

APLICAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DA VIGA PRINCIPAL DE UMA RETOMADORA DE MINÉRIO DE FOSFATO

Edvon Alves Cordeiro ⁽¹⁾ (edvon.cordeiro@gmail.com), Lucas Costa Brito ⁽²⁾ (brito.lcb@gmail.com),
Hermes Dias Godinho ⁽¹⁾ (hermes@iesae.com.br), Jorge Nei Brito ⁽³⁾ (brito@ufs.br) ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ensino Superior Albert Einstein (IESAE); MBA em Engenharia de Manutenção e Gestão de Operações Industriais

⁽²⁾ Universidade Federal de Uberlândia (UFU); Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC)

⁽³⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ); Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção (DEMEP)

RESUMO: *O presente trabalho se propõe realizar estudo de tensão, deformação e níveis vibracionais de um equipamento de pátio de homogeneização de minério denominado Retomadora de Minério para identificação de instabilidades estruturais. Utilizou-se de inspeção visual, coleta vibracional e extensométrica em campo e simulação numérica através de Elementos Finitos. O objetivo foi a avaliação da integridade estrutural, investigação das deficiências estruturais e proposta de modificação geométrica caso necessário. A avaliação compreendeu medidas de tensões estáticas e dinâmicas, modelagem e análises para determinação de tensões na condição atual de operação; comparação e avaliação dos resultados; definição de alterações e/ou reforços para diminuição das tensões. Para a modelagem em Elementos Finitos, a Retomadora é representada por superfícies médias para a geração da malha casca com a melhor relação entre convergência e custo computacional. O modelo final constituiu-se elementos unidimensionais, representando os parafusos e ligações rígidas do modelo, elementos bidimensionais, representando as chapas e tubos.*

PALAVRAS-CHAVE: *Retomadora de Minério, Elementos Finitos, Modelagem, Integridade Estrutural.*

FINITE ELEMENT APPLICATION IN THE STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF THE MAIN BEAM OF A PHOSPHATE ORE RECLAIMER

ABSTRACT: *The present work proposes to carry out a study of tension, deformation and vibrational levels of an ore homogenization yard equipment called Ore Reclaimer to identify structural instabilities. Visual inspection, vibrational and extensometric collection in the field and numerical simulation using Finite Elements were used. The objective was to assess structural integrity, investigate structural deficiencies and propose geometric modifications if necessary. The evaluation included measurements of static and dynamic stresses, modeling and analysis to determine stresses in the current operating condition; comparison and evaluation of results; definition of alterations and / or reinforcements to reduce tensions. For Finite Element modeling, the Reseller is represented by medium surfaces for the generation of the shell mesh with the best relationship between convergence and computational cost. The final model consisted of one-dimensional elements, representing the screws and rigid connections of the model, two-dimensional elements, representing the plates and tubes.*

KEYWORDS: *Ore Returner, Finite Elements, Modeling, Structural Integrity.*

1. INTRODUÇÃO

A avaliação estrutural em instalações através de Elementos Finitos vem sendo amplamente utilizado na indústria como uma ferramenta de verificação de integridade física dos equipamentos. As análises se fundamentam nas recomendações das Normas Técnicas FEM (2013), Section I e Section II, NBR 8400 (1984) e ISO 5049-1 (1994).

A modelagem e análises por Elementos Finitos são utilizadas para determinação das medidas de tensões estáticas e dinâmicas. O estudo é baseado em avaliação numérica e experimental de tensão e deformação, análise sensível e técnica extensométrica com a utilização de extensômetros, do inglês *strain gauge*, fixado num componente do equipamento que se deseja avaliar.

O método dos Elementos Finitos apresenta uma formulação capaz de explorar a automação computacional para análise de sistemas irregulares. Refere-se a uma estrutura complexa como um conjunto de Elementos Finitos, onde cada elemento é parte de um membro estrutural contínuo. Os deslocamentos são compatibilizados e as forças internas estarão em equilíbrio em determinados pontos compartilhados por vários elementos. Toda a estrutura é compelida a agir como uma entidade única.

Com essa técnica, os arranjos físicos transformados em modelos matemáticos podem ser estudados de acordo com seu comportamento, dados pela resposta ao sofrer a ação de esforços externo e/ou internos. Podendo, portanto, ser classificados como estático ou dinâmico e destes dois, em linear ou não linear, conforme evidenciado na Figura 1.



FIGURA 1. Condição de linearidade - Força x Deslocamento. Fonte Norma CMAA-70 (1980).

O método dos Elementos Finitos não se limita à solução de problemas lineares, ou seja, aqueles em que há dependência linear entre a força externa aplicada sobre o corpo em análise e os deslocamentos por ele sofrido.

Em diversas aplicações da engenharia se faz necessário realizar análises não lineares, onde há três fontes principais: Não linearidade do material (relação tensão/deformação não linear); Não linearidade geométrica (grandes deformações, deslocamentos e rotações); Não linearidade nas condições de contorno ou contato (utilização de superfícies de contato).

Os problemas dinâmicos são solucionados através da "Equação do Movimento", Equação 1, onde $[M]$ é a matriz de massa; $[C]$ é a matriz de amortecimento; $[K]$ é a matriz de rigidez; $\{\ddot{u}\}$ é o vetor aceleração; $\{\dot{u}\}$ é o vetor velocidade; $\{u\}$ é o vetor deslocamento e $\{F\}$ é o vetor de forças aplicadas.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

Para problemas não lineares, a matriz de rigidez $[K]$ é dependente do deslocamento ou de suas derivadas. Equação 2.

$$[M]\{u(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K(u(t))]\{u(t)\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

Em Elementos Finitos, dois métodos são mais utilizados: implícito e explícito. O método implícito é indicado para simulações estáticas ou quase-estáticas e o método explícito indicado para simulações dinâmicas ou quase-dinâmicas. A diferença entre os dois métodos está no modo em que se obtêm os deslocamentos dos nós do sistema em estudo.

No método implícito este cálculo é realizado através da inversão da matriz de rigidez do modelo e multiplicando-a pelas forças atuantes. A equação de solução é caracterizada por um conjunto de equações acopladas, levando a um algoritmo implícito, desde que um conjunto de equações algébricas simultâneas deve ser resolvido a cada passo, ou seja, a matriz de rigidez deve ser invertida a cada passo.

No método explícito as acelerações do modelo precisam ser calculadas a cada instante, assim a aceleração é obtida invertendo-se a matriz de massa e multiplicando

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método utilizado

As medições e análises por Elementos Finitos realizadas na retomadora de minério visando a avaliação de sua integridade estrutural, abordou e utilizou os seguintes parâmetros: Medidas de tensões, estáticas e dinâmicas; Modelagem e análises por Elementos Finitos, para determinação de

tensões na condição atual, com carga de 960 t/h; Comparação e avaliação dos resultados; Estudo de alterações e/ou reforços para diminuição das tensões encontradas; Conclusões gerais.

As avaliações ocorreram em conformidade da NBR 8400 (1984), FEM (2013) Section I e Section II e ISO 5049-1 (1994). As análises por Elementos Finitos foram executadas com o programa "COSMOS/M- V 2013". Utilizou-se as unidades de medidas em [mm] para comprimento e [N/mm² ou MPa] para tensões.

Para a realização do estudo em referência, utilizou-se a sequência dos seguintes tópicos: inspeção visual e sensitiva, coleta vibracional e extensométrica, modelagem da geometria virtual (CAD), modelagem em Elementos Finitos, cálculo analítico da viga. CMAA (1980).

2.2. Dados operacionais do equipamento

A "Retomadora de Minério", objeto do presente estudo, opera num pátio de homogeneização, retomando minério de fosfato, apresenta as seguintes características principais: Capacidade nominal de projeto = 960,0 [t/h]; Comprimento de operação do carro = 37,0 [m]; Peso estimado em operação = 210,0 [t]; Velocidade média do carro = 15 [m/min]; Velocidade de translação = 2 [m/min]; Velocidade do transportador de correia = 2,7 [m/s]; Rotação da roda de caçambas = 5 [RPM].

Na Figura 2 tem-se o modelo 3D com indicações da nomenclatura adotada para os componentes principais da "Retomadora de Minério".

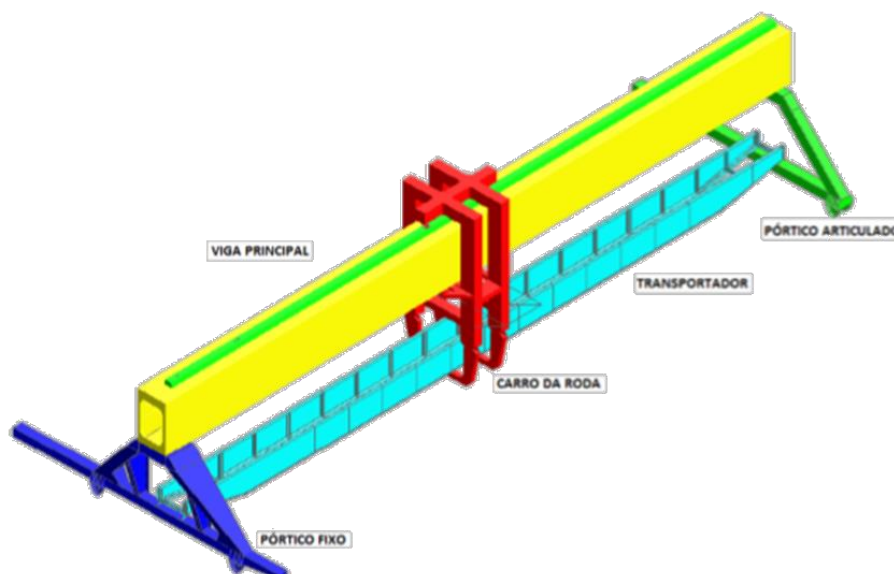


FIGURA 2. Modelo 3D adotado com indicações da nomenclatura para os principais componentes da "Retomadora de Minério". Fonte: Autor (2018).

O equipamento apresenta capacidade de movimento no sentido dos trilhos ao longo do pátio de homogeneização numa distância de 180 metros. Para retomagem de minério em dois pátios, a mudança ocorre por meio de um carro especial, denominado de carrinho de transferência.

A viga principal da "Retomadora de Minério" está apoiada sobre dois pórticos, um fixo e outro com articulação/móvel. Cada pórtico possui dois *trucks* com três rodas (um em cada extremo) e motorização em duas rodas, uma frontal e outra traseira.

A roda de caçambas é montada em um carro que translada no sentido longitudinal da viga principal e no sentido perpendicular aos trilhos, acionada por cremalheira constituída de pinhão e corrente fixa na base superior da viga principal. A roda de caçambas retoma o minério, avançando sobre a pilha e alimenta um transportador de correia que fica sob a viga principal e na extremidade do pórtico fixo, o transportador descarrega para um transportador de correia do pátio. VALADÃO (2007)

2.3. Medidas efetuadas em tempo real

2.3.1. Esquema adotado

Na "Retomadora de Minério" há um carro (*trolley*) que movimenta ao longo da viga principal retomando e avançando sobre a pilha de minério conforme a necessidade de aumento ou diminuição de carga de recuperação de minério. O *trolley* e a viga principal foi instrumentado para ter suas medidas gravadas em DataLogger, utilizando modulo fixo ADS. DIETER (1981).

As medições em tempo real foram obtidas com o apoio dos seguintes instrumentos e materiais: Módulo de aquisição de dados em tempo real, modelo ADS-2120 da Lynx do Brasil, com capacidade de 32 canais e frequência de aquisição até 3.000,0 Hz (três mil medidas por segundo por ponto); DataLogger da Lynx do Brasil com capacidade até 08 canais, frequência de até 3.000 Hz; Notebook com software Aqdados V.7 for Windows, da Lynx do Brasil; Extensômetros PA-06-250BA-120-L da Excel Sensores Ltda; Acelerômetros AnalogDevice bi-axial com +/- 2G.

2.3.2. Medidas efetuadas

Após a instalação dos sensores e conectados os cabos elétricos ao módulo de aquisição, com a Retomadora parada e *trolley* no início da viga principal (lado pórtico fixo), foi feita a calibração inicial (considerado o zero das tensões).

A seguir, iniciou a operação da "Retomadora de Minério". As medições foram repetidas por duas vezes para a aquisição dos sinais, em uma frequência de 200 Hz, e carga nominal de operação em torno de 960 [t/h].

Cada aquisição teve duração em torno de 35 minutos. Com os valores de aquisição de dados em tempo real, obteve-se as medidas de tensões em [Mpa], utilizando o resultado obtidos através da Equação 3, onde σ é a tensão em [Mpa], E é o módulo de elasticidade do material e ϵ é a deformação medida (10^{-6}). NORTON (2007).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3)$$

Na Tabela 1 tem-se os valores máximos de tensões obtidos para as condições dos testes acima. Esses valores foram obtidos das tensões medidas, conforme a estatística para os pontos mostrados nas Figuras 2 a 6.

TABELA 1. Tensões máximas obtidas nos testes em tempo real.

PONTO	TENSÃO (MPa)
01	-35,7
02	-92,3
03	-43,4
04	-39,8
05	-36,1
06	-39,8
07	-27,8
08	-13,7
09	11,2
10	20,2
11	13,5
12	21,4
13	13,5
14	12,9
15	9,8
16	8,5
17	7,4
18	5,8
19	6,9
20	6,2

Fonte: Autor (2018).

	01	02	03	04	05	06
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Amostras	401420	401420	401420	401420	401420	401420
Máximo	2,58097	2,57804	11,6553	7,62415	3,33334	4,18277
Mínimo	-33,1478	-89,7459	-31,7526	-32,222	-32,8117	-35,6203
Máx - Mín	35,7287	92,3239	43,408	39,8461	36,1451	39,8031
Média	-17,4728	-29,7877	-11,486	-12,1082	-12,8714	-20,5758
Desvio Padrão	7,40768	26,2092	8,87369	8,74322	6,89365	9,62641

FIGURA 2. Estatística dos pontos instalados na viga principal 01 a 06, na região do 10º anel. Fonte: Autor (2018).

	07	08
	(Mpa)	(Mpa)
Amostras	411498	411498
Máximo	0,0783339	1,81941
Mínimo	-27,7306	-11,8782
Máx - Mín	27,8089	13,6976
Média	-12,8682	-4,10329
Desvio Padrão	4,67319	2,46383

FIGURA 3. Estatística pontos instalados na viga principal 07 e 08 no 5º anel. Fonte: Autor (2018).

	09	10	11	12
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Amostras	403941	403941	403941	403941
Máximo	7,44435	18,4243	9,47382	13,7968
Mínimo	-3,76012	-1,81733	-4,0049	-7,64667
Máx - Mín	11,2045	20,2416	13,4787	21,4435
Média	2,68135	7,98024	2,12897	1,17695
Desvio Padrão	2,00739	3,76496	2,13304	2,73016

FIGURA 4. Estatística pontos instalados no pórtico articulado 09 a 12. Fonte: Autor (2018).

	13	14	15	16
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Amostras	352713	352713	352713	352713
Máximo	8,87505	7,78496	4,165	4,28744
Mínimo	-4,60862	-5,21172	-5,70768	-4,23679
Máx - Mín	13,4837	12,9967	9,87268	8,52423
Média	2,99255E-7	-4,17832E-7	-2,89719E-7	1,38168E-8
Desvio Padrão	1,26808	1,17745	1,07108	0,862644

FIGURA 5. Estatística dos pontos instalados no pórtico fixo 13 a 16. Fonte: Autor (2018).

	17	18	19	20
	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Amostras	317353	317353	317353	317353
Máximo	10,1082	18,6136	9,50171	19,9166
Mínimo	2,71396	12,8621	2,55112	13,7625
Máx - Mín	7,39425	5,75148	6,95059	6,15409
Média	6,07698	17,3352	5,71236	18,5487
Desvio Padrão	0,583748	0,32703	0,548723	0,349922

FIGURA 6. Estatística pontos instalados no carro da roda de caçambas 17 a 20. Fonte: Autor (2018).

Nas Figuras 7 a 12 tem-se os esquemas de posicionamento 3D dos sensores nos componentes da "Retomadora de Minério". O Acelerômetro ACEL 01 foi orientado de modo que Gx fosse a direção transversal da viga principal e Gy, na direção vertical).

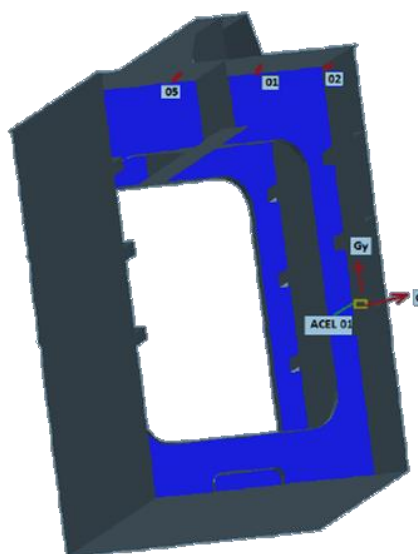


FIGURA 7. Esquema da posição dos sensores na 01, 02, 05 e ACEL 01 no 10º anel da viga principal da "Retomadora de Minério". Fonte: Autor (2018).

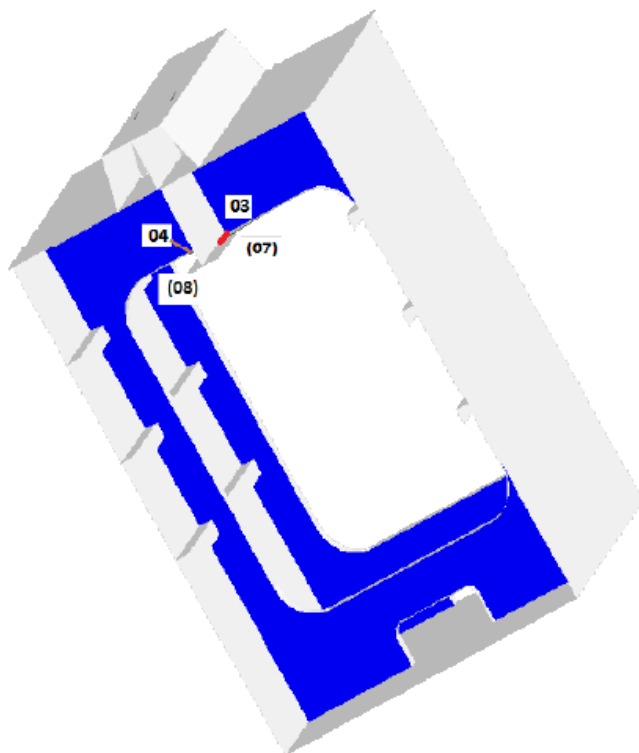


FIGURA 8. Esquema da posição dos sensores 03 e 04 no 10º anel e 07 e 08 no 5º anel. Fonte: Autor (2018).

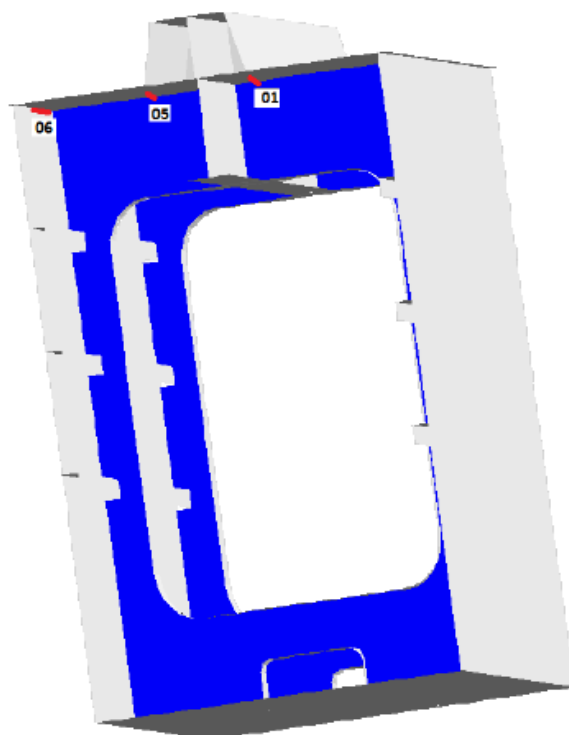


FIGURA 9. Esquema da posição dos sensores 01, 05 e 06 no 10º anel. Fonte: Autor (2018).

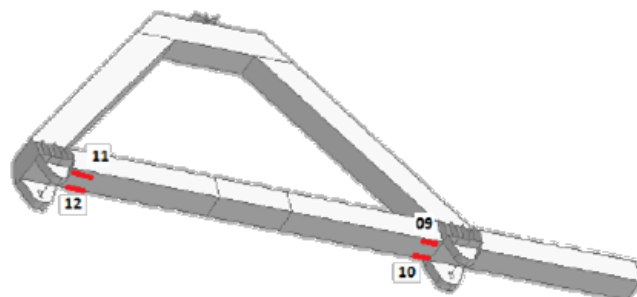


FIGURA 10. Esquema da posição dos sensores 09 a 12 no pórtico articulado da "Retomadora de Minério". Fonte: Autor (2018).

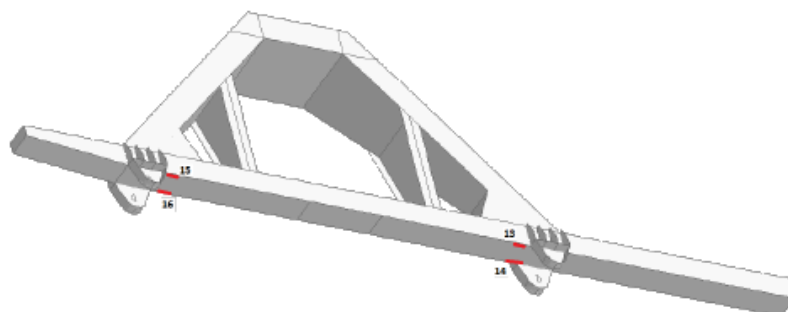


FIGURA 11. Esquema da posição dos sensores 13 a 16 no pórtico fixo. Fonte: Autor (2017).

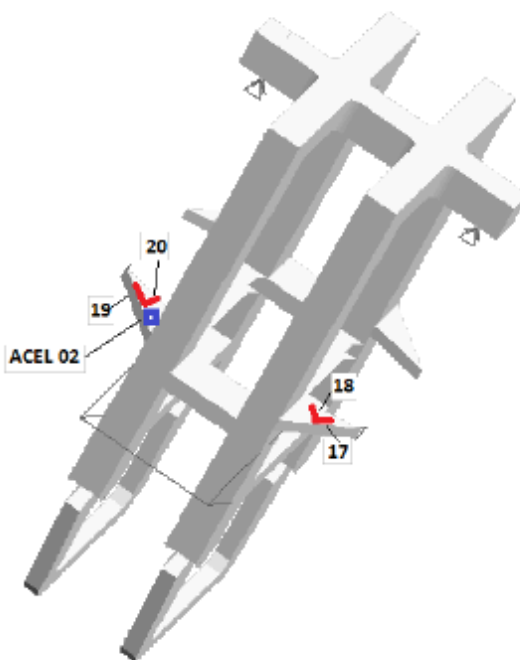


FIGURA 12. Esquema da posição dos sensores 17 a 20 no *trolley* da roda de caçambas. O acelerômetro 02 mede acelerações na direção perpendicular a viga principal). Fonte: Autor (2018).

Com estes testes, foram obtidos os gráficos das Figuras 13 a 19, os quais foram plotadas as tensões em função do tempo de duração dos testes e o espectro de frequências naturais.

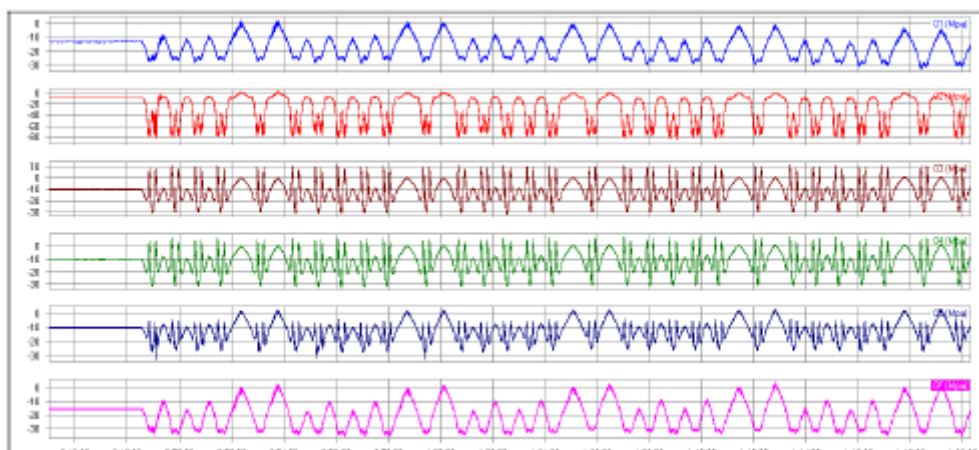


FIGURA 13. Gráficos das tensões medidas nos pontos 01 a 06 na viga principal. Fonte: Autor (2018).

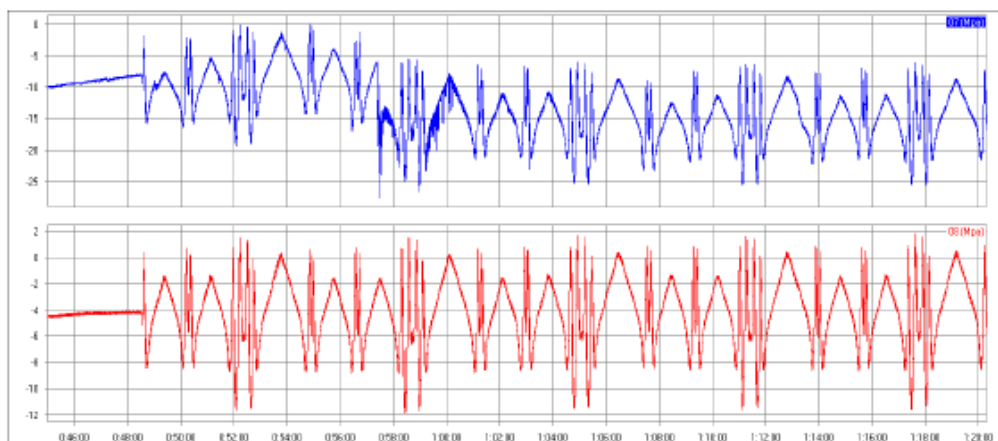


FIGURA 14. Gráficos das tensões medidas nos pontos 07 e 08 na viga principal. Fonte: Autor (2018).

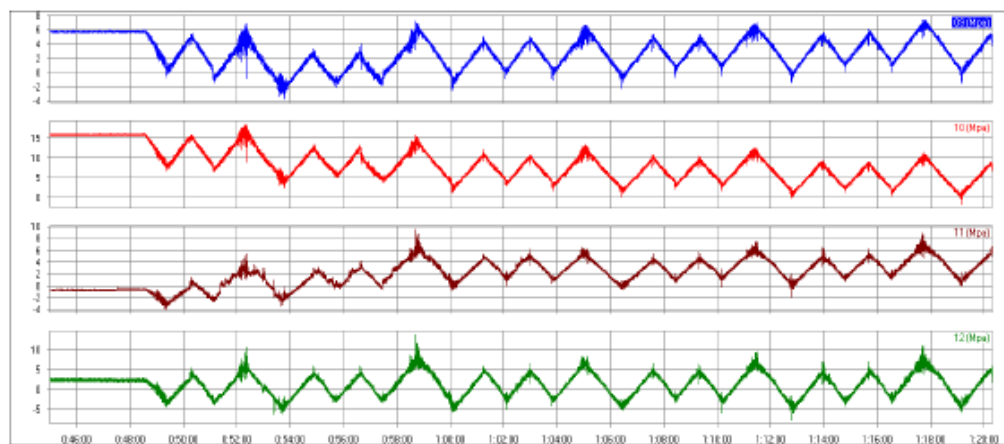


FIGURA 15. Gráficos das tensões medidas nos pontos 09 a 12 no pórtico articulado. Fonte: Autor (2018).

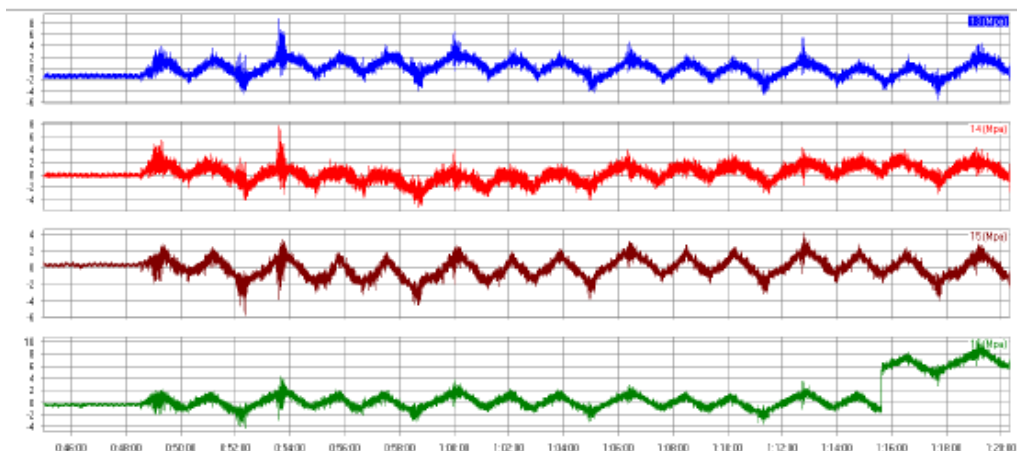


FIGURA 16. Gráficos das tensões medidas nos pontos 13 a 16 no pórtico fixo. Fonte: Autor (2018).

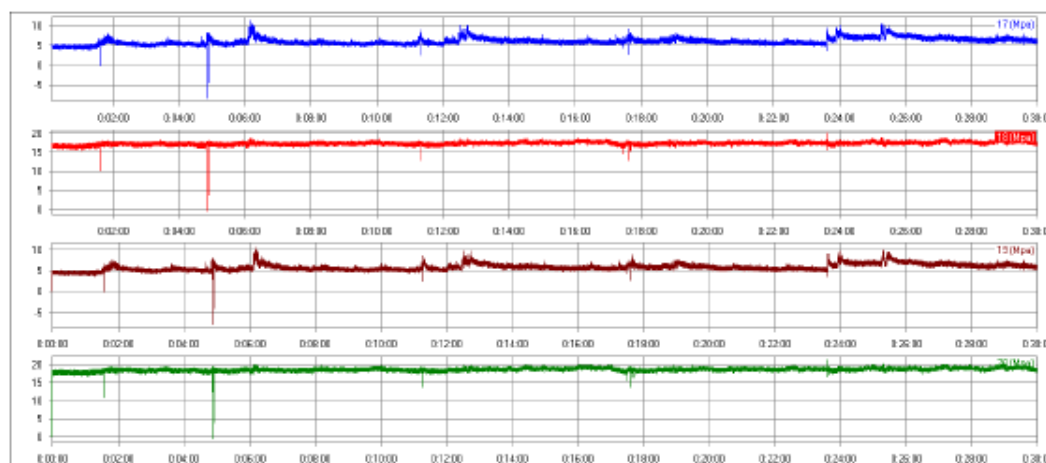


FIGURA 17. Gráficos das tensões medidas nos pontos 17 a 20 no carro da roda de caçambas. Fonte: Autor (2018).



FIGURA 18. Gráficos do espectro de frequências naturais para as direções Gx e Gy do acelerômetro 01 instalado na viga principal. Frequência natural próxima de 8,0 Hz na direção Gy com alto nível de excitação. Fonte: Autor (2018).

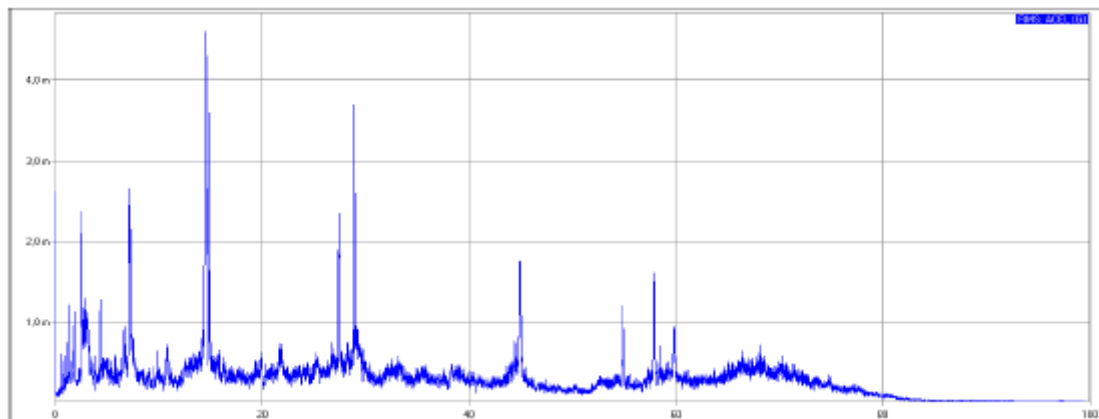


FIGURA 19. Gráficos do espectro de frequências naturais para a direção perpendicular à viga principal, instalado no *trolley*. Indica também uma frequência natural próxima de 8,0 Hz na direção Gy com alto nível de excitação. Fonte: Autor (2018).

Na Figura 20 tem-se o ponto instrumentado na viga principal da "Retomadora de Minério".



FIGURA 20. Exemplo de ponto instrumentado na viga principal da "Retomadora de Minério". Fonte: Autor (2018).

2.4. Análises por Elementos Finitos

2.4.1. Modelagem da estrutura da retomadora de minério

O modelo assumido da "Retomadora de Minério" contempla a viga principal, *trolley* da roda de caçambas, transportador de correia e pórticos em um único bloco.

Como o *trolley* da roda de caçambas movimentada sobre a viga principal, três condições de posição foram efetuadas: *Trolley* no extremo do lado da cabine, pórtico fixo (denominado de INI);

Trolley no meio da viga principal (denominado de MIDI); Carro no extremo oposto ao lado da cabine, pórtico móvel (denominado de EXT). Na Figura 21 tem-se o *trolley* no meio da viga principal (MIDI).

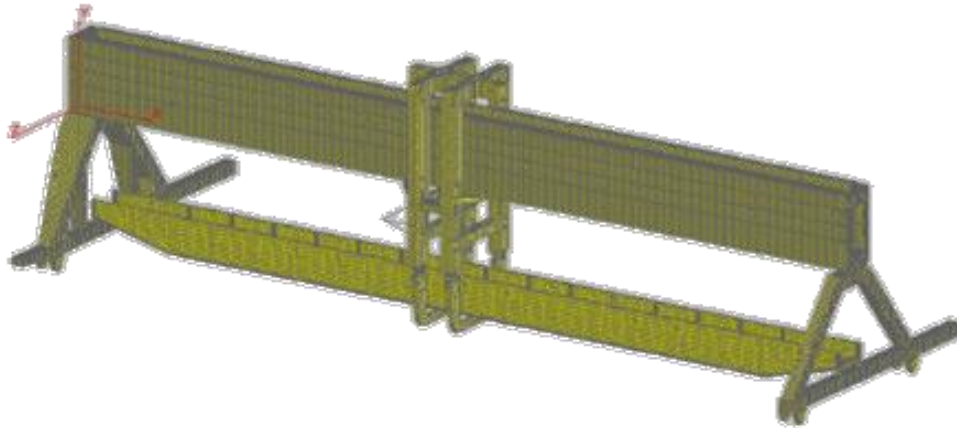


FIGURA 21. Vista isométrica do modelo da "Retomadora de Minério" com a malha de Elemento Finito e com o *trolley* no vão da viga principal (MIDI). Fonte: Autor (2018).

2.4.2. Carregamentos para análises em Elementos Finitos

Como carregamentos, de acordo com a NBR 8400 (1984), estabeleceu-se as situações apresentadas a seguir.

- Caso I - serviço normal sem vento.
- Caso II - serviço normal com vento limite.
- Caso III - fora de serviço com vento máximo.

O equipamento pode operar com carga nominal até a condição de vento limite, que pela NBR 8400 (1984), Tabela VII, é especificado com velocidade de 72 [km/h], gerando uma pressão de 250 [N/m²] sobre a estrutura.

2.5. Comparação e avaliação dos resultados

2.5.1. Comparação entre os valores medidos e obtidos por Elementos Finitos

Para comparação dos valores medidos por extensômetros em tempo real, com os obtidos por Elementos Finitos, recorre-se a uma análise com as mesmas condições das medidas em tempo real. Estas medidas foram repetidas por duas vezes para a aquisição dos sinais, em uma frequência de 200 [Hz] e carga de operação em torno de 960 [t/h]. Na Tabela 2 tem-se a comparação dos resultados.

TABELA 2. Valores de tensões obtidas por extensômetros e Elementos Finitos.

PONTO	TENSÃO MEDIDA (MPa)	TENSÃO POR ELEMENTOS FINITOS (MPa)
01	-35,7	-37,3
02	-92,3	-65,6
03	-43,4	-46,9
04	-39,8	-35,7
05	-36,1	-37,4
06	-39,8	-53,5
07	-27,8	-24,6
08	-13,7	-15,2
09	11,2	14,0
10	20,2	22,5
11	13,5	12,3
12	21,4	24,2
13	13,5	14,9
14	12,9	13,8
15	9,8	11,9
16	8,5	5,5
17	7,4	9,8
18	5,8	9,5
19	6,9	8,5
20	6,2	7,9

Fonte: Autor (2018).

Na comparação das tensões medidas e obtidas por Elementos Finitos, Tabela 2, excetuando os pontos 02 e 06, a média dos desvios foi da ordem de 9,0 %, considerando os valores maiores que 10,0 [Mpa]. Para os valores abaixo de 10,0 [Mpa], os erros tendem a ser maiores devido à forte influência dos problemas de ruídos elétricos nos cabos e aos efeitos aleatórios de antena. Os pontos 02 e 06, provavelmente estão com maiores tensões devido a efeitos localizados de distorções geométricas e/ou trincas na estrutura (inclusive nestas regiões já ocorreram vários reparos na estrutura do equipamento). A Figura 22 ilustra esta situação.

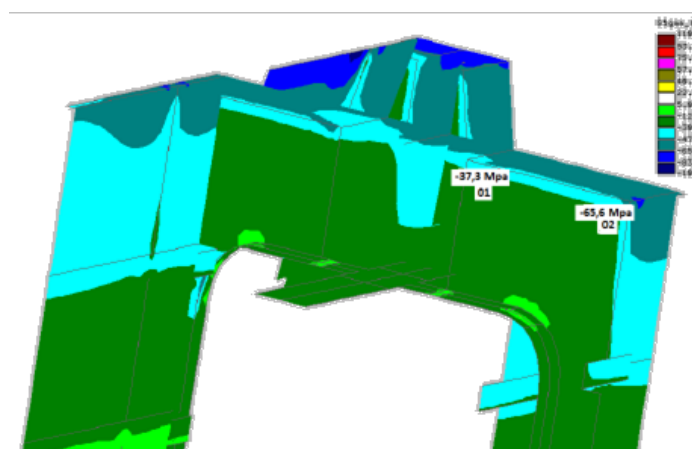


FIGURA 22. Tensões na direção X do modelo, para a condição de medidas em tempo real nos pontos 01 e 02, carga de operação de 960 [t/h]. Fonte: Autor (2018).

2.5. Recomendação de alteração na Retomadora

A região avaliada por fadiga na viga principal apresentou situação crítica e ainda oferece uma grande dificuldade de inspeção devido a ser uma caixa fechada. Esta caixa é denominada de viga trapezoidal, estrutura sobre a viga principal onde é suportada o trilho do *trolley* que realiza o movimento de translação.

Como proposta de aumento da sobrevida da estrutura da atual viga principal, após avaliação de várias alternativas, chega-se a indicada na Figura 23. Uma viga trapezoidal reforçada com nervura, com junção soldada na viga principal

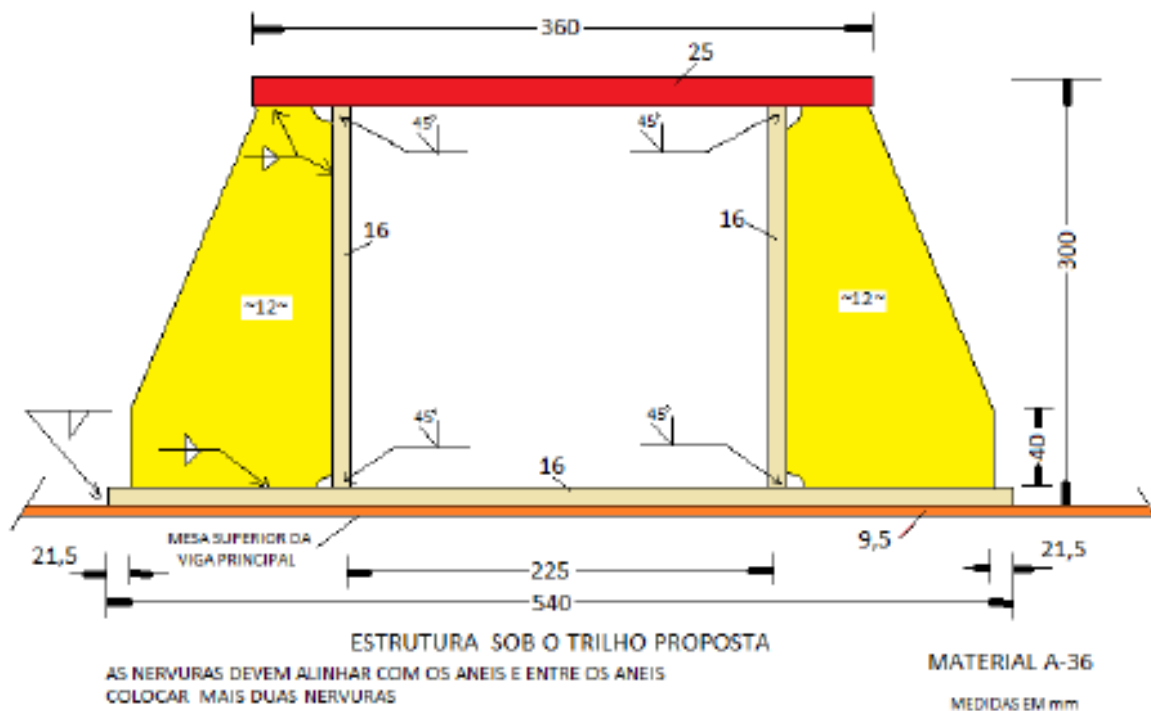


FIGURA 23. Estrutura sob o trilho proposta para reforço da viga principal. Fonte: Autor (2018).

A substituição da viga poderá ser rápida e eficiente com um adequado planejamento. Aconselha-se construir a nova viga integralmente em oficina, o que facilitaria montagem em campo. Em uma parada preventiva da Retomadora para a retirada da viga atual, apoiar o *trolley* solo (não na viga principal).

Retirar todas as partes da viga atual e preparar a mesa superior da viga principal eliminando todas as trincas existentes. Montar a nova trapezoidal, posicionando e alinhando o trilho da mesma forma que se encontra atualmente e reposicionar o *trolley* na nova viga.

3. CONCLUSÕES

A seguir tem-se as conclusões a partir dos resultados medidos, obtidos por Elementos Finitos e avaliados pela NBR 8400 (1984) ou FEM.

O nível de tensões atuante no equipamento na situação atual da estrutura e nas condições nominais de operação de 960 [t/h], tem-se as tensões acima dos valores admissíveis pela Norma Técnica NBR 8400 (1984), Tabela V, Item 6.

As tensões devido ação das rodas guias e apoio do *trolley* e movimento da roda de caçambas na direção transversal na viga trapezoidal são as responsáveis pelas trincas ocorridas ultimamente na parte superior da viga principal que necessitou realizar reforços nos anéis da viga principal.

Devido às altas tensões acima descritas e a fadiga de suporte do trilho sobre a viga trapezoidal, indica dano/ano elevado, o que deverá provocar o surgimento de trincas de forma cada vez mais acelerada.

Pelas conclusões supracitadas, foram alterados os modelos em Elementos Finitos com a instalação de uma nova viga trapezoidal de suporte do trilho, substituindo a atual: Peso total da nova viga proposta de 8,80 [t] e peso da viga atual a ser substituída de 4,70 [t]. Diferença essa, 4,10 [t], que pode mitigar o possível aparecimento e propagação de trincas.

Na "Retomadora de Minério", de acordo com todas as informações obtidas, as cargas fixas e de operação definidas com as análises dos modelos em Elementos Finitos, apresentou: Peso máximo sem operação 229,4 [t]; Peso máximo em operação com 960 [t/h], 236,6 [t]; Máxima reação sem operação (*trolley* estacionado no início próximo do pórtico fixo) no *truck* 91,70 [t] (30,6 [t/roda]); Máxima reação em operação (*trolley* no início da pilha próximo ao pórtico fixo) no mesmo *truck* acima 86,9 [t] (28,9 [t/roda]).

O valor do peso adicionado pela nova viga trapezoidal, representaria apenas cerca de mais 1,025 [t/truque] (0,34 [t/roda]) a mais, o que significa menos de 1,2 %. Desta forma, o sistema de acionamento dos *trucks* não terá sobrecarga.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8400 - Cálculo de equipamento levantamento e movimentação de carga. Rio de Janeiro, ABNT, 1984.

CRANE MANUFACTURERS ASSOCIATION OF AMERICA. CMAA 70 - Specification for Top Running Bridge and Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes. 114 p., CMAA 70, EUA, 1980.



DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica, 2 ed. Rio de Janeiro, 652 p., 1981.

FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION, Section I e Section II - A brief guide for identification of non-compliant Mobile, FEM, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5049-1 - Mobile equipment for continuous handling of bulk materials - Part 1: Rules for the design of steel structures, ISO 5049, EUA 1994.

VALADÃO, G. E. S e ARAÚJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minério, Ed. UFMG, 234p, Belo Horizonte, 2007.

NORTON, R. L. Machine Design, An Integrated Approach, 1048p., EUA, 1998.