elétricas, que têm o seu valor alterado quando submetidos a deformações. Assim, quando colados à estrutura do equipamento, os “strain gages” captam a deformação do metal base, causada pelos esforços durante a operação. A deformação ocorrida provoca uma variação diretamente proporcional na resistência elétrica do sensor que, montado em um circuito de ponte de Wheatstone, gera uma diferença de potencial. Essa diferença é lida pelo sistema de medição utilizado. Posteriormente, é feita a conversão da tensão elétrica em tensão mecânica por meio de equações especificamente desenvolvidas para extensometria e pela lei de Hooke da elasticidade linear.

As principais características dos strain gages utilizados são:

- ✓ Resistência elétrica de liga cobre-níquel;
- ✓ Base de medição: 10 mm;
- ✓ Sentido: uniaxial;
- ✓ Compensado termicamente para aço estrutural;
- ✓ Temperatura de trabalho: -10 a +90 °C;
- ✓ Fabricante: KYOWA do Japão.

Na empilhadeira de lança dupla foram instalados sensores “strain gages” nas regiões críticas da estrutura para monitoramento de esforços e tensões dinâmicas, registrando o comportamento do equipamento por 5 horas contínuas, permitindo em seguida a realização de:

- ✓ Análise dos resultados do monitoramento;
- ✓ Elaboração dos gráficos de tensões em função do tempo;
- ✓ Contagem dos ciclos operacionais.

## 2.3. Análise Estrutural pelo Método dos Elementos Finitos

Através desta análise, a empilhadeira e o tripper terão suas estruturas avaliadas em elevado grau de detalhamento, onde são consideradas de forma integral todas as nervuras e enrijecedores, trabalhando em conjunto com seus principais elementos estruturais. Essa análise envolve o cálculo das forças estáticas e dinâmicas envolvidas durante a operação do equipamento. Nesta etapa será considerada a capacidade nominal de 2500 t/h.

## 2.4. Análise Estrutural pelo Método Analítico

Para garantir a análise estrutural dos equipamentos, foram realizadas verificações estruturais baseadas em equações analíticas obtidas em Normas Técnicas ISO 5049-1 de 1994 e FEM Section II de 1997, que analisam os níveis de tensões atuantes, as distâncias entre enrijecedores, geometria e limites de deflexão das mesmas.

## 3. INSPEÇÃO VISUAL

Com o equipamento fora de operação, pôde realizar a primeira etapa do trabalho, a inspeção visual e ensaio não destrutivo.

Algumas falhas foram encontradas, como:

- ✓ Corrosão acentuada em grande parte da estrutura do equipamento, sendo que, em alguns pontos, existe perda de seção;
- ✓ Falta de rolete de retorno na lança da empilhadeira;
- ✓ Falta de parafusos;
- ✓ Incrustação elevada;
- ✓ Deformações e cortes em alguns elementos estruturais;
- ✓ Desgaste de roletes.

A Figura 1 mostra a visão geral do equipamento, e as Fig. 2 e 3 indicam o registro fotográfico de alguns dos problemas encontrados na inspeção.

## 4. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Estes ensaios têm como objetivo verificar as condições reais das principais uniões soldadas e de todos os pinos da máquina, sem que esses sejam danificados. Os ensaios não destrutivos constituem experiências e medições aos quais os componentes são submetidos para detecção de anomalias que, segundo critérios definidos em normas, são considerados aceitáveis ou não.

Foram realizados ensaios de ultra-som nos pinos e olhais, e de partícula magnética nas principais soldas de toda a estrutura dos equipamentos. De acordo com os resultados obtidos, nenhuma anormalidade foi encontrada. A seguir, são apresentados os detalhes destes ensaios.



**Figura 1. Visão geral do equipamento**



**Figura 2. 1 - Corrosão acentuada nos olhais da base da lança, 2 - Ausência de parafusos na trava do pino do contrapeso.**



**Figura 3. Incrustação na parte inferior da lança**

#### 4.1. Ensaios de Ultrassom

Com o ensaio de ultrassom, uma onda ultrassônica pulso-ecoante é enviada através do material, essa onda ao encontrar uma trinca retorna (eco) e é recebida pelo receptor de ultrassom, que é capaz de interpretá-la e informar ao usuário seu tamanho e localidade. Foram realizados ensaios de ultrassom nos pinos das seguintes uniões presentes no equipamento em questão:

- ✓ Uniões das duas lanças na empilhadeira;
- ✓ Uniões do tripper com a empilhadeira;
- ✓ Uniões dos tirantes:
  - Tirante – lança;
  - Tirante – tirante;
  - Tirante – pórtico.

Em nenhum dos pinos foi encontrada indicação de trinca.

#### 4.2. Ensaios de Partículas Magnéticas

O ensaio de partícula magnética detecta descontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos oriundas do processo de fabricação e ou trinca devida fadiga, permitindo um mapeamento das descontinuidades na região analisada. Foram realizados ensaios de partícula magnética nas principais soldas da estrutura e do tripper, a saber:

- ✓ Colunas;
- ✓ Olhais;
- ✓ Estrutura abaixo da sala elétrica;
- ✓ Tripper;
- ✓ Pórtico do tripper.

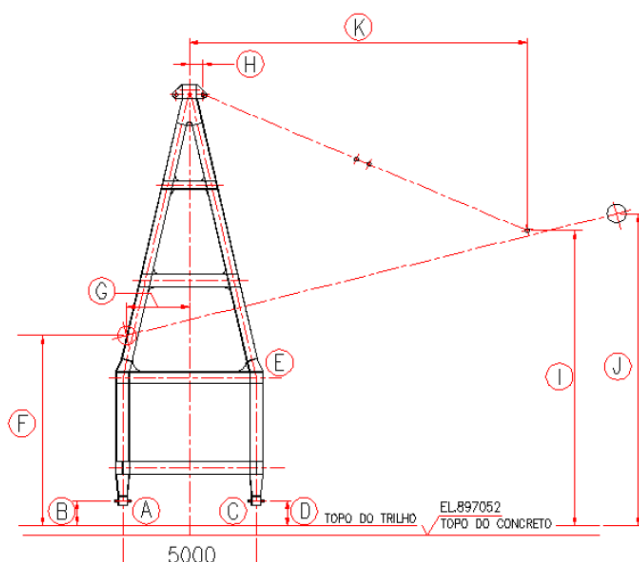
Em nenhuma das uniões soldadas foi encontrada indicação de trinca. A Figura 4 mostra uma região inspecionada por partícula magnética.



**Figura 4. Verificação das soldas no pórtico do tripper.**

#### 4.3. Levantamento Topográfico

O levantamento topográfico tem como objetivo verificar a geometria da máquina em suas condições atuais, medindo o nível de deformações e desnível da estrutura. Para a topografia foram medidas as referências mostradas na Fig. 5.



**Figura 5. Referências para topografia**

Neste levantamento topográfico foram verificados os seguintes itens:

- ✓ Nivelamento dos trilhos, itens A e C;
- ✓ Nivelamento dos eixos das rodas, itens B e D;
- ✓ Coordenadas do centro dos tambores de acionamento e de retorno das lanças, itens F, G e J;
- ✓ Coordenadas dos olhais dos tirantes, itens I, H e K;
- ✓ Elevação no nível das lanças, item E.

De acordo com a *Section II de la Federation Europeenne de la Manutention* (F.E.M. Sec. II), para o nivelamento dos trilhos, o limite admissível é 0,15 % do vão o que corresponde a 7,5 mm. Já para o nivelamento dos eixos das rodas, o limite admissível é 2,0 mm. Entre quatro pontos o limite admissível é 0,10 % do vão, ou seja, 5,0 mm. Para os demais pontos medidos, adotou-se o limite de 0,10 % do vão. Na topografia foi identificado que o nivelamento dos eixos das rodas, entre os quatro pontos de apoio, centro do olhal tirante-torre, centro do tambor de acionamento, estavam fora dos valores especificados e necessitavam correção.

## 5. ANÁLISE COMPUTACIONAL

### 5.1. Critério De Deslocamentos

O deslocamento máximo admissível utilizado para verificação das vigas principais das lanças e do tripper, foi definido segundo *know-how* da MAGNOR Consulting indicado na Eq. (1).

$$\delta_{\max} = \frac{L}{800} \quad (1)$$

Sendo:

$\delta_{\max}$  =deslocamento máximo permitido

L - vão livre da peça.

### 5.2. Critério De Tensões

Para a análise de tensões, o critério foi definido conforme a Norma ISO 5049-1 “Mobile Equipment for Continuous Handling for Bulk Materials”. Para o aço ASTM A36, cujo valor da tensão de escoamento é 25,0 kgf/mm<sup>2</sup>, os valores de tensão admissível são listados na tabela a seguir.

**Tabela 1. Critérios de tensões – valores admissíveis de tensão**

| Tipo de Carregamento         | Critério de Tensões (ISO)                    | Tensão Admissível para o ASTM A36 [MPa] |
|------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Caso I Operação Normal       | $\sigma_{\alpha} = \sigma_{\text{esc}}/1,50$ | 163,66MPa                               |
| Caso II Op. Carg. Adicionais | $\sigma_{\alpha} = \sigma_{\text{esc}}/1,33$ | 184,24MPa                               |
| Caso III Op.Carg. Especiais  | $\sigma_{\alpha} = \sigma_{\text{esc}}/1,20$ | 203,84MPa                               |

Onde,

$\sigma_{esc}$  = tensão de escoamento

$\sigma_{\alpha}$  = tensão admissível

### 5.3. Casos De Carregamento

Os casos de carregamento utilizados na análise da integridade estrutural das Recuperadoras são definidos pela norma ISO 5049-1, a qual estabeleceu diversas condições operacionais e seus respectivos esforços em que o equipamento é submetido. Assim sendo, os casos são divididos em três categorias, a saber:

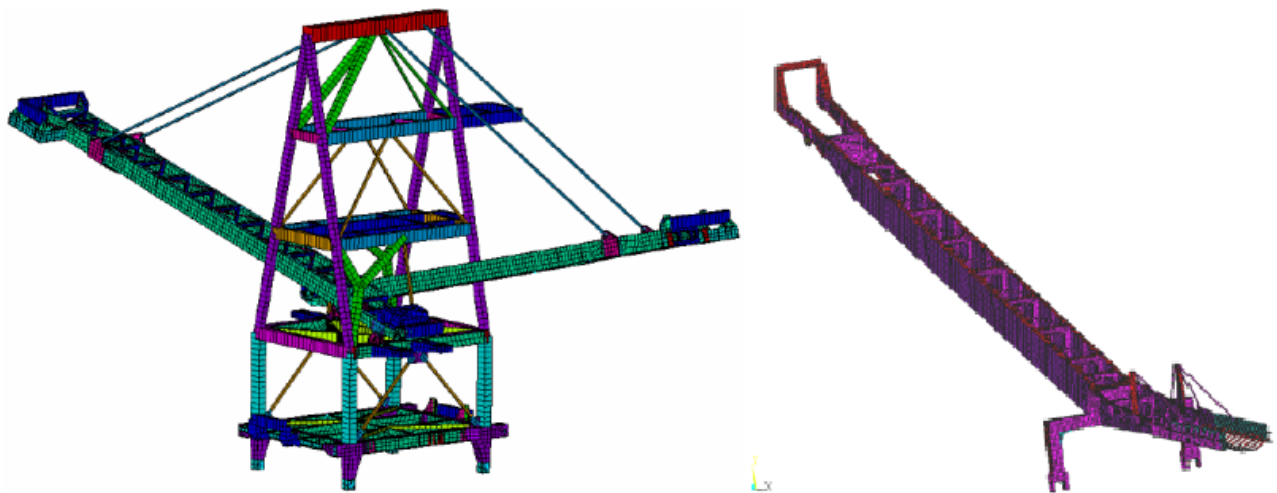
- ✓ Caso 1: operação normal da empilhadeira (peso próprio da máquina, carga de material, incrustações e forças do TC);
- ✓ Caso 2: carregamento principal + cargas adicionais (peso próprio da máquina, carga de material, incrustações, forças do TC e do Vento);
- ✓ Caso 3: cargas principais + cargas adicionais + cargas especiais (peso próprio da máquina, carga de material, incrustações, forças no transportador de correia, força do vento e cargas devido ao entupimento do chute);
- ✓ Caso 4: cargas principais + cargas adicionais + cargas especiais (peso próprio da máquina, carga de material, incrustações, forças no transportador de correia, vento e falha dos dispositivos de segurança – transportador de correia na capacidade máxima da correia).

Com o intuito de verificar as condições mais críticas para a empilhadeira, consideram-se os quatro casos de carregamento para sua análise da integridade estrutural, envolvendo a estrutura inferior (base), tripper, estrutura superior (torre) e as lanças.

### 5.4. Modelos Computacionais

Os modelos computacionais em 3D, desenvolvidos em elementos finitos para as análises descritas anteriormente, representam as propriedades físicas, mecânicas e geométricas de todas as estruturas e distribuição de massas da empilhadeira, garantindo uma alta confiabilidade nos cálculos e resultados.

Os modelos foram construídos com elementos em casca e viga, considerando detalhes estruturais tais como nervuras, assim como massas correspondentes aos acionamentos, motores, painéis, passadiços, cabine do operador, dentre outras. A Figura 6 apresenta os modelos computacionais da empilhadeira e do tripper.



**Figura 6. Modelo computacional da empilhadeira de lança dupla e de seu tripper.**

A análise da empilhadeira foi feita para cada um dos casos de carregamento e em todos eles a estrutura se mostrou bem dimensionada mesmo para carga extra de trabalho. Uma das saídas desse modelo pode ser vista na Fig. 7.

A estrutura do tripper mostrou não resistir ao aumento de carga imposto pela nova capacidade operacional, para esse equipamento as tensões em todos os casos de carregamento analisados foram maiores do que as permitidas para esse trabalho. Para ilustrar colocamos duas saídas computacionais do tripper para o caso de carregamento 4, nele a tensão máxima encontrada foi de 245,10 MPa, acima do limite estabelecido que foi de 203,84 MPa, como podemos ver na Fig. 8.

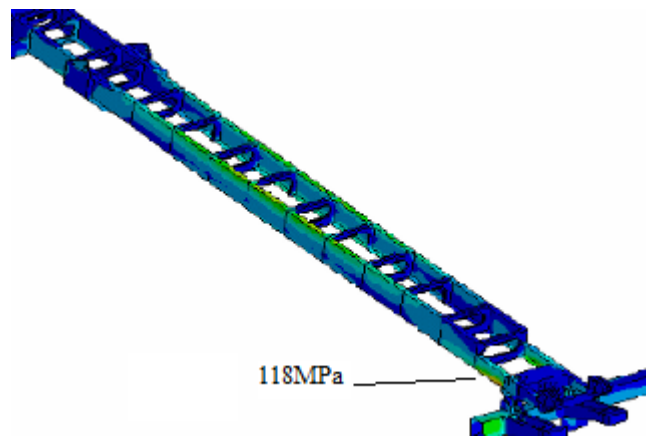


Figura 7. Distribuição de tensões na lança da empilhadeira

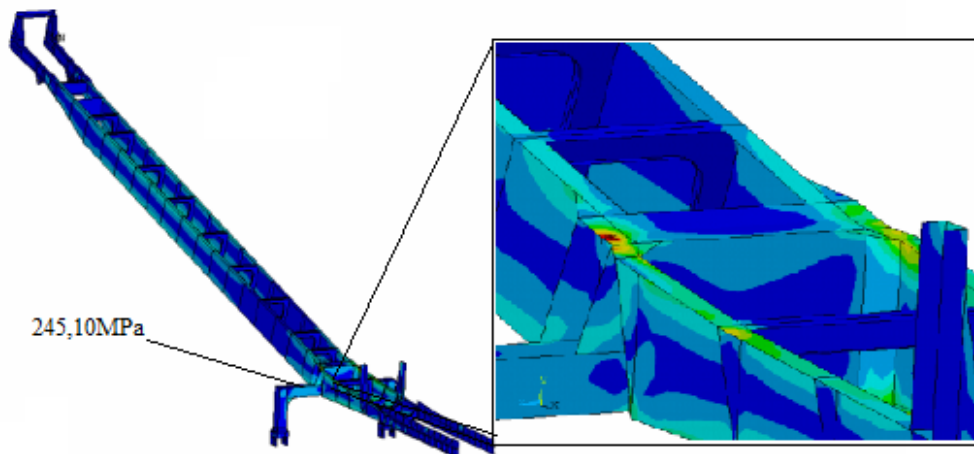


Figura 8. Tensões no tripper, tensão máxima de 245,10 MPa.

#### 5.5. Análise De Tensões – Estrutura Reforçada

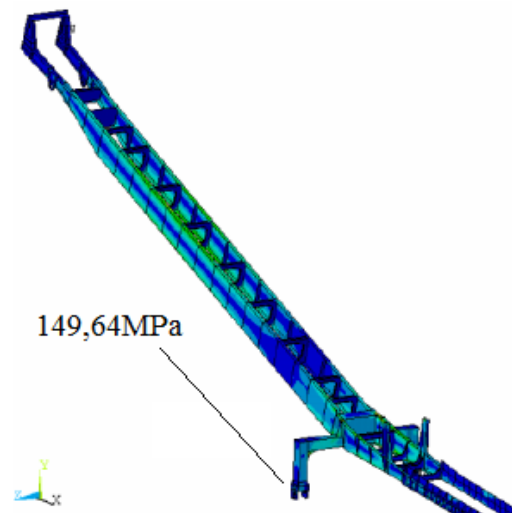
As mesas das vigas principais do tripper foram reforçadas no modelo com chapas de 9,5 mm, próximas ao seu pórtico de sustentação, a fim de reduzir as tensões atuantes, tornando-as inferiores às admissíveis. A Figura 9 a apresenta as regiões a serem reforçadas.



Figura 9. Regiões a serem reforçadas no tripper.

Novamente foram desenvolvidas as análises de tensões para os casos de carregamento para as novas condições, com o tripper reforçado, e em todos eles foram encontrados tensões menores do que o admissível.

Como é possível ver na Fig. 10, também do caso de carregamento 4, a tensão máxima diminuiu drasticamente, de 245,10 MPa para 149,64 MPa, e se encontra dentro dos limites estabelecidos para esse caso, de 203,84 MPa.



**Figura 10. Distribuição de tensões no tripper reforçado [MPa]**

### 5.6. Análise de Deformações

A análise de deslocamento da lança leva em consideração o caso de carregamento 4, que considerando a lança carregada com a capacidade máxima de minério que a correia da mesma comporta. Os valores de deslocamentos são apresentados na Figura 11. Considerando que um dos pontos de apoio da lança apresenta uma deflexão, calcula-se o deslocamento relativo como ilustra a Eq. (2)

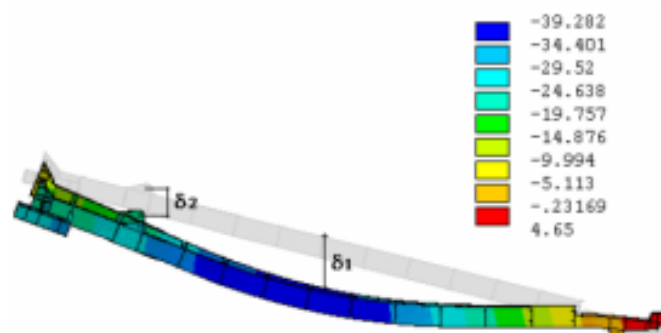
$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2)$$

Sendo:

$\delta$ : deslocamento relativo da lança;

$\delta_1$ : deslocamento da lança no meio do vão livre;

$\delta_2$ : deslocamento do apoio da lança (tirante de sustentação).



**Figura 11. Deformação vertical nas lanças da empilhadeira [mm].**

Observa-se que a deflexão máxima ocorre no meio do vão livre e apresenta valor de - 39,3 mm, enquanto que a deflexão apresentada na região de fixação da lança no tirante é de - 29,3 mm. O deslocamento relativo da lança calculado é de - 10 mm e se encontra abaixo do limite de -19,6 mm.

## 6. MONITORAMENTO DE TENSÕES

A empilhadeira de lança dupla, durante sua operação, tem sua estrutura constantemente solicitada por esforços provenientes do carregamento do material, do transportador da lança, forças transmitidas à sua estrutura pelo tripper e transportador do pátio, além do sistema de translação. O conhecimento desses esforços permite avaliar o nível de variação de tensões nos pontos críticos do equipamento. Além disso, também é possível conhecer os ciclos operacionais reais que serão utilizados nos cálculos de fadiga e mecânica da fratura.

Para a determinação dos esforços operacionais, foram instalados 11 sensores do tipo “*strain gage*” em sua estrutura (base, lança e torre), permitindo o monitoramento das variações das tensões atuantes.

Para tal, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, onde os sensores são conectados. O sistema é dotado de 12 canais que permitem a leitura em tempo real dos valores de tensões provocados pelas deformações da estrutura.

As regiões de instalação dos sensores foram definidas a partir de uma análise prévia dos pontos críticos da empilhadeira de lança dupla. Com este monitoramento, foi possível medir as variações de tensões das estruturas, envolvendo a lança (lado norte), a perna mais solicitada sob a lança norte, as vigas que recebem os esforços dos tambores de desvio, além das colunas e contraventamentos mais solicitados como mostra a Tab. 2.

**Tabela 2. Resumo da variação de tensão medida**

| Sensor | Localização                                                    | Variação Global [MPa] |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1      | Região da perna dianteira da base (lado norte)                 | 19,0                  |
| 2      | Região da perna dianteira da base (lado norte)                 | 39,5                  |
| 3      | Região da perna dianteira da base (lado norte)                 | 59,0                  |
| 4      | Viga da base que recebe o mancal do tambor de desvio inferior  | 22,5                  |
| 5      | Viga caixão acima da sala elétrica (lado sul)                  | 49,0                  |
| 6      | Mesa inferior da viga principal esquerda da lança (lado norte) | 44,0                  |
| 7      | Mesa superior da viga principal esquerda da lança (lado norte) | 24,5                  |
| 8      | Tirante esquerdo da lança (lado norte)                         | 39,0                  |
| 9      | Coluna no nível da base da lança (lado norte)                  | 59,5                  |
| 10     | Contraventamento em “Y” acima da sala elétrica (lado norte)    | 24,5                  |
| 11     | Viga da base que recebe o mancal do tambor de desvio inferior  | 19,5                  |

A análise do conjunto de dados coletados durante o monitoramento de extensometria é fundamental para conhecimento do comportamento da empilhadeira sob condições reais de funcionamento e para definição de parâmetros complementares nas análises de fadiga e mecânica da fratura.

## 7. VERIFICAÇÕES ANALÍTICAS

Além das análises mostradas acima, a Magnor ainda fez, analiticamente, as seguintes verificações: análise de flambagem, uniões parafusadas, análise de fadiga, sistema mecânicos, sistema de translação, olhais e pinos, análise dos transportadores de correia das lanças e análise de estabilidade do equipamento. Nesses cálculos foi identificado que o sistema de translação da empilhadeira, com o aumento de carga, passará a operar com fator de segurança menor do que o requerido, colocando em risco a confiabilidade do equipamento.

## 8. AÇÕES TÉCNICAS

As ações técnicas recomendadas a seguir vêm como uma proposta de garantir a operação da máquina com a capacidade de carga de 2500 t/h, proporcionando uma extensão de vida útil e a confiabilidade estrutural da mesma. Para que se possa ter o equipamento trabalhando adequadamente e com segurança, recomenda-se:

- ✓ Não submeter o equipamento às taxas superiores a 2500 t/h;
- ✓ Manter o equipamento sempre limpo, isento de incrustações;
- ✓ Realizar os reforços estruturais, na empilhadeira de lança dupla e no tripper, indicados neste relatório conforme projeto de reforço;
- ✓ Realizar anualmente ensaios não destrutivos de ultrassom nos pinos;
- ✓ Não transladar a empilhadeira quando a velocidade do vento for superior a 10 m/s (36 km/h). Sugere-se a instalação de dispositivos de monitoramento da velocidade do vento na área 32;
- ✓ Realizar o levantamento topográfico anual do equipamento, a fim de monitorar os desvios apresentados;
- ✓ Realizar o levantamento topográfico dos trilhos ao longo de todo o pátio;
- ✓ Repor pinos e parafusos faltantes nas estruturas da máquina;
- ✓ Substituir elementos estruturais que apresentam corrosão acentuada, dentre eles: talas parafusadas; olhais das lanças; pinos; e viga de sustentação da cabine;
- ✓ Reconstituir todos os elementos estruturais da máquina que apresentam furos, rasgos e princípio de corrosão, principalmente os contraventamentos, e base das lanças;
- ✓ Substituir suportes dos roletes da máquina e do tripper que se encontram deformados e/ou corroídos;
- ✓ Refazer a pintura de todo o equipamento;
- ✓ Desenvolver planos de inspeções periódicas, anualmente, onde deverão ser realizados os ensaios não destrutivos e a topografia, mencionados acima;
- ✓ Corrigir o valor do peso do esticamento do transportador de correia da lança para 3500 kg incluindo a carcaça;
- ✓ Manter e assistir o equipamento conforme procedimentos de manutenção especificados pelo fabricante.

## 9. CONCLUSÕES

As análises integradas de ensaios, inspeções e monitoramentos de tensões, juntamente com cálculos estruturais em elementos finitos e verificações analíticas, desenvolvidas e apresentadas nesse trabalho, asseguram que a empilhadeira de lança dupla possui pontos estruturais e mecânicos críticos e também demonstram que para que o cliente possa repotenciar e operar este equipamento a taxa de produção de 2500 t/h, são necessários implantar os projetos de melhorias propostos pela Magnor. Seguindo essas ações, o cliente poderá operar a empilhadeira de lança dupla com confiabilidade e segurança operacional, atendendo às normas e padrões técnicos internacionais.

## 10. REFERÊNCIAS

International Standard Organization, 1994, ISO 5049-1: "Mobile Equipment for Continuous Handling for Bulk Materials", USA  
Federation Europeenne de la Manutention, 1997, FEM Section II: "Rules for the Design of Mobile Equipment for Continuous Handling of Bulk Materials", França.

## 11. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

# OPERATING RELIABILITY ANALYSIS OF A DOUBLE STAKER

Jéferson Silveira Martins, jeferson.martins@magnor.com.br<sup>1</sup>

Luiz Brandão, luiz.brandão@magnor.com.br<sup>1</sup>

Cássio Silveira Martins, cassio.silveira.martins@gmail.com<sup>1</sup>

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magnor Consulting, Av. Afonso Pena, 952, Sala 315, Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 30130-906

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 31901-270

**Abstract.** *This paper will present operational reliability analysis that was developed by Magnor Consulting to increase the capacity of a double boom staker and its tripper. To accomplish this goal finite element computer models and spreadsheet for analytical checks were created and balanced with the data and measurements taken in a technical field visit. With balanced models and spreadsheets, the stresses and strains were calculated for all operating conditions, and from that, the verification of the structural reliability was made. It was concluded that the staker, even for the extra operating load, was well dimensioned, but its tripper needed reinforcement.*

**Keywords:** *double boom staker, structural integrity analysis, operational reliability analysis*