

**ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS  
CRÔNICOS EM ESTRUTURAS –  
CASO DO DESCARREGADOR DE NAVIOS DA ALUMAR**

Rogério de Oliveira Melo<sup>1</sup>  
Dagoberto Schubert Severo<sup>2</sup>  
Jaime Roberto Pohlmann<sup>3</sup>

**Resumo**

Este trabalho demonstra a utilização eficaz da técnica de elementos finitos na detecção e eliminação de problemas crônicos estruturais em equipamentos sujeito a cargas cíclicas, tais como: Descarregadores e carregadores de navios, empilhadeiras, moinhos, dentre outros. Neste caso, será apresentado o Descarregador de navios do complexo portuário da ALUMAR, que tem histórico de problemas estruturais em seus principais elementos. A análise de elementos finitos partiu da necessidade de se ter uma visão global do equipamento quanto a esforços em seus pontos críticos, após o evento de ruptura parcial em um dos seus tirantes, elementos estes responsáveis pela sustentação da lança. O modelo de elementos finitos gerado possibilitou a simulação de carregamento dinâmico das estruturas do Descarregador em situação bem próxima da real. Para este estudo foi contratada a empresa PCE Engenharia de Porto Alegre/RS. Primeiramente, foi elaborado um modelo 3D conforme desenhos de fabricação, após foi feita a calibração das cargas reais nos pontos críticos através de instrumentação por extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*). O resultado foi uma completa análise à fadiga nas regiões críticas, sendo utilizado o software Fadigraph da PCE Engenharia. O modelo calibrado permitiu a análise da melhor solução para os problemas estruturais do equipamento. Essa técnica permite a transposição do cálculo estrutural de uma peça ou equipamento para a forma gráfica de fácil visualização. Isso permite estudos de melhores soluções para problemas crônicos, que podem ser consequência de falhas de projetos, de forma estruturada e com excelentes resultados.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Não-sócio da ABRAMAN, Engenheiro de Manutenção Preditiva da Refinaria e Porto da ALUMAR;

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Não-sócio da ABRAMAN, Diretor da PCE Engenharia;

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Não-sócio da ABRAMAN, PCE Engenharia.

## 1. Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso de aplicação da técnica de Análise por Elementos Finitos para solução de problemas estruturais no Descarregador de Navios do terminal privativo da ALUMAR.

A ALUMAR é uma planta produtora de alumínio, localizada em São Luís – MA, com produção estimada para este ano em 380.000 t. A fábrica consiste três áreas operacionais distintas:

- Refinaria: planta química responsável pela transformação da bauxita em alumina. Para isso utiliza bauxita e outros insumos tipo: soda cáustica – utilizado no processo de produção da alumina e o carvão mineral – utilizado com combustível nas três caldeiras de 70 t/h cada.
- Redução: planta metalúrgica responsável pela transformação da alumina em lingotes de alumínio.
- Porto: área operacional com equipamentos de manuseio de grânéis sólidos e líquido. Todos os insumos de maior porte são recebidos pelo terminal. Além das três matérias-primas principais da Refinaria, há ainda o recebimento de coque e piche utilizado no processo da área de Eletrodos na Redução. Parte da alumina produzida da Refinaria é exportada via terminal portuário.

A área de situação deste trabalho é o Porto, situado em um braço de mar entre o estreito dos Coqueiros e o rio dos Mosquitos. O terminal opera com um Descarregador de navios de capacidade nominal 1.500 t/h, um carregador de navios de 2.000 t/h e um terminal de recebimento de soda cáustica.

O Descarregador de navios por ser único é um equipamento de importância vital para a planta, por ele passam todos os principais insumos da ALUMAR, sendo: Bauxita, Carvão, Coque e Piche.

O estudo de Elementos Finitos surgiu de uma necessidade de solução definitiva para problemas recorrentes de trincas em partes estruturais do Descarregador, trincas essas que culminaram com a ruptura parcial de um dos tirantes de sustentação da lança articulada, elemento responsável por projetar o trolley<sup>4</sup> e caçamba sobre o navio para retirada de grânéis.

Esse estudo foi proposto pela Engenharia de Manutenção da área e feito pela empresa PCE Engenharia, uma empresa já com larga experiência neste tipo de análise e com outros projetos já desenvolvidos na própria ALUMAR, mas não na área estrutural.

---

<sup>4</sup> Carro em estrutura metálica com 4 conjuntos de rodas que fazem a projeção da caçamba sobre o porão do navio. Transladam horizontalmente sobre trilhos na parte inferior da lança.

## 2. Descarregador de navios

O Descarregador é um equipamento composto dos sistemas principais:

- *Translação do pórtico*: 8 conjuntos motorizados de rodas responsáveis pela translação de todo o Descarregador sobre os trilhos do cais;
- *Moega e alimentador*: área onde o material descarregado é pré-estocado para ser transportado em fluxo contínuo pelo alimentador metálico de sapatas;
- *Chute móvel*: estrutura em forma de chute de transferência que faz a descarga do material sobre a correia. O chute é vedado devido emissão de particulados finos durante a descarga de coque, piche e carvão;
- *Acionamento da caçamba e trolley*: localizado na sala de máquinas do Descarregador, são tambores de cabo, motores e redutores responsáveis pelos movimentos de içamento, descida, abertura e fechamento da caçamba e ainda a translação dianteira e traseira do trolley;
- *Sistema de coleta de pó*: localizado na parte traseira do Descarregador, faz a coleta e filtragem de particulados finos da moega e chute móvel;
- *Cabine de comando*: estrutura em aço inoxidável onde ficam instalados os comandos do Descarregador. Apenas uma pessoa opera todo o equipamento desta cabine;
- *Lança articulada*: estrutura em viga caixão ligada ao Descarregador através de um conjunto de articulação em rolamento, responsável por suportar a translação do trolley e cabine. Seu içamento é feito por 2 cabos de aço acionados de dentro da sala de máquinas.



Vistas lateral e frontal do Descarregador de navios.

Fonte: Os autores (2003)

O Descarregador opera desde a implantação da planta em 1984. Durante sua vida já houve alguns *retrofits* de grande porte tipo: troca dos conjuntos conversores dos acionamentos e troca do alimentador de sapatas.

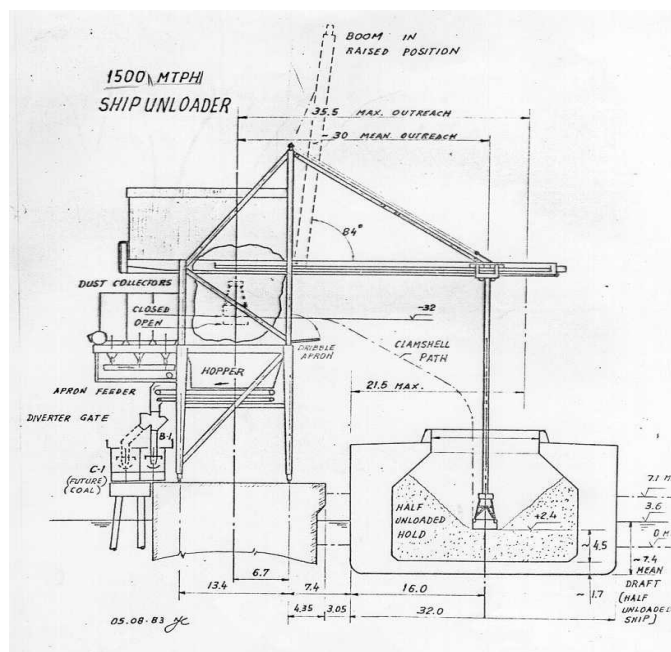
O regime de operação do equipamento é conforme a programação de navios do terminal, operando em média 48 horas ininterruptas por navio. Caso haja uma fila de espera longa o Descarregador poderá operar até uma semana sem paradas para manutenção, exceto manutenções consideradas operacionais de troca preventiva do cabo de aço e troca das vedações, caso haja navios de matéria-preta (piche, coque ou carvão). Atualmente a taxa de ocupação do cais gira em torno de 80%.

As manutenções executadas são por oportunidade e compõem-se basicamente de inspeções elétricas nos conversores e demais componentes, inspeções mecânicas e lubrificação em redutores, motores, eixos e demais componentes da caçamba, roldanas, rodas, dentre outros.

Para os motores e redutores críticos são executadas quinzenalmente ou conforme programação coleta e análise de vibração. Preventivamente também são realizados ensaios de ultrassom nos principais pinos e eixos do Descarregador.

Como parte do processo de cumprimento da NR-29 é realizada anualmente por empresa certificadora de navios, inspeção de integridade estrutural nos componentes críticos do Descarregador.

Toda estrutura da lança é suportada por dois tirantes em viga perfil H com uma articulação central. Os tirantes tem um dispositivo de tensionamento em sua extremidade inferior que pode ser ajustado conforme diferença de cargas entre os mesmos. Essas estruturas são as mais solicitadas quando em operação, devido cargas cíclicas que atuam a cada vez que a caçamba coleta material no porão do navio. O peso do conjunto caçamba+material é de aproximadamente 50t, considerando bauxita com 12% de umidade como material manuseado.



Croqui do Descarregador com a lança, mostrando a projeção da posição vertical. Fonte: ALUMAR (1983)

O ciclo de operação é aproximadamente 1 minuto, para o caso de matérias-primas com menor peso específico tem-se um maior número de ciclos para descarregar uma mesma quantidade de material. As falhas e situações mais em comuns em Descarregadores deste porte são:

- Desgaste abrasivo em cabos de aço;
- Desgaste em rodas e roldanas;
- Desgaste em lonas de freios industriais;
- Desgaste em trilhos após anos de operação;
- Falhas elétricas em motores (queima, baixa isolamento, entre outras);

- Falhas em componentes mecânicos (rolamentos, retentores, freios, engrenagens e outros).

Essas falhas são corrigidas com reparos ou trocas de componentes, algumas envolvem mobilizações especiais como guindastes ou outros dispositivos, mas não dependem de grandes paradas para que sejam reparados. Em um Descarregador como esse que opera com taxa de ocupação do cais em 80%, uma parada para manutenção acima de 10 dias demanda um planejamento e programação prévia acima de três meses.

Equipamentos do porte do Descarregador são projetados para operar por dezenas de anos considerando sua resistência à fadiga. O projeto original equipamento é americano com fabricação nacional na década de 80. Sua concepção, em si, traz algumas falhas que atualmente se administra de forma natural, a solução definitiva, por necessitar de grandes intervenções, são consideradas inviáveis do ponto de vista econômico. Atualmente troca-se os cabos de elevação da caçamba de 29mm de diâmetro com uma periodicidade rotineira, a cada 22.000 t descarregadas, ou seja, a cada 24 horas de operação contínua, é feito uma troca parcial do cabo, a cada 3 trocas todo o comprimento de cada cabo de 225 m é renovado.

### **3. Falhas em elementos estruturais do Descarregador**

Após 10 anos de operação o Descarregador começou a apresentar alguns problemas diferentes dos habituais em suas estruturas principais, mesmo com todas as manutenções, pintura anticorrosiva em parafusos e ligações estruturais, inspeções constantes e avaliações anuais de integridade.

Mesmo com o aumento de produção da Refinaria que levou a uma maior necessidade de uso do Descarregador, é um tempo demasiado curto para que problemas desta ordem se iniciassem. Os eventos são típicos de fadiga por cargas cíclicas. Estruturas não vivem infinitamente, mas são projetadas para operar por um tempo bem maior considerando desgaste natural, cargas cíclicas, corrosão e outros efeitos do tempo.

Os tirantes são estruturas de alta responsabilidade por transmitirem todos os esforços da lança para a sustentação principal que são as pernas estruturais em viga caixão do Descarregador. Em 1995, após uma avaliação da empresa que fazia as inspeções de integridade estrutural, foram trocados os dois tirantes originais, seu perfil foi redesenhado de chapa para perfil H soldado, este projeto contemplou ainda a criação de um terminal que possibilitava o ajuste e tensionamento do tirante.

O tensionamento sempre foi um problema para os tirantes. Os originais foram trocados por haver uma diferença na distribuição de cargas entre eles, mesmo com a troca por um perfil mais resistente e com dispositivo de ajuste, o problema persistiu. Os estudos posteriores indicaram que essa diferença sempre existirá independente de qual material ou perfil seja usado no tirante, devido desnivelamento da carga estática de passarelas, cabine e estrutura. Essa diferença agrava de forma significativa quando os esforços tornam-se dinâmicos com o Descarregador em operação.





Tirantes originais e os que foram trocados em 1995.

Fonte: Os autores (1995)


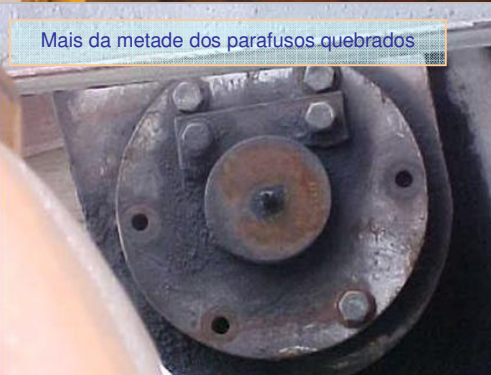


Flange regulável. Fonte: Os autores (1995)

Segue abaixo um descritivo das falhas em elementos estruturais e suas respectivas datas de detecção:

Evento	Data	Figura
Trinca no contraventamento principal lado superior. De cada lado houveram posteriormente trincas semelhante com 100% de penetração na chapa	18/07/2001	
Quebra de parafusos e afastamento do flange de sua posição original - lado oeste	10/07/2002	



Trinca e ruptura parcial do tirante lado oeste	20/12/2002	
Parafusos cisalhados no flange da articulação lado leste	31/03/2003	

Fonte: Os autores (2003)

A ruptura do tirante em 2002, após os mesmos já terem sido trocados em 1995, motivou a Engenharia da área a buscar uma solução que avaliasse a lança e tirantes não como um sistema isolado e sim sua interação com todo o Descarregador. A técnica que a princípio teria como simular todos esses esforços e se o projeto é ou não viável foi a Análise por Elementos Finitos.

Todos os estudos contratados na época da ruptura apontaram fadiga como causa, sendo necessário redesenhar novamente os tirantes. Para que esse novo *retrofit* dos tirantes não sofresse os mesmos problemas do anterior, todos os esforços sob carregamento dinâmico foram testados e simulados.

#### 4. Análise por Elementos Finitos

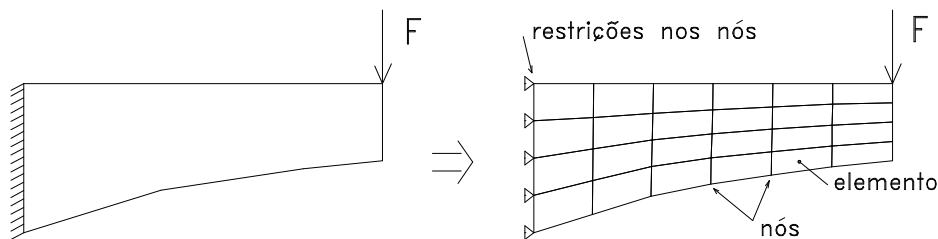
O método de Elementos Finitos é um método matemático/computacional para análise de problemas do contínuo. O método permite que a peça em estudo tenha forma geométrica, carregamento e condições de contorno quaisquer. Ocorre uma semelhança física entre o modelo de Elementos Finitos com a situação física real, não sendo o modelo uma abstração matemática difícil de ser visualizada. Pelo método transforma-se um modelo físico com infinitas incógnitas em um modelo finito, definido por nós, elementos e condições de contorno.

Inicialmente na década de 60 o Método de Elementos Finitos (MEF) foi usado em cálculo estrutural, hoje é largamente aplicado em problemas de campo (calor, fluidos, campo elétrico e magnético).

Algumas das análises que podem ser executadas por softwares de elementos finitos:

- Estática linear de tensões e deformações (edifícios, pontes, torres, componentes mecânicos em geral, tubulações industriais);
- Dinâmica (modos de vibração e frequências naturais);
- Não linear de tensões e deformações (conformação, grandes deformações);
- Térmica (transmissão de calor em regime permanente e transiente);
- Tensões devido ao carregamento térmico (tubulações industriais);
- escoamento de fluídos (aerodinâmica, hidrodinâmica);
- Campos elétricos (condutores, isolantes, eletrodeposição e corrosão) e magnéticos.

O modelo de Elementos Finitos é composto por elementos conectados entre si por nós, formando a malha de elementos finitos, conforme a figura abaixo:

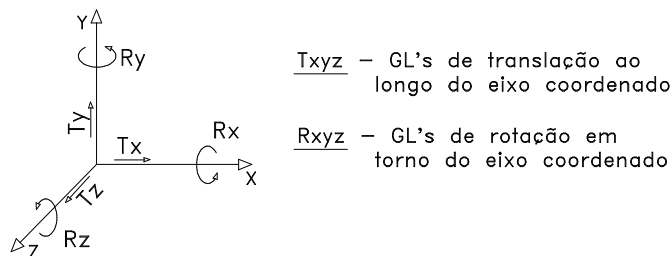


Situação Real

Modelo de Elementos Finitos

Fonte: PCE (1996)

No caso de tensões/deformações cada nó possui até 6 Graus de Liberdade (GL's) em relação ao sistema de coordenadas cartesianas globais, dependendo do tipo de elemento. Um grau de liberdade é a possibilidade que um nó tem de rotacionar ou transladar em relação a um eixo coordenado. O tipo de análise começa a ser definido quando se caracteriza o tipo de GL que o nó deve ter. Algumas análises possuem apenas um GL por nó. Por exemplo, a temperatura na análise térmica e pressão na análise de fluídos.



$T_{xyz}$  - GL's de translação ao longo do eixo coordenado


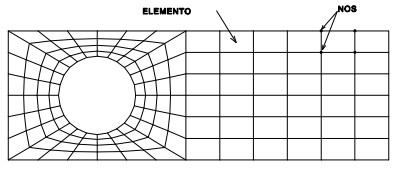
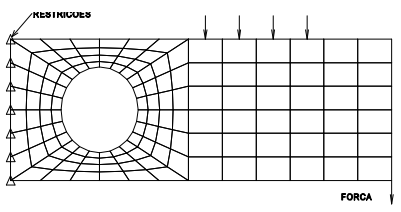
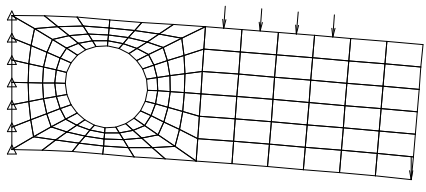
$R_{xyz}$  - GL's de rotação em torno do eixo coordenado

Fonte: PCE (1996)

Os engenheiros civis foram os primeiros a utilizarem a Análise por Elementos Finitos, conhecido como "Método de Análise Matricial de Estruturas". Dividir uma estrutura em elementos era quase natural, nas estruturas em análise era também natural o elemento, principalmente em treliças e vigas rebitadas ou soldadas.

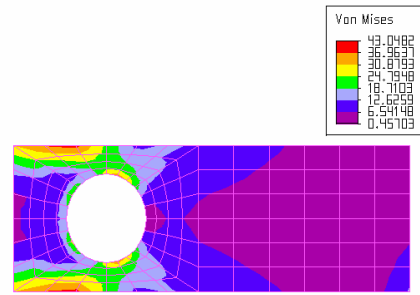


Toda a matemática envolvida na análise é mais rápida e facilmente calcula através de softwares, utilizando a implementação computacional conforme abaixo:

<p><b>PRÉ-PROCESSAMENTO</b></p> <div style="text-align: center;">  <p>Peça com furo a ser analisada</p> </div>	
<p><b>Modelamento:</b> Consiste no desenho em CAD da estrutura a ser calculada. Pode ser executado no próprio programa ou importado de outros CAD's.</p>	
<p><b>Malha de elementos finitos:</b> Consiste na discretização da estrutura, ou seja, a sua divisão em <i>elementos</i> conectados por <i>nós</i>.</p>	
<p><b>Condições de Contorno:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Restrições</i> - definem como a estrutura se relaciona com o meio ambiente (engastamentos).</li> <li>➤ <i>Carregamentos</i> - definem as solicitações as quais a estrutura está submetida (Forças nodais, pressões, momentos, carga térmica, etc.).</li> </ul>	
<p><b>Propriedades do Material:</b> Definição das características físicas do material a ser utilizado na estrutura.</p>	<p><math>E</math> = Módulo de Elasticidade (Young)  <math>\rho</math> = Densidade  <math>u</math> = Coeficiente de Poisson</p>
<p><b>PROCESSAMENTO</b></p> <p>Cálculo da matriz de rigidez. Cálculo dos deslocamentos nodais e tensões.</p>	
<p><b>PÓS-PROCESSAMENTO</b></p>	
<p><b>Deslocamentos:</b> Pode ser visualizada a estrutura deformada ou um mapa com faixas coloridas de deslocamentos. Pode-se conhecer também os deslocamentos individuais de cada nó com o mouse ou por meio de listagens.</p>	
<p><b>Tensões:</b> As tensões podem ser visualizadas (na forma de mapas com faixas coloridas) nas direções principais, os valores máximos e mínimos principais (Fadiga) ou de acordo com os critérios de resistência de Von Mises ou Tresca.</p>	

### Concentração de Tensões:

Podem ser visualizadas as regiões de maior concentração de tensões, que durante a vida útil da estrutura estarão mais propensas a apresentarem trincas (permitindo escolher futuros pontos de inspeção).



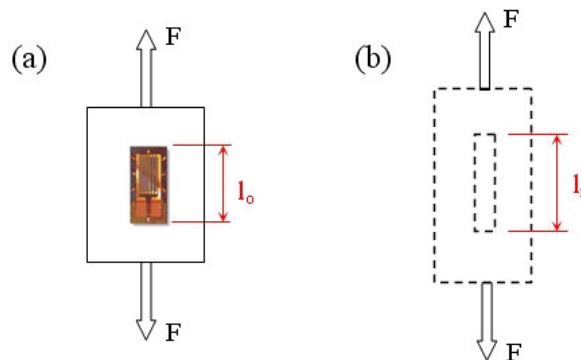
Mapa de tensões de acordo com Von Mises.

A análise aplicada no Descarregador foi de ordem estrutural verificando a condição de projeto do equipamento e fazendo um comparativo entre as solicitações mecânicas calculadas para o projeto e seus reais esforços quando em operação.

## 5. Extensometria

A extensometria é uma técnica de medição de deformação em estruturas, que é tradicionalmente conhecida como *strain gage*. O extensômetro de resistência elétrica ou “*electrical bonded strain gage*” é um sensor piezo-resistivo, ou seja, um resistor que apresenta uma variação na sua resistência como função de uma deformação imposta à peça na qual o sensor está (como o nome em inglês sugere) colado.

As deformações do corpo são transmitidas ao *strain gage* acarretando uma modificação de suas propriedades elétricas. A deformação mecânica do *strain gage* é igual a do corpo nesse ponto. Aplicando-se a Lei de Hooke para a estrutura, determina-se a tensão mecânica atuante no local.



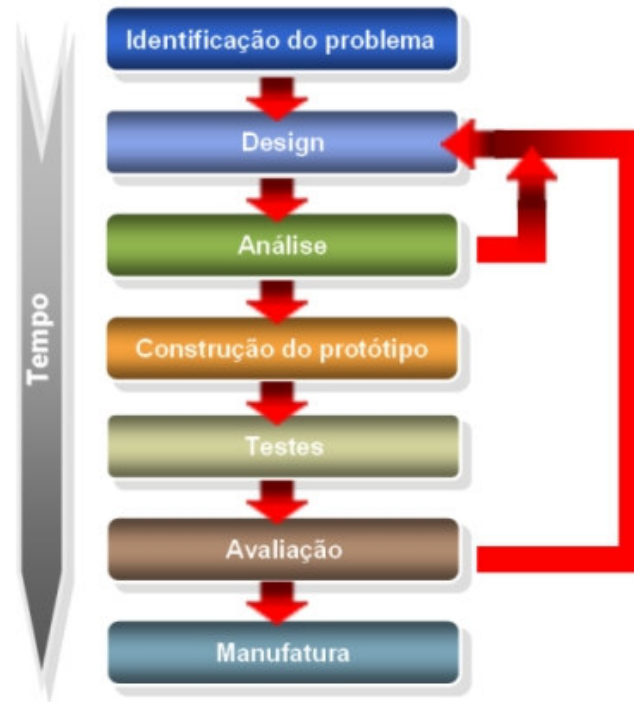
Fonte: PCE (2001)

Lâmina dotada de *strain gage* tracionada:  
(a) situação inicial ; (b) situação deformada.

A técnica é comumente utilizada em análises de Elementos Finitos para comprovação das cargas calculadas no modelo. Pontos especiais são escolhidos para o ensaio e partir daí faz-se a calibração do modelo fazendo-o mais fiel possível à realidade dos reais carregamentos dinâmicos e estáticos.

## 6. Análise do Descarregador

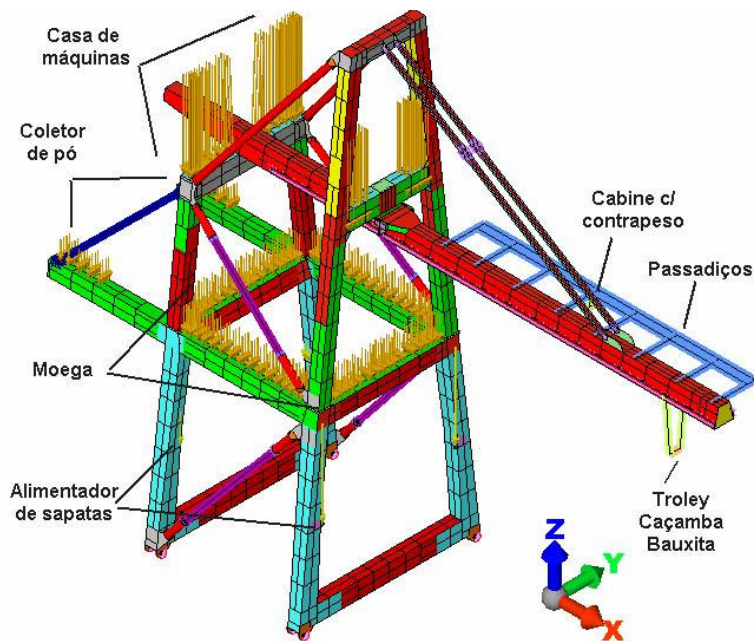
Basicamente as análises de Elementos Finitos envolvem etapas de redesenho do equipamento em questão conforme desenhos originais, elaboração do modelo preliminar, calibração do modelo com a extensometria e por fim o modelo final com a identificação dos pontos críticos e as propostas de melhorias. Segue abaixo um roteiro básico da análise:



Etapas da análise de elementos finitos.

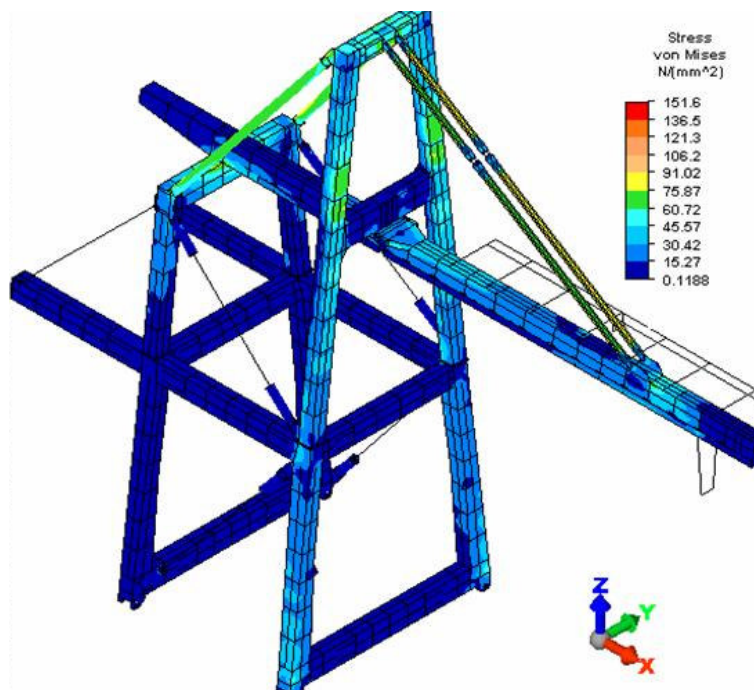
Fonte: Autores (2005)

As etapas do desenvolvimento da análise foram iniciadas a partir da documentação técnica e desenhos do Descarregador. O mesmo foi modelado utilizando elementos de barra, placa e sólido. O modelo consistiu da lança, com as cargas da cabine, passadiços, caçamba, *trolley* e bauxita (material de maior peso específico) aplicadas como elementos de barra com densidades calibradas para obter os pesos corretos e das estruturas inferiores e superiores do pórtico que abriga a casa de máquinas, coletor de pó, moega e alimentador de sapatas, com o peso destas partes aplicado no modelo como carga distribuída. A figura abaixo apresenta o modelo:



Modelo com a malha e os carregamentos considerados. Fonte: PCE (2003)

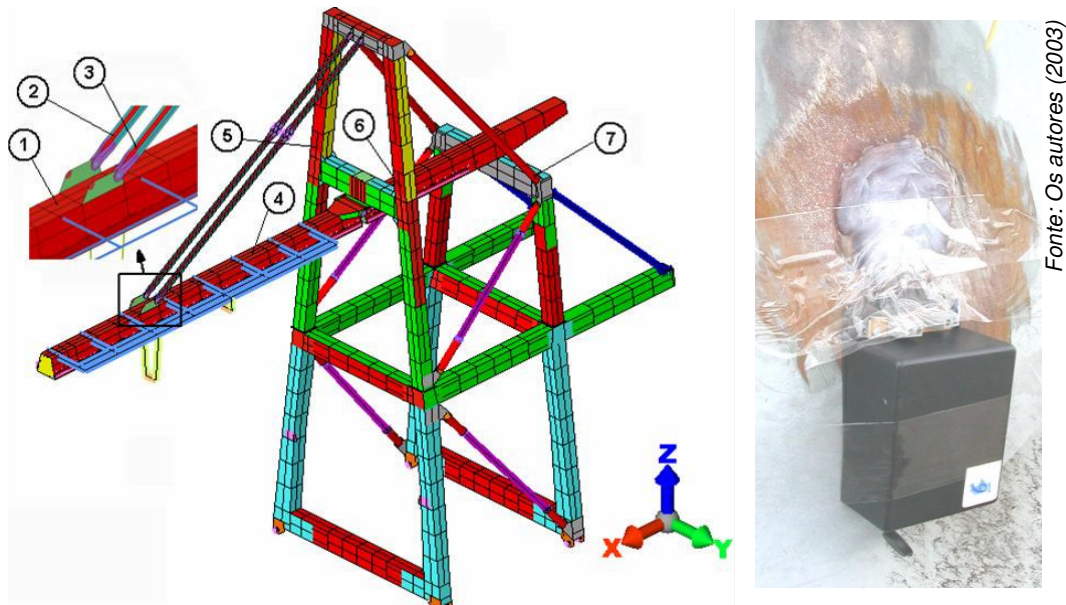
O modelo gerado apresentou os principais pontos de concentração de tensões que necessitariam serem checados. A partir deste modelo inicial já se pôde ter uma idéia de que esforços poderiam estar causando as falhas nos principais componentes estruturais do equipamento.



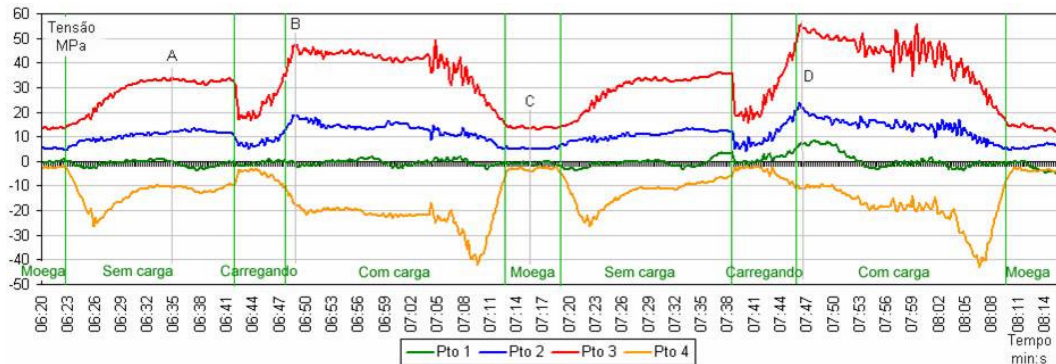
Tensões segundo critério de Von Mises da estrutura do Descarregador de navios. Fonte: PCE (2003)

Para calibração do modelo foram escolhidos determinados pontos na estrutura e medidas as tensões destes em campo utilizando-se *strain gages* orientados segundo o eixo da peça na direção das tensões principais atuantes, ligados a uma placa condicionadora de sinais e esta a um microcomputador com software dedicado de aquisição de dados, fornecendo como saída valores de tensão

mecânica em  $\text{N}/\text{mm}^2$  (MPa). Os pontos e o gráfico de tensão gerados são indicados na figura abaixo:



Pontos instrumentados com *strain gages* e vista do sensor instalado no ponto 6.



Medição típica de tensões nos pontos 1, 2, 3 e 4 correspondendo a dois ciclos de descarregamento de bauxita. Fonte: PCE (2003)

Os resultados da instrumentação confirmaram com precisão o que já se tinha suspeita na análise preliminar. A distribuição de cargas entre os tirantes estava desequilibrada, o tirante leste suportava apenas 28% da carga enquanto que o oeste suportava os outros 72% restantes. Esta diferença de cargas produziu folgas entre o tirante mais solicitado e o outro tirante da ordem de 13,5 mm em seu comprimento. Uma das causas principais para essa diferença foi a concepção do projeto original, que manteve as cargas estáticas apenas em um lado da lança (cabine, passarela e estruturas) conjugada com as cargas dinâmicas quando a caçamba carregada de bauxita sai da inércia no porão do navio e o ciclo contínuo de operação. Os esforços neste instante têm um fator multiplicativo muito alto sobre os tirantes e isso gradativamente acelerou as folgas e por consequência o tensionamento em apenas um tirante.

Os contraventamentos em suas ligações com a estrutura principal do Descarregador também foram identificados como pontos críticos do equipamento. Esses trechos, juntamente com os tirantes foram analisados quanto a fadiga em modelos reduzidos e com uma malha mais refinada. O software específico para

essa análise foi o Fadigraph<sup>5</sup>, que é um pós-processador para ser utilizado em projeto e análise de peças e componentes sujeitos a carregamentos que provocam fadiga do material. Sua finalidade é auxiliar no pós-processamento de uma análise por elementos finitos de tensões, através da interpretação e apresentação dos resultados dessa análise de forma gráfica no diagrama de Haigh<sup>6</sup> dos pontos (nós) críticos do modelo.

Graficamente o diagrama de Haigh plota uma curva com uma parábola muito suave que pode ser assumida como uma reta. Erros devido esta aproximação são pequenos e favorecem a segurança. Para conhecimento da região segura a fadiga são plotadas retas em função da tensão de ruptura estática ( $\sigma_r$ ) e da tensão de escoamento do material ( $\sigma_e$ ). A área resultante das intersecções é a região segura.

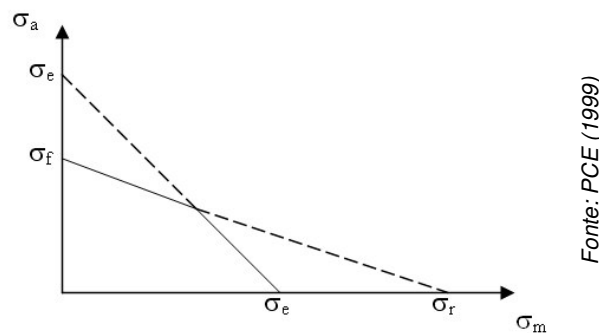


Diagrama de Haigh.

As figuras abaixo mostram os diagramas de Haigh dos materiais empregados nos tirantes e contraventamentos, já com os fatores redutores para tensão limite à fadiga aplicados nestes em função de rugosidade típica do material e fatores de concentração de tensões.

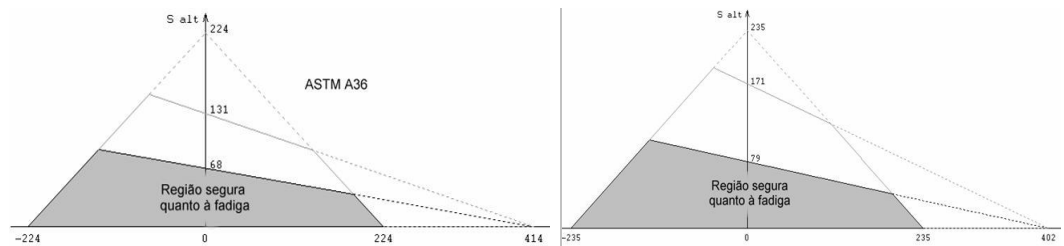


Diagrama de Haigh dos aços ASTM A36 e A53B com fatores redutores adotados para tensão limite à fadiga. Fonte: PCE (2003)

Para obtenção do carregamento cíclico para esta análise foram simuladas duas situações de carga:

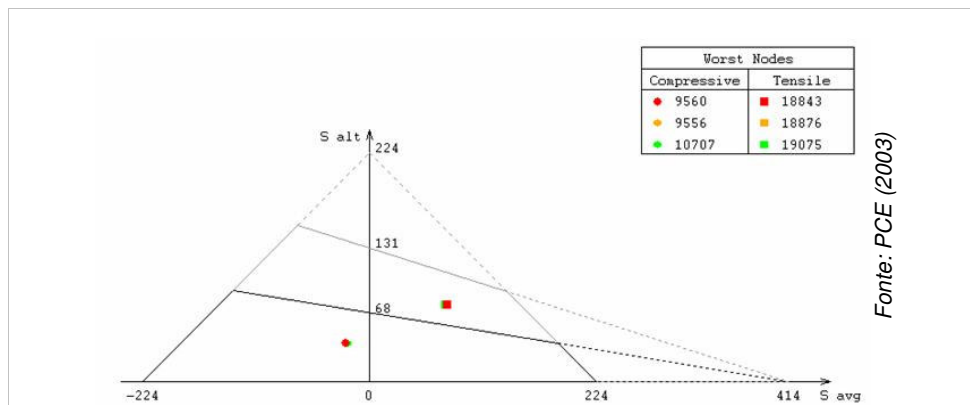
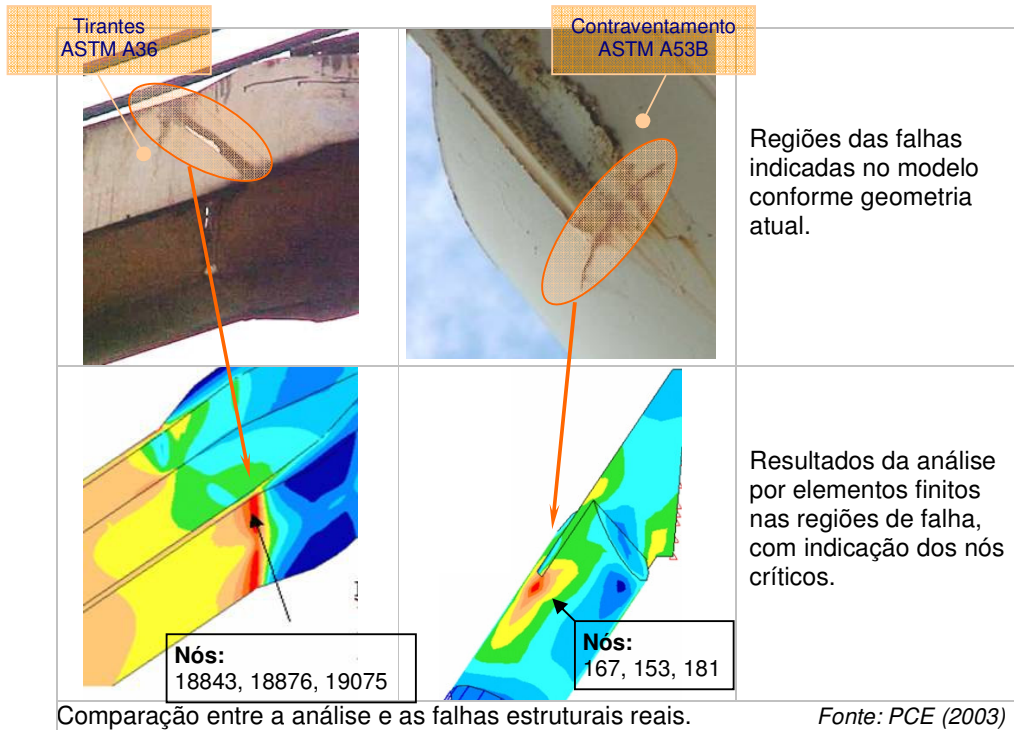
- Caçamba carregada na posição extrema na lança e;
- Caçamba descarregada na moega.

<sup>5</sup> Software comercial de propriedade da PCE Engenharia S/C. É um software suporte na análise de fadiga em estruturas.

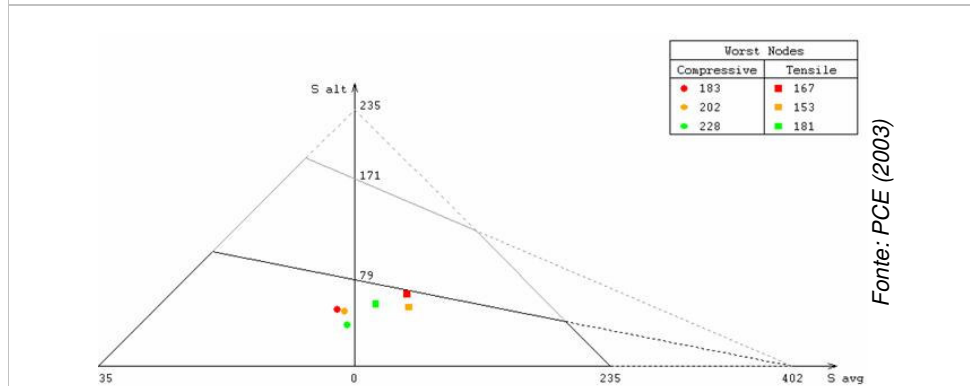
<sup>6</sup> Diagrama de análise de fadiga mais simplificado que o diagrama de Smith-Goodman.



Abaixo segue os resultados com as respectivas análises a fadiga com a apresentação dos resultados na forma de resultados nodais, cujos nós são plotados no gráfico e identificados pelo respectivo número. Há de se notar ainda as semelhanças entre as falhas e o que o modelo de elementos finitos comprovou:



Análise de fadiga do tirante. Diagrama de Haigh com identificação dos nós críticos dos tirantes – ASTM A36.



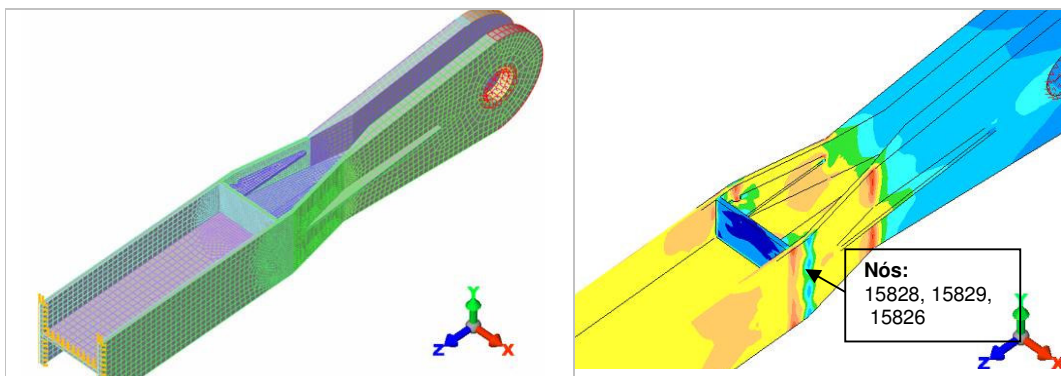
Análise de fadiga do contraventamento. Diagrama de Haigh com identificação dos nós críticos do contraventamento – A53B.



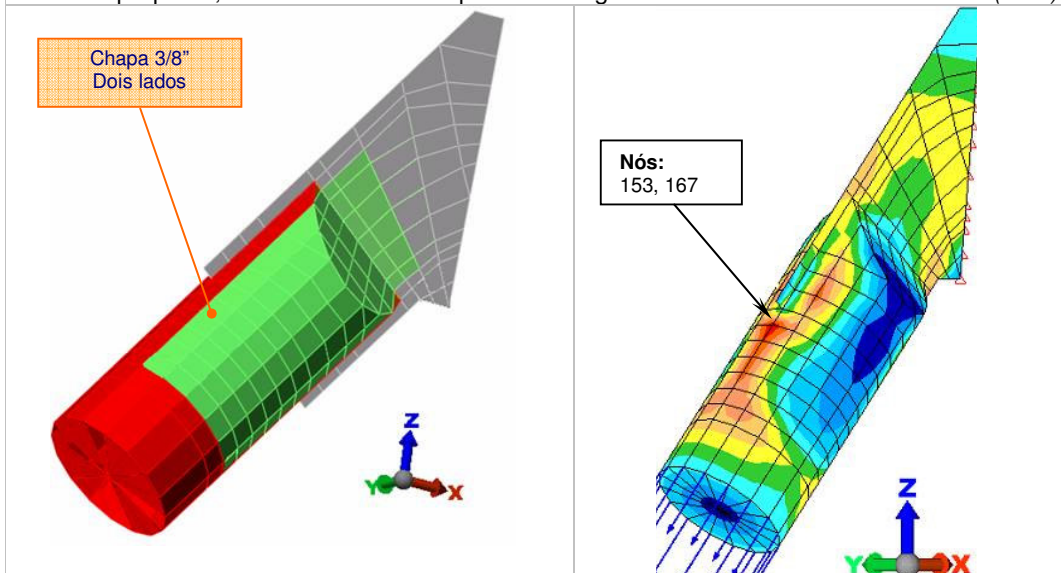
Os resultados mostraram que nenhuma das duas configurações passaram na análise de fadiga, situação ainda mais crítica para os tirantes, cujos nós críticos estavam completamente fora da área segura a fadiga. Conseqüentemente, como já mostrado no início, falharam com ruptura frágil devido fadiga em carregamentos cíclicos.

## 7. Projeto de melhorias baseada em Elementos Finitos

Como já havia um tirante com problemas, a decisão por sua troca completa já estava tomada, mas não antes de realizar o estudo de Elementos Finitos. Visto que uma simples fabricação e troca conforme projeto original não resolveria o problema. O estudo serviu ainda para que fossem feitas mudanças e reforços nos contraventamentos, então foram sugeridas alterações destas geometrias conforme apresentado a seguir:

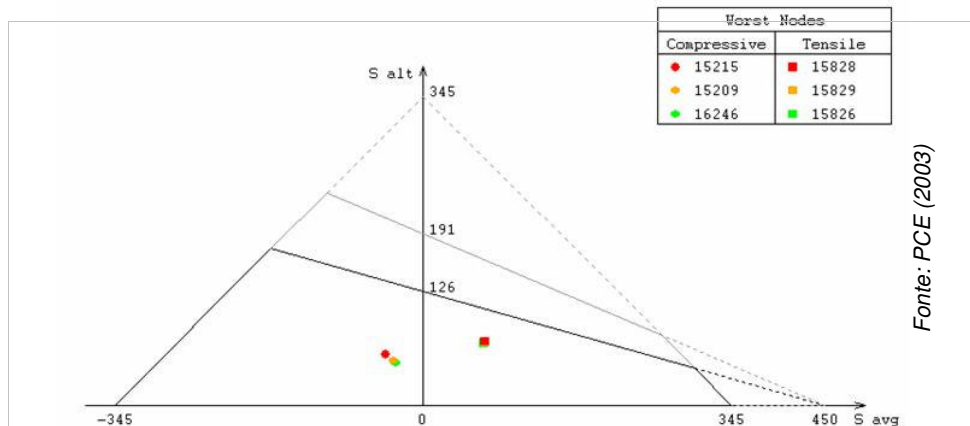


Modelo da geometria proposta para os tirantes e resultados da análise por elementos finitos do tirante proposto, com os nós críticos quanto à fadiga. *Fonte: PCE (2003)*



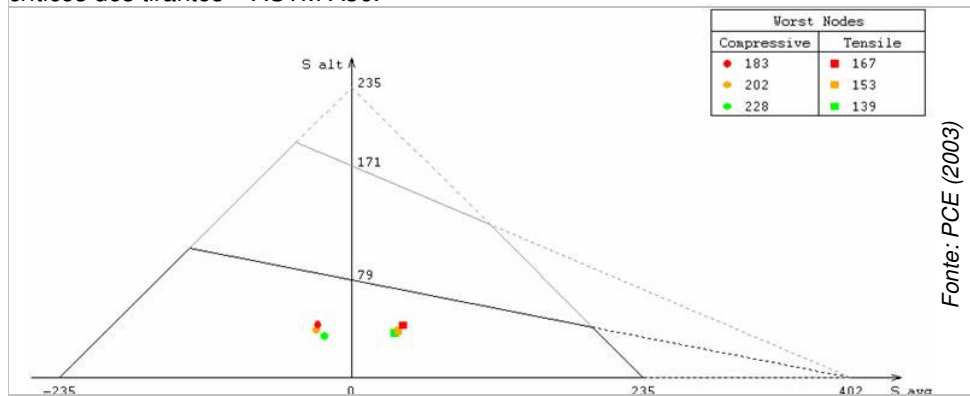
Modelo do contraventamento com o reforço proposto e os resultados da análise por elementos finitos do contraventamento proposto, com os nós críticos quanto à fadiga. *Fonte: PCE (2003)*

O diagrama de Haigh foi reanalisado para as novas configurações tendo resultados satisfatórios quanto à fadiga:



Fonte: PCE (2003)

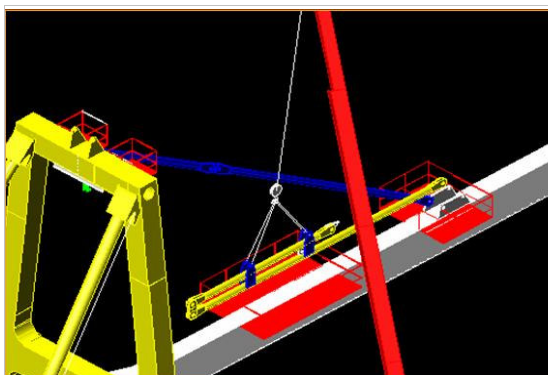
Análise de fadiga do tirante proposto. Diagrama de Haigh com identificação dos nós críticos dos tirantes – ASTM A36.



Fonte: PCE (2003)

Análise de fadiga do contraventamento proposto. Diagrama de Haigh com identificação dos nós críticos do contraventamento – A53B.

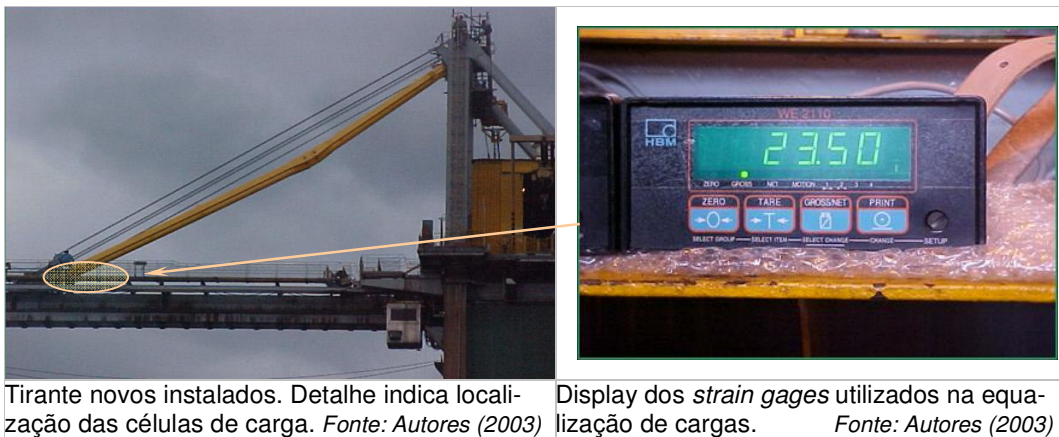
No caso dos tirantes, o novo projeto contemplou ainda mudanças de material, foi utilizado aço ASTM A572 G50 perfil laminado ao invés de soldado. Cuidados especiais nos detalhes de soldas nas ligações e região central dos tirantes foram tomados para não houvesse favorecimento a concentrações de tensão. Todos os cálculos analíticos de resistência foram refeitos por empresa especializada. Uma premissa básica para o novo projeto dos tirantes era a sua montagem com equalização de cargas, para isso, foi mantido o ajuste com flange excêntrica na extremidade inferior e feito montagem com *strain gages* para o ajuste correto. Segue abaixo tirante novo durante e após montagem:



Plano de montagem em 3D.  
Fonte: Autores (2003)



Flange excêntrica mantido e feito melhorias na lubrificação.  
Fonte: Autores (2003)



Tirante novos instalados. Detalhe indica localiza-  
ção das células de carga. Fonte: Autores (2003)

Display dos *strain gages* utilizados na equa-  
lização de cargas. Fonte: Autores (2003)

Em relação aos contraventamento foram instaladas as chapas de reforço conforme proposto no modelo, atualmente encontram-se em monitoramento quanto ao ressurgimento das trincas. Existe já uma proposta para o contraventamento ideal que é a troca do perfil em tubo por um perfil em viga U. Esta nova concepção posteriormente estará sendo analisada.

## 8. Conclusão

A avanço tecnológico crescente com a rapidez e desenvolvimento de computadores permitiu a engenheiros e técnicos o acesso e uso de técnicas antes restrita somente a faculdades, centros de pesquisas e grandes corporações. A Análise por Elementos Finitos é uma dessas tecnologias que nos últimos anos tem dados saltos grandiosos no modelamento de sistemas e situações de quaisquer complexidade. Modelos que antes demoravam dias e até semanas para poderem apresentar resultados, hoje com o advento da informatização, fazem isso durante uma noite.

O trabalho executado no Descarregador prestou para a Engenharia da ALUMAR como uma comprovação do método para esses tipos de estruturas. As conjecturas e suposições para modificações de projeto antes até possíveis, mas demoradas ao extremo que se inviabilizariam economicamente, hoje podem ser tomadas com apenas uma consulta ao modelo de Elementos Finitos já pronto.

Atualmente já existe mais um modelo de Elementos Finitos feito para o *trolley*, um sistema também sujeito a carregamentos cíclicos e com histórico de trincas em ligações soldadas e elementos estruturais críticos. A proposta do estudo está atualmente sendo detalhada para fabricação e montagem. Este foi o caso de um sistema que afetou de sobremaneira a manutenção da área, os componentes de desgaste falhavam bem antes devido a concepção de projeto do que o seu uso normal.

Como toda técnica ou serviço que demanda horas de engenharia, equipamentos e softwares complexos, há de se ponderar o binômio custo – benefício para cada aplicação específica. Em equipamentos críticos, de alto custo e únicos para o processo, a técnica mostrada neste trabalho pode ser uma alternativa viável para evitar perdas maiores no futuro.

**Bibliografia:**

BREBBIA, C. A. e FERRANTE, A.J. **The Finite Element Technique.** Editora da UFRGS, 1975.

KNIGHT, Charles E. **The Finite Element Method in Mechanical Design.** WSKENT, 1993.

LOGAN, Daryl L. **A First Course in the Finite Element Method.** Second Edition, PWS-KENT, 1992.

SPYRAKOS, Constantine. **Finite Element Modeling in Engineering Practice.** West Virginia University Press, 1994.

ZIENKIEWICZ, O.C. **The Finite Element Method.** Volume 1, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 1989.