



Proceedings of the XXVII Iberian Latin American Congress on
Computational Methods in Engineering
September 3 to 6, 2006 - Belém, Pará - BRAZIL.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STRESS ANALYSIS OF PART OF THE STRUCTURE OF A CONTINUOUS SHIP UNLOADER

Regina Augusta Campos Sampaio¹
Luis Augusto Conte Mendes Veloso¹
Remo Magalhães de Souza¹
Sandro Diord Rescinho Amador¹
Juan Fuentes²
rsampaio@ufpa.br
lveloso@ufpa.br
remo@ufpa.br
diord@ufpa.br
tbrjuf@techint.com.br

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa, 01, 66075-110, Belém - PA - Brasil

²Techint Italmimpianti do Brasil. São Paulo – SP.

Abstract. *This paper presents an investigation on the structural behavior of part of the structure of a continuous ship unloader, which is used to unload bauxite (aluminum ore) from vessels. In the present study, attention was given to a structure component that suffered severe damage due to propagation of large cracks in one of its girders. This component consists of structural closed section cantilevers beams, which are connected to two simply supported box-columns. The objective of the present paper was to determine, numerically and experimentally, the stress in the damaged region of the structure, at four stages: a) before the cracks initiated; b) after the cracks propagated; c) during the retrofit phase; d) after the structure was retrofitted. Some finite element models for each of these stages were created and, for each model, a variety of numerical simulations were carried on, considering different load cases. The experimental analysis were performed using strain gages. It was observed that the experimental results agreed very well with the numerical results, which leads to the conclusion that the experimental data are consistent and that the numerical models were capable of representing the structural behavior with good accuracy. The numerical simulations of the original undamaged structure revealed very high stresses at the positions where the cracks initiated, even when just gravitational loads due to the structure self weight were considered.*

Keywords: *ship unloader, fracture, steel structure, finite elements*

1. Introdução

Problemas estruturais de equipamentos portuários tais como os descarregadores de navios têm sido associados às ações de cargas cíclicas de operação das máquinas, que podem provocar a fadiga do material, e a efeitos da ação do vento sobre estas estruturas como ilustram os trabalhos de Batista et al (2006) e Battista e Carvalho (1998).

A ação do vento pode levar ao deslocamento descontrolado de translação do equipamento sobre o píer. Segundo Batista (2006) acidentes provocados pela ação do vento em descarregadores de navio devem ser evitados com auxílio de sistemas de ancoragem da estrutura do descarregador, adicionais aos sistemas de frenagem hidráulica.

As cargas provenientes das operações de carregamento e descarregamento solicitam a estrutura de aço do descarregador desenvolvendo tensões que devem estar nos limites de segurança do material e dos elementos estruturais. Estas estruturas de aço são normalmente compostas por membros do tipo tubular de seção quadrada ou retangular formados por chapas de aço soldadas, compondo as seções do tipo caixão-soldado, em geral com grande índice de esbeltez local do que resulta a possibilidade da ocorrência de flambagem local nessas peças (Batista et al, 2006). Além disso, a presença de muitos pontos de concentração de tensões agrava a possibilidade de fadiga que pode conduzir à formação de trincas na estrutura.

Neste trabalho apresenta-se, de forma sucinta, a análise de tensões realizadas sobre um componente estrutural (suporte do elevador de caçambas) de um descarregador contínuo de navios, pertencente a uma empresa ligada ao setor de mineração. Uma apresentação mais completa do estudo é feita por Veloso et al (2005).

2. Descrição da Estrutura do Descarregador de Navios e dos Danos Observados

A estrutura principal do descarregador de navios analisado é formada por elementos estruturais metálicos produzidos com chapas e tubos de aço tipo ASTM-A572 Gr 50, com tensão de escoamento, f_y , igual a 345 MPa, e tensão de ruptura, f_u , igual a 450 MPa. Os principais componentes estruturais são: truques de apoio, mesa, mastro, balancim para suporte do contrapeso, tirante, lança, e elevador de caçambas (Figura 1).

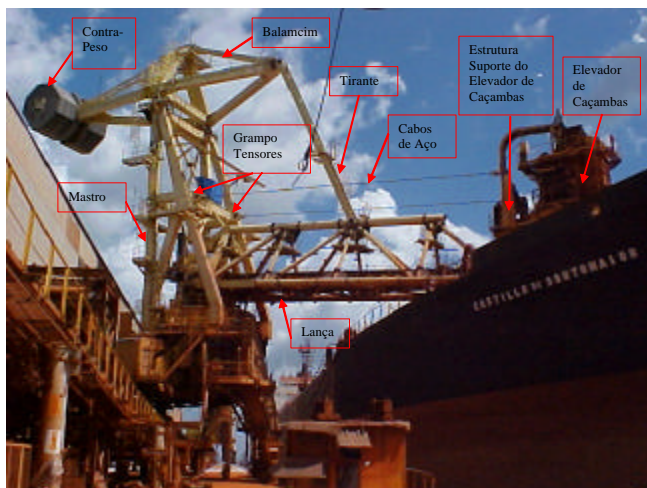


Figura 1 – Vista geral do descarregador de navio



Figura 2 - Estrutura de suporte do elevador de caçambas do descarregador de navio (lado direito, face externa)

A estrutura do suporte do elevador de caçambas é composta por elementos estruturais de aço que formam vigas caixão em balanço, conectadas a duas colunas, também em seção caixão, apoiadas nas extremidades (ver elemento destacado em verde na Figura 2).

Nos desenvolvimentos seguintes utiliza-se a seguintes nomenclatura para identificar as regiões de interesse: viga do lado direito/esquerdo, face externa/interna. Por exemplo, a Figura 2 mostra a face externa da viga do lado direito.

Em março de 2005, foram observadas, na viga do lado direito da estrutura de suporte do elevador de caçambas, várias trincas com grande comprimento e abertura pronunciada conforme apresentado na Figura 3. Pode-se perceber pelas dimensões das trincas, que os danos ocorridos eram bastante preocupantes, o que levou a uma interrupção da máquina, para que os devidos reparos e reforço da estrutura fossem realizados.

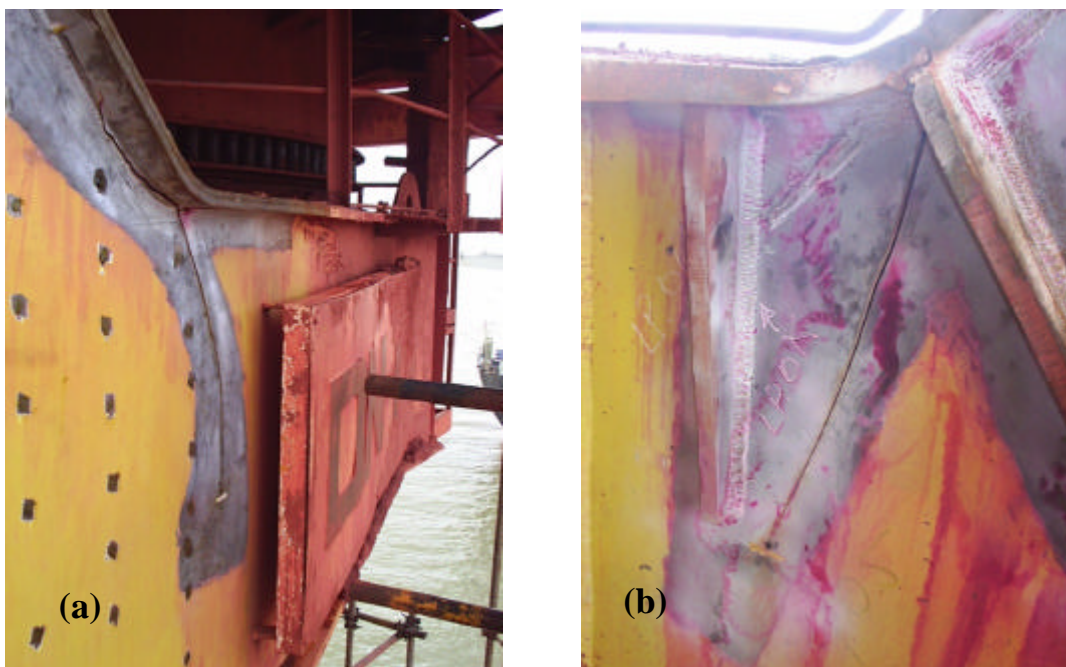


Figura 3 – (a) Trinca na alma da “face externa” da viga do lado direito da estrutura de suporte.
(b) Vista da trinca na alma da “face interna” do lado direito da estrutura de suporte

3. Metodologia

Foram elaborados diversos modelos computacionais por Elementos Finitos da estrutura do suporte do elevador de caçambas utilizando o programa *Ansys* (SAS IP, 1995). Para cada modelo desenvolvido, várias simulações computacionais foram realizadas, para determinação de tensões e deformações na região do problema, antes do surgimento das trincas, depois do surgimento das mesmas, e após a execução do reforço. Os modelos elaborados e as simulações computacionais desenvolvidas são apresentados a seguir.

3.1. Modelos de Elementos Finitos

A geometria da estrutura foi obtida por meio dos projetos fornecidos pela empresa proprietária do equipamento. Em função da grande complexidade da estrutura, foi desenvolvido inicialmente um modelo geométrico tridimensional no programa *AutoCAD*. Feito isto, foi desenvolvido um *software* em *VisualBasic* que permitiu exportar os dados referentes à geometria do programa *AutoCAD* para o programa *Ansys*, para permitir a análise da estrutura através do Método dos Elementos Finitos.

Utilizando o sistema de referência mostrado na Figura 4, as condições de apoio empregadas nos modelos computacionais foram: deslocamentos impedidos apenas na direção x nas rótulas superiores (topo das colunas), simulando as condições de apoio proporcionadas pelos cabos de aço do sistema pantográfico; e nas rótulas inferiores, deslocamentos impedidos nas direções x , y e z , simulando as condições de apoio dos nós da treliça espacial da lança.

Os modelos elaborados são formados por elementos de casca com comportamento linear. O elemento escolhido para modelagem no programa *Ansys* foi o SHELL63. Este elemento tem seis graus de liberdade em cada nó, sendo três translações e três rotações em torno dos eixos cartesianos.

A estrutura foi modelada considerando-se três situações, a saber:

- Modelo M1 - modelo da estrutura original íntegra (sem a presença das trincas).
- Modelo M2 - modelo da estrutura danificada (com a presença das trincas)
- Modelo M3 - modelo da estrutura recuperada (sem a presença das trincas, e com reforço)

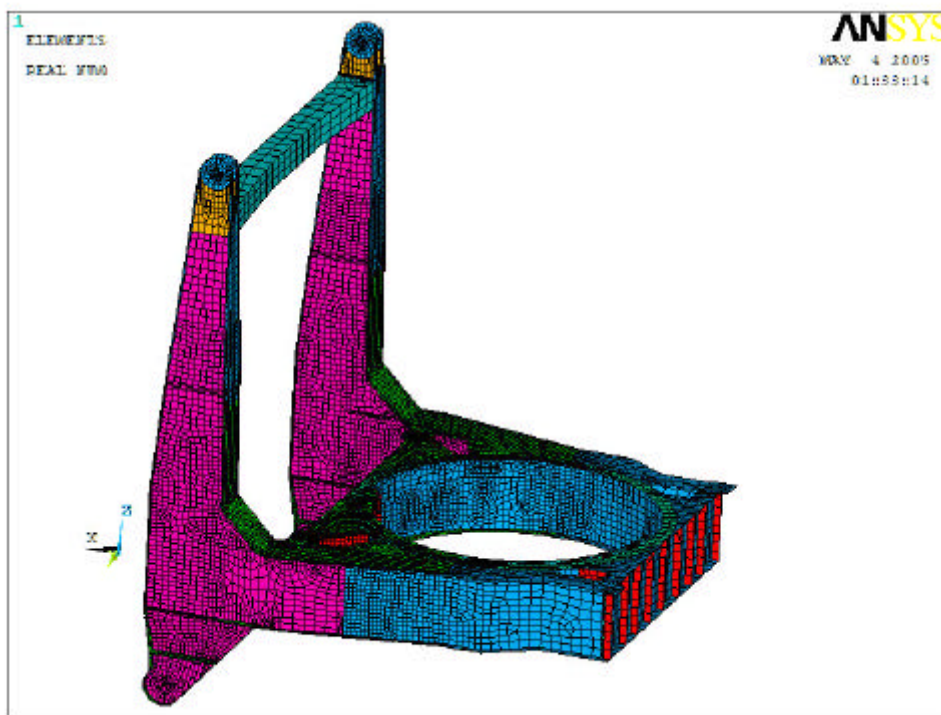


Figura 4 – Modelo M1: estrutura original íntegra (sem a presença das trincas)

Para a criação do Modelo M2, as trincas foram mapeadas na estrutura original utilizando-se transparências (Figura 5), as quais foram posteriormente processadas em *scanner*, digitalizadas, e finalmente introduzidas no modelo. A geometria das trincas foi definida de forma bastante precisa, introduzindo-as no modelo na configuração indeformada (com abertura nula, ou seja, com as trincas “fechadas”). Isto foi feito criando-se elementos vizinhos com arestas adjacentes independentes na face da trinca, porém posicionados lado a lado simulando uma junta fechada. Esta idéia foi utilizada para verificar se, após a aplicação do carregamento, as aberturas das trincas obtidas no modelo seriam iguais às medidas *in loco*, o que foi comprovado, posteriormente, conforme descrição abaixo.

O reforço construído na estrutura foi proposto pela empresa proprietária do equipamento e consistiu no aumento da seção da viga, através da fixação de chapas na parte inferior conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 5 – Mapeamento das trincas para posterior inclusão no modelo pelo MEF



Figura 6 - Reforço construído na parte inferior da viga caixão

Para possibilitar o reparo da estrutura (recuperação das chapas trincadas e instalação do reforço) em um pequeno espaço de tempo, foi necessário proporcionar um alívio de tensões na estrutura, sem desmontá-la. Para isto utilizou-se um dispositivo tensor, o qual permitiu a aplicação de cargas reversas na estrutura, por meio da utilização de cilindros hidráulicos, de forma a aliviar as tensões devidas às cargas gravitacionais, permitindo que o reforço pudesse entrar em carga após sua introdução na estrutura (Figura 7).

3.2. Descrição do Carregamento

Nas simulações computacionais foram considerados os seguintes casos de carga estática:

- Caso C1 – peso próprio. Este carregamento foi levado em conta através da especificação da massa específica do aço de 7.850kg/m^3 e aceleração da gravidade igual a $9,81\text{ m/s}^2$.
- Caso C2 - peso do elevador de caçambas. Este carregamento foi aplicado como uma pressão atuante na chapas da mesa superior da viga caixão circular que apóia o elevador de caçambas. O valor total da carga considerada para o elevador de caçambas foi de 215 tf.

- Caso C3 – carregamento do dispositivo tensor. Esta carga foi aplicada como duas forças nodais concentradas com sentidos opostos, com valor máximo de 103 tf (tração), conforme ilustra a Figura 8.
- Caso C4 – descarregamento do dispositivo tensor. A retirada da carga foi simulada como duas forças nodais concentradas com sentidos opostos, com valor máximo de 55 tf (compressão).



Figura 7 – Dispositivo tensor instalado na estrutura para alívio de tensões

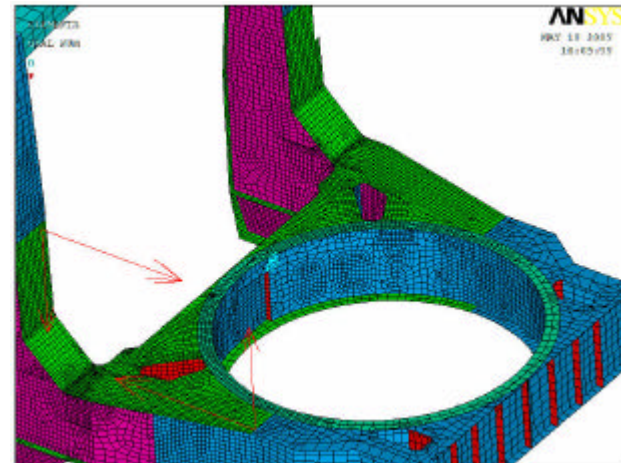


Figura 8 - Carga aplicada para simular o carregamento do dispositivo tensor

3.3. Simulações Computacionais Realizadas

Definidos os modelos e carregamentos apresentados acima, foram realizadas simulações computacionais, conforme descrição na Tabela 1. A Simulação S4 foi realizada somente com a carga do tirante aplicada para comparação com os resultados experimentais, uma vez que as deformações medidas através dos extensômetros correspondem apenas a variação de tensão nos pontos monitorados, ou seja, não incluem as deformações iniciais devido às cargas gravitacionais.

Tabela 1 – Simulações Computacionais Realizadas

Simulação	Modelo	Casos de carga
S1	Modelo M1 - estrutura original íntegra (sem trincas)	Caso C1 - Peso próprio Caso C2 - Peso do elevador de caçambas
S2	Modelo M2 – estrutura danificada (com trincas)	Caso C1 - Peso próprio Caso C2 - Peso do elevador de caçambas
S3	Modelo M2 – estrutura danificada (com trincas)	Caso C1 - Peso próprio Caso C2 - Peso do elevador de caçambas Caso C3 – Carregamento do dispositivo tensor (103 tf)
S4	Modelo M2 – estrutura danificada (com trincas)	Caso C3 – Carregamento do dispositivo tensor (103 tf)
S5	Modelo M3- estrutura sem trinca e com reforço	Caso C4 – Descarregamento. do dispositivo tensor (-55tf)
S6	Modelo M3 – estrutura sem trinca e com reforço	Caso C1 - Peso próprio Caso C2 - Peso do elevador de caçambas

3.4. Extensometria – Posição dos extensômetros

Foram instalados extensômetros elétricos em duas etapas distintas. A Figura 9 ilustra a localização destes extensômetros na primeira etapa de extensometria - anterior à execução dos reparos e reforço; cujos resultados são utilizados para comparações com os resultados numéricos a serem apresentados neste trabalho.

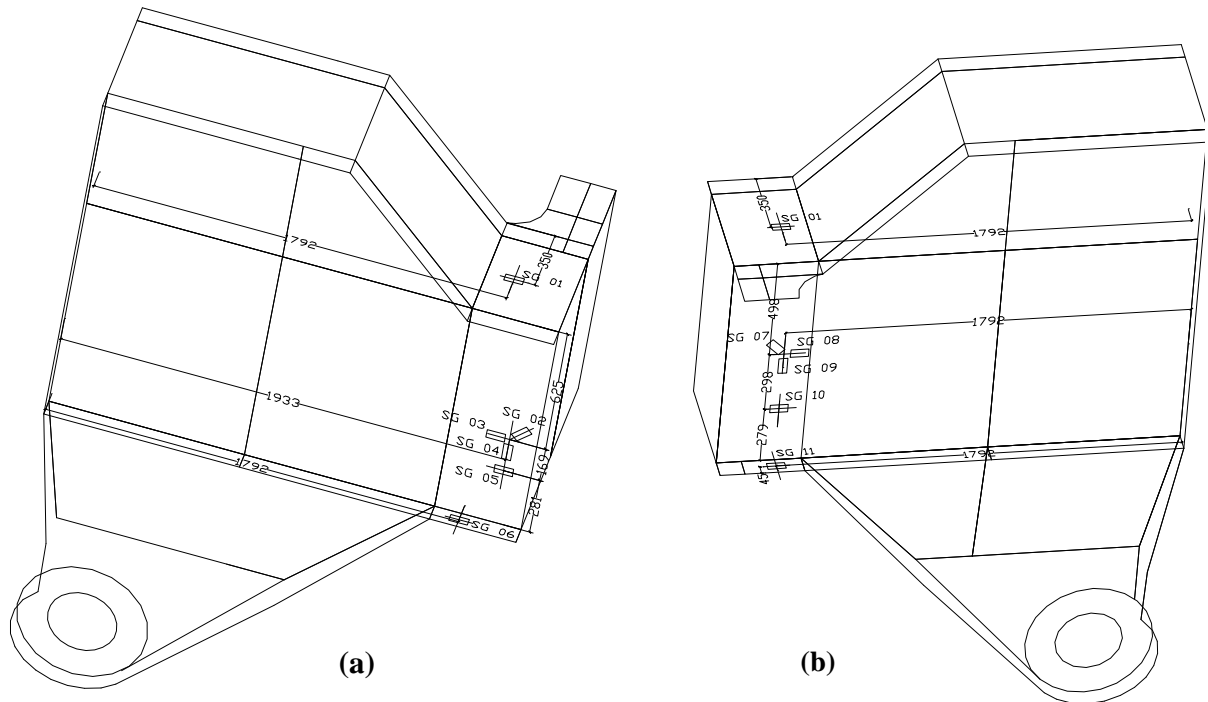


Figura 9 - Configuração da extensometria. a) lado direito externo. b) lado direito interno

4. Resultados e discussão

4.1. Simulação S1 – Estrutura original íntegra submetida a cargas gravitacionais

Nesta simulação foi feita uma avaliação dos níveis de tensão na estrutura original, antes da formação da trinca. Na Figura 10 tem-se as isofaixas das tensões normais σ_{xx} (na direção do eixo x , ou seja, na direção do eixo da viga). Observa-se que na mesa superior os valores de tensão de tração são bastante elevados. O valor máximo é aproximadamente igual a 302 MPa. Considerando que a tensão de escoamento do aço utilizado é igual a 345 MPa e a tensão de ruptura igual a 450 MPa, pode-se inferir que somente o carregamento estático, mesmo sem a consideração de coeficientes de segurança, provoca tensões muito próximas das tensões limites do material. Levando-se ainda em conta as cargas de operação da máquina e o efeito de fadiga no material, facilmente os níveis de tensão provocam o surgimento de trincas nestas regiões. Observa-se a ocorrência de tensões elevadas também no lado esquerdo da estrutura indicando outro ponto crítico, onde atualmente já se observa, na estrutura real, a presença inicial de trincas.

As Figuras 11 e 12 apresentam os diagramas de tensões e deformações normais, respectivamente, na seção transversal da viga que foi instrumentada com extensômetros elétricos, correspondente à região onde ocorreram as trincas. Os gráficos apresentam, no eixo das abscissas, a distância em relação à mesa inferior, e no eixo das ordenadas, os valores das deformações ou tensões normais. Observa-se o comportamento de tração da mesa superior e compressão na mesa inferior.

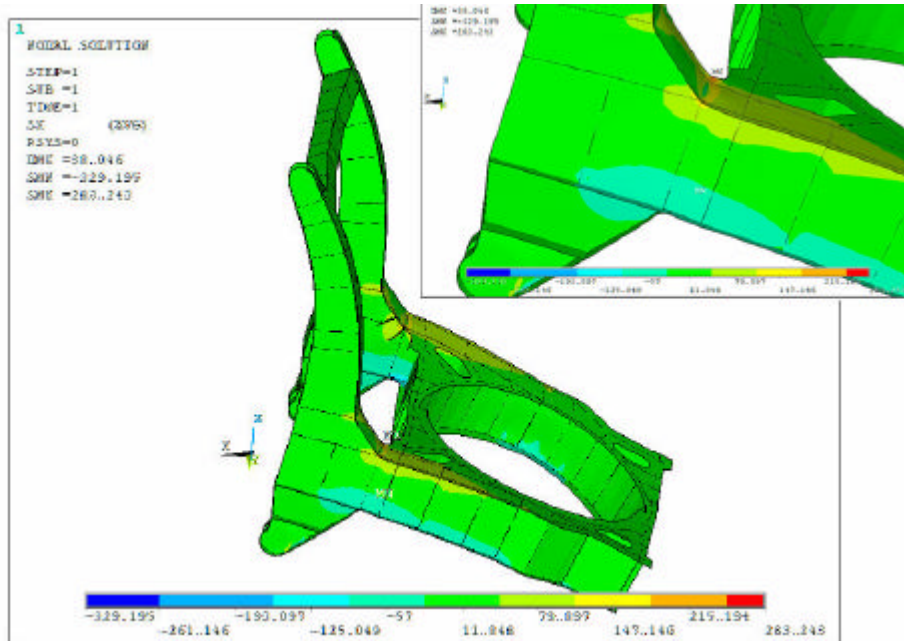


Figura 10 – Isofaixas de tensões na direção x (s_{xx}). Detalhe para a região de ocorrência das tensões máximas e mínimas. – simulação S1

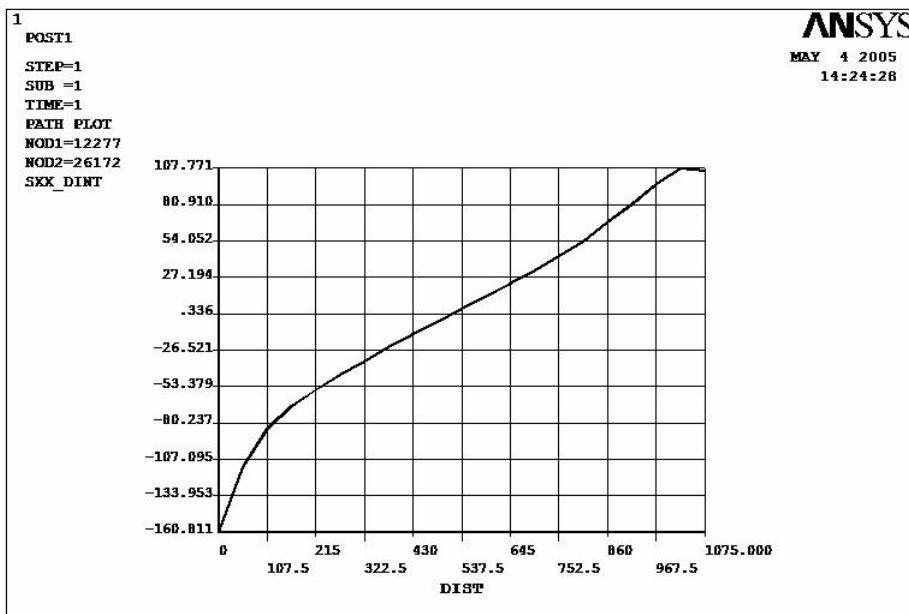


Figura 11 – Diagrama de tensões em uma seção transversal na posição dos extensômetros - viga no lado direito interno – simulação S1

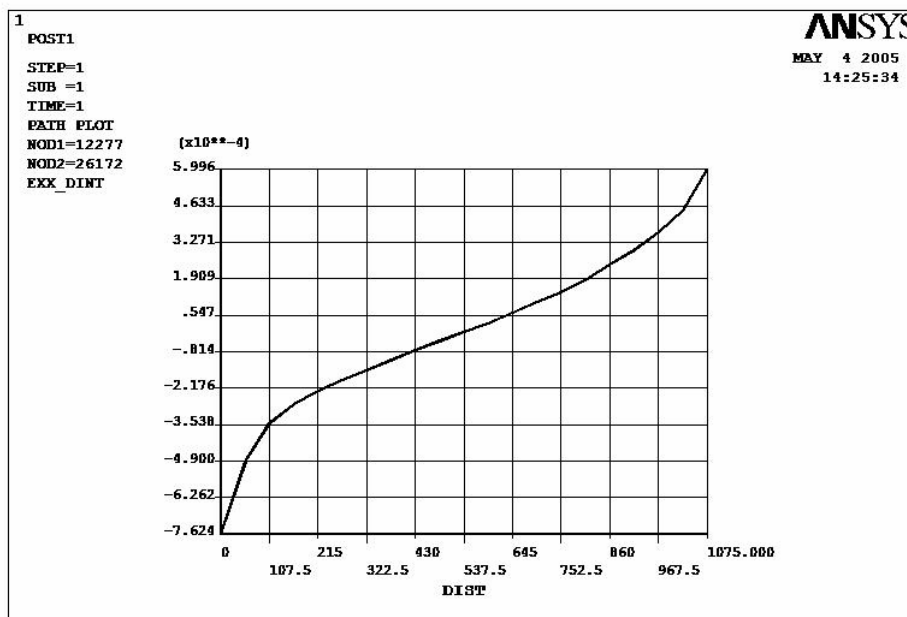


Figura 12 -Diagrama de deformações em uma seção transversal na posição dos extensômetros - viga no lado direito interno – simulação S1

4.2. Simulação S2 – Estrutura danificada submetida a cargas gravitacionais

Nesta simulação foi feita uma avaliação dos níveis de tensões na estrutura danificada (após a introdução das trincas no modelo) quando a estrutura está submetida apenas ao peso próprio e o peso do elevador de caçambas.

Com a aplicação da carga, foi possível simular a abertura da trinca, para comparar com a abertura mapeada *in loco*. Como resultado da simulação computacional, obteve-se uma abertura máxima da trinca igual a 3,77 mm nos lados interno e externo, correspondendo a um valor próximo ao valor de 4 mm medido na trinca real. Nas Figuras 13 e 14 observa-se a abertura das trincas no lado externo e interno e a nova configuração de tensões alcançada pela estrutura com a presença de concentração de tensões na ponta da trinca.

4.3. Simulação S3 – Estrutura danificada submetida à carga gravitacional e carregamento do dispositivo tensor

Nesta simulação, foi avaliado o comportamento da estrutura danificada com a aplicação da carga no tirante no valor de 103 tf, conforme indicado na Tabela 1, considerando também as cargas gravitacionais (peso próprio e peso do elevador).

Esta combinação foi utilizada para certificar que não haveria um aumento das tensões de compressão na parte inferior da alma da viga, durante a aplicação da carga do dispositivo tensor. Desta forma, a análise serviu de auxílio na determinação da carga máxima que foi aplicada no dispositivo tensor, importante para que a operação fosse realizada com segurança.

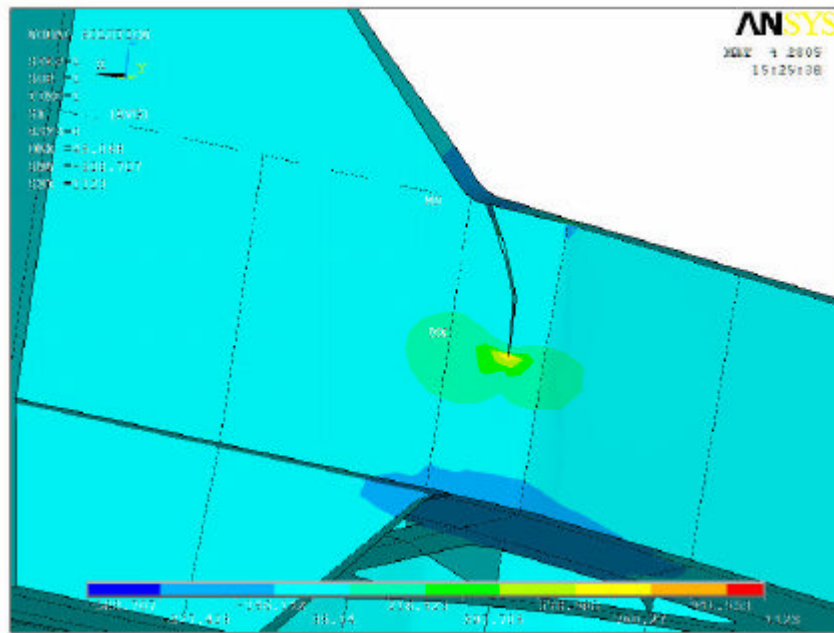


Figura 13 – Isofaixas de tensões na direção x (s_{xx}) – lado direito externo – simulação S2

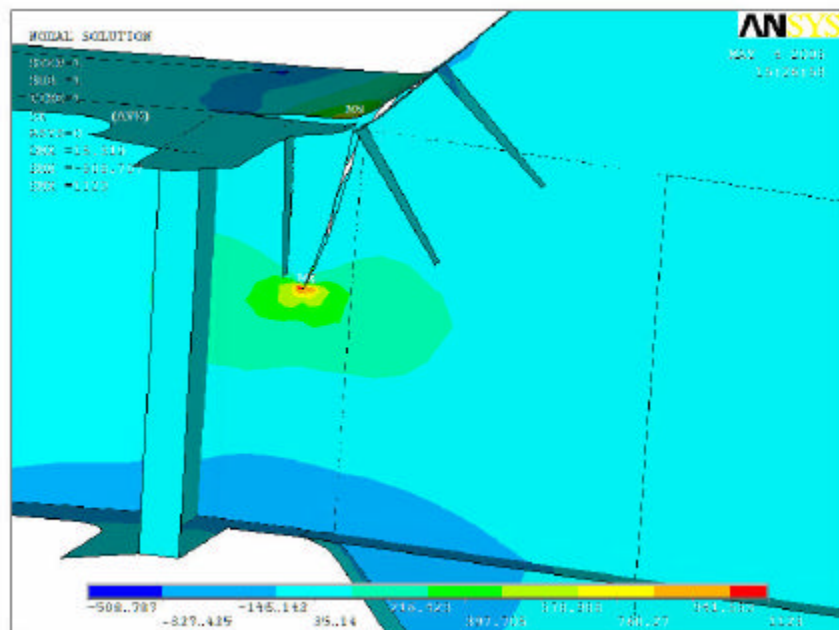


Figura 14 – Isofaixas de tensões na direção x (s_{xx}) – lado direito externo– simulação S2

As cargas gravitacionais provocam tensão de compressão na parte inferior da viga e tensões de tração na parte superior. Este efeito foi compensado pela carga do dispositivo tensor resultando em tensões entre -77 MPa e 1,4 MPa, com exceção da região na ponta da trinca onde as tensões alcançam 158 MPa (Figura 15).

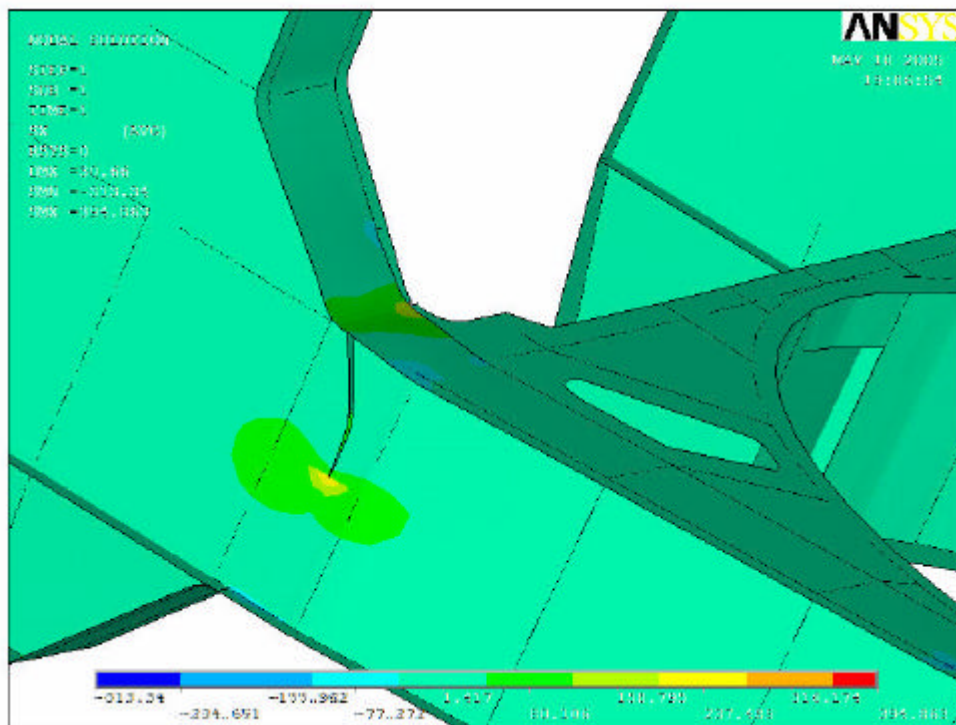


Figura 15 - Isofaixas de tensões (s_{xx}) – simulação S3

4.4. Simulação S4 – Estrutura danificada submetida ao carregamento do dispositivo tensor

Nesta simulação foi utilizado o modelo da estrutura danificada submetida apenas ao carregamento do dispositivo tensor (sem considerar as cargas gravitacionais) para que as deformações obtidas nesta análise pudessem ser comparadas com os dados coletados na instrumentação feita durante a aplicação da carga do dispositivo tensor, já que com os extensômetros não é possível se obter as deformações já presentes devido ao peso da estrutura.

A Figura 16 mostra o diagrama de tensão obtido na seção instrumentada no lado direito externo da estrutura.

4.5. Simulação S5 - Estrutura reforçada submetida ao descarregamento do dispositivo tensor

Nesta etapa considerou-se a retirada da carga aplicada no dispositivo tensor após a reparação das trincas e construção do reforço na parte inferior da viga do lado direito. No entanto, no decorrer dos procedimentos de reparo e reforço da estrutura, o dispositivo tensor perdeu aproximadamente 50% da carga. Desta forma, o descarregamento monitorado e simulado computacionalmente corresponde a uma carga de 55 tf. Observou-se o valor máximo de 16 MPa na mesa superior no lado direito interno e o valor mínimo de -18 MPa no encontro do reforço com a mesa inferior da viga caixão.

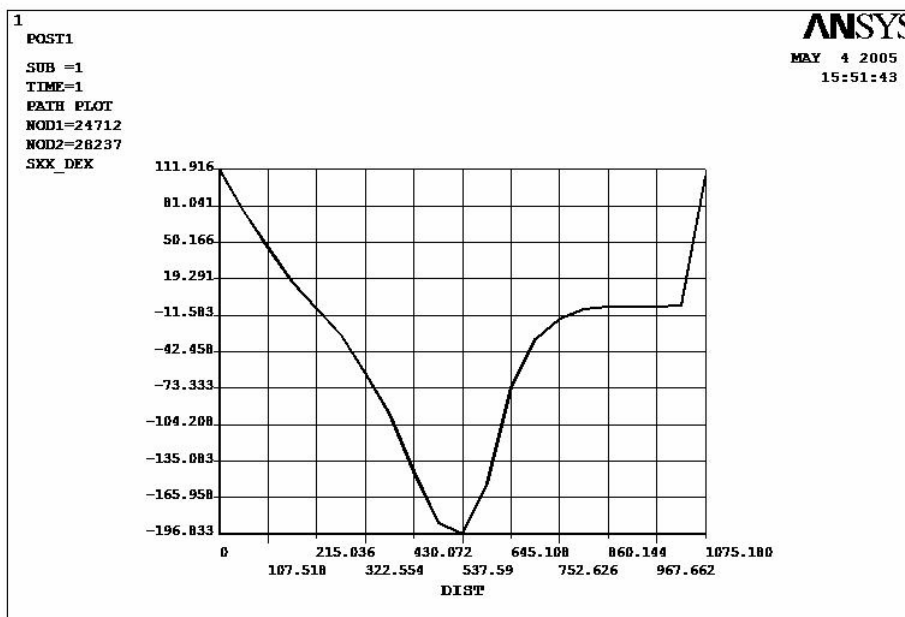


Figura 16 – Distribuição de tensões S_{xx} na mesma seção transversal que está instrumentada – lado direito externo. – simulação S4

4.6. Simulação S6 - Estrutura com reforço submetida à carga gravitacional

Nesta etapa foi possível avaliar o comportamento da estrutura reforçada submetida aos carregamentos estáticos. Nas Figuras 17 e 18 são apresentadas as isofaixas de tensão S_{xx} com detalhes do lado direito interno e reforço. As principais observações são:

- As distribuições de tensões nos lados esquerdo e direito, são semelhantes. No entanto, os valores máximos e mínimos ocorrem no lado direito;
- O reforço está trabalhando a compressão com valor de tensão entre -55MPa e -150MPa;
- Ainda há uma concentração de tensões de tração na mesma posição onde a trinca foi iniciada, onde ocorre o valor de tensão igual a 280 MPa (Figura 18), correspondendo a uma redução de cerca de 7%, quando comparado ao valor máximo de 302MPa obtido no modelo íntegro original (sem reforço);
- Em função da construção do reforço, de um modo geral, as simulações indicam uma redução das tensões de tração em regiões mais afastadas do ponto de concentração de tensões, na mesa superior e na alma do lado esquerdo e direito, de cerca de 15%.

4.7. Comparações entre os resultados computacionais e experimentais

Foram realizadas comparações entre os resultados obtidos através das simulações computacionais e os obtidos experimentalmente. Para isso, foi considerada a fase de aplicação de carga na estrutura, utilizando-se o modelo S4, com trincas, e a disposição dos extensômetros mostrados na Figura 9. Nas Figuras 19 e 20 são mostradas as deformações na direção longitudinal e_{xx} ao longo da seção do lado direito da estrutura, nas faces externa e interna, respectivamente.

No caso do lado direito (Figura 19), foram consideradas duas seções para a apresentação das deformações da simulação computacional, uma vez que para essa configuração de instrumentação os extensômetros SG03 e SG05 estão posicionados na seção vertical que coincide com o final da trinca.

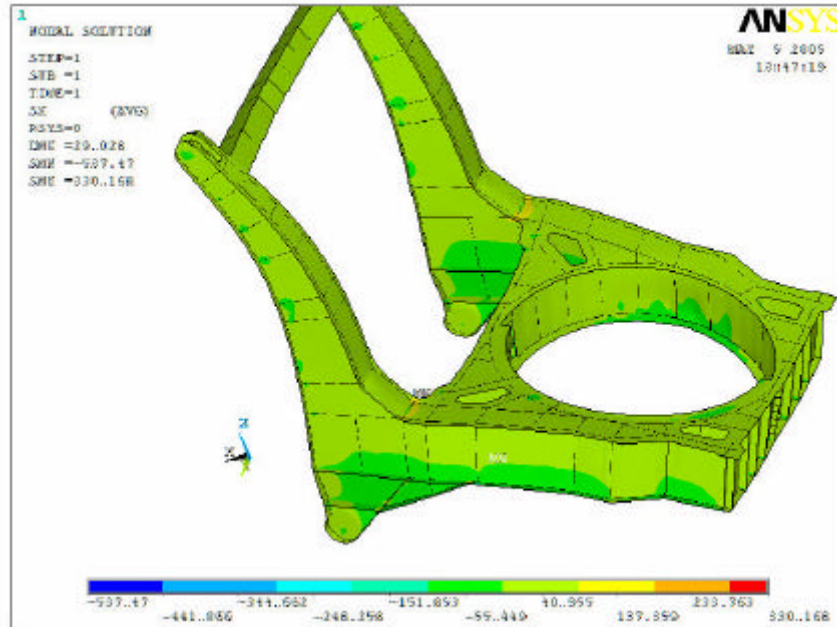


Figura 17 - Isofaixas de tensões S_{xx} – simulação S6

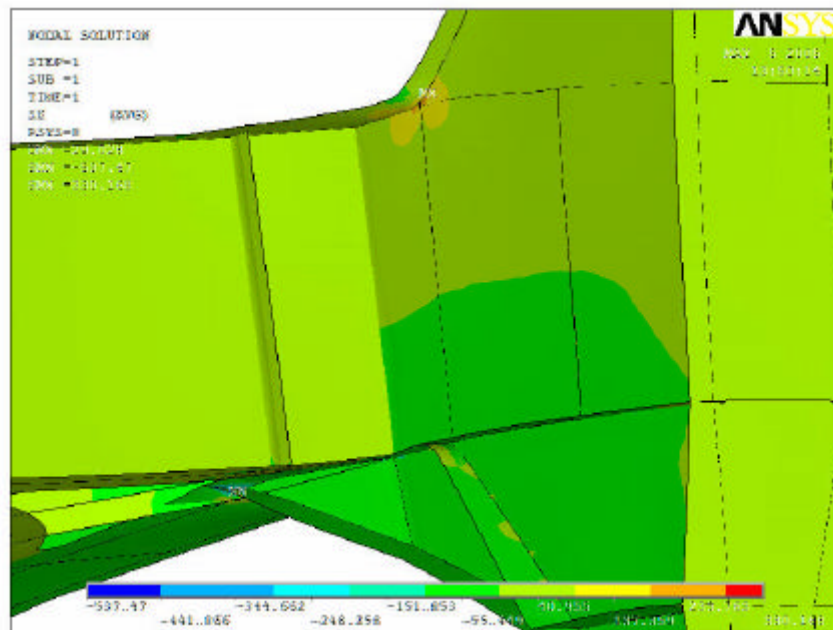


Figura 18 - Isofaixas de tensões S_{xx} – detalhe das tensões no lado direito interno – simulação S6

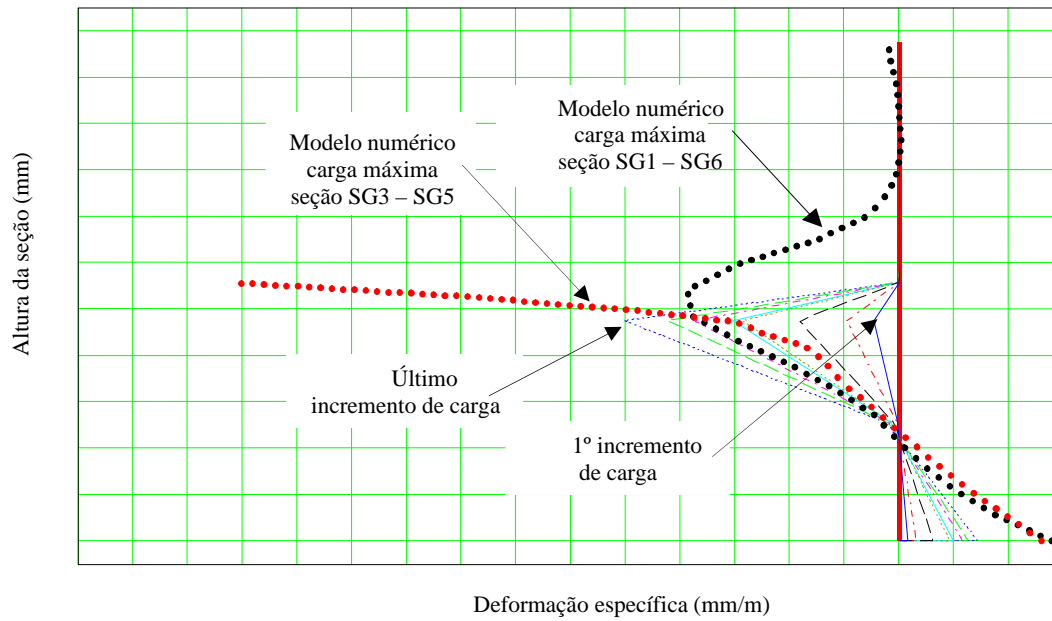


Figura 19 – Deformação e_{xx} ao longo da seção – lado direito externo

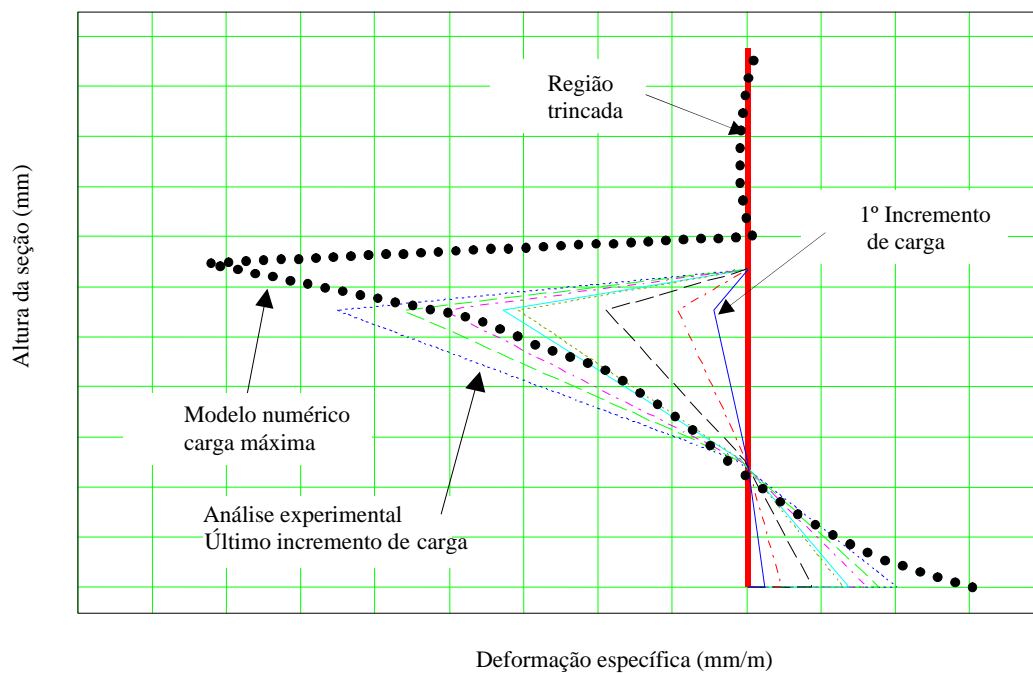


Figura 20 – Deformação e_{xx} ao longo da seção – lado direito interno

Nas Tabelas 2 a 4 estão apresentadas comparações entre os valores das tensões obtidas através das simulações computacionais e as medidas experimentalmente, para os lados direito externo e interno e esquerdo externo, respectivamente.

Tabela 2 - Comparação dos valores de tensões na roseta, lado direito externo

Resultados	Força no tirante (tf)	Tensão (MPa)					
		S _x (MPa)	S _y (MPa)	t _{xy} (MPa)	S ₁ (MPa)	S ₂ (MPa)	S _{V_M} (MPa)
Experimental	103,9	-265,8	-199,7	Defeito no extensômetro a 45°			
Numérico	103,9	-223,2	-82,0	26,9	-77,0	-228,1	201,0

Tabela 3 - Comparação dos valores de tensões na roseta, lado direito interno

Incrementos de carga	Força no tirante (tf)	Tensão (MPa)					
		S _x (MPa)	S _y (MPa)	t _{xy} (MPa)	S ₁ (MPa)	S ₂ (MPa)	S _{V_M} (MPa)
Experimental	103,9	-293,3	-221,9	26,6	-213,1	-302,1	268,9
Numérico	103,9	-291,4	-258,5	68,5	-204,6	-345,4	300,8

Tabela 4 - Comparação dos valores de tensões na roseta, lado esquerdo externo

Incrementos de carga	Força no tirante (tf)	Tensão (MPa)					
		S _x (MPa)	S _y (MPa)	t _{xy} (MPa)	S ₁ (MPa)	S ₂ (MPa)	S _{V_M} (MPa)
Experimental	103,9	-22,6	-10,6	6,3	-7,9	-25,3	22,4
Numérico	103,9	-17,8	-9,8	10,5	-2,6	-25,0	23,8

A análise das Figuras 19 e 20, e das Tabelas 2 a 4 levam à conclusão de que os resultados obtidos experimentalmente apresentaram-se próximos dos obtidos através das simulações computacionais. Desta forma, verifica-se que os dados experimentais obtidos são consistentes e que os modelos numéricos utilizados são capazes de representar o comportamento da estrutura com boa precisão.

5. Conclusões

Das simulações realizadas pode-se fazer as seguintes observações:

- Ainda há uma concentração de tensões de tração na mesma posição onde a trinca foi iniciada, onde ocorre o valor de tensão igual a 280 MPa, correspondendo a uma redução de cerca de 7%, quando comparado ao valor máximo de 302MPa obtido no modelo íntegro original (sem reforço);
- Em função da construção do reforço, de um modo geral, as simulações indicam uma redução das tensões de tração em regiões mais afastadas do ponto de concentração de tensões, na mesa superior e na alma do lado esquerdo e direito, de cerca de 15%.
- Cabe destacar que a realização da primeira simulação computacional (do modelo íntegro original com carga gravitacional) teria sido suficiente para antever o problema de surgimento das trincas no equipamento, auxiliando de forma muito eficaz o programa de manutenção da empresa. Sabe-se que uma inspeção visual completa do descarregador de navio consiste em um trabalho muito árduo, já que toda a máquina precisa ser limpa, e vários detalhes precisam ser verificados. A primeira simulação computacional teria

previsto facilmente o problema, localizando facilmente o ponto crítico a ser inspecionado com atenção, e dando condições à empresa de se programar com antecedência para uma intervenção de forma mais apropriada.

- Os resultados obtidos experimentalmente apresentaram-se próximos dos obtidos por meio das simulações computacionais, Figuras 19 e 20 e Tabelas 3 a 5. Desta forma, verifica-se que os dados experimentais obtidos são consistentes e que os modelos numéricos utilizados são capazes de representar o comportamento da estrutura com boa precisão.

6. Bibliografia

BATISTA, E. DE M., DUTRA, M. S., LOREDO-SOUZA, A. M., OLIVEIRA, T. J. L. (2006) “Acidente estrutural com descarregador de minério causado por forças devidas ao vento”. **Rev. Int. de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil**. Vol. 5(2) pp103-120

BATTISTA, R. C. E CARVALHO, E. M. L. (1998). “Structural repair and strengthening of the steel structures of ship unloaders”. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Building**, Vol. 128, pp. 368-375.

SAS IP (Ansys, Inc). Ansys reference manuals – revision 5.2, 1995

VELOSO, L. A. C. M. , SAMPAIO, R.A.C., DE SOUZA, R. M. E AMADOR, S. D.R. “Análise de Tensões e Monitoração da Estrutura de Suporte do Elevador de Caçambas do Descarregador Contínuo de Navio DN01”. Relatório Técnico, **NICAE/UFPA**. 2005.