

VICENTE STRÖHER BÜRGER

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MECANISMO DE MANOBRA DE UMA
COMPORTA VAGÃO DE DESVIO DO RIO**

Porto Alegre

2010

VICENTE STRÖHER BÜRGER

ANÁLISE DE TENSÕES NO MECANISMO DE MANOBRA DE UMA COMPORTA
VAGÃO DE DESVIO DO RIO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre

2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MECANISMO DE MANOBRA DE UMA COMPORTA
VAGÃO DE DESVIO DO RIO**

VICENTE STRÖHER BÜRGER

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Walter Jesus Casas
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre

2010

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais *Egon* e *Nerci*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Ignácio Iturrioz*, pela paciência e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao grande amigo *Tórgan Flores de Siqueira*, pelas xícaras de café e ajuda com o \LaTeX .

BÜRGER, V. S. Análise de Tensões no Mecanismo de Manobra de uma Comporta Vagão de Desvio do Rio. 2010. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Nos últimos anos no Brasil, tem-se investido sensivelmente na construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). O Brasil deve ao menos triplicar a capacidade instalada em PCHs nos próximos anos, com a liberação dos 6.500 MW em potência hidrelétrica tramitando na Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Neste contexto, no presente trabalho é apresentada a estrutura de um tipo de comporta (comporta vagão) que atua no desvio do rio da barragem da PCH Retiro Velho, estabelecida no município de Aporé, estado do Goiás. Modelos de diferentes tipos de complexidade foram implementados para avaliar criticamente os componentes estruturais do sistema de manobra desta comporta. Os resultados obtidos permitiram obter conclusões sobre o projeto estrutural deste tipo de equipamento.

PALAVRAS-CHAVE: análise de tensões, sistema de manobra, comporta vagão, Pequena Central Hidrelétrica, análise não-linear, estados limites.

BÜRGER, V. S. **Tension Analysis of a Detour Floodgate's Maneuver Mechanism.** 2010. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

In the recent years, the Brazilian government has invested significantly in the construction of Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). In the next few years, Brazil must at least triple the PCHs installed capacity. This will be achieved with the release of 6,500 MW in power hydroelectric plant, currently being evaluated at the National Agency of Electric Energy (Aneel). In this context, we present the structure of a kind of floodgate (the wagon floodgate), that acts in the river detour at the PCH Retiro Velho dam, established in Aporé city, state of Goiás. Different types of models, varying in complexity, had been implemented in order to critically evaluate the structural components of the proposed system. The results that we have reached so far allow us to draw conclusions about the structural project of this kind of equipment.

KEYWORDS: tension analysis, maneuver system, vagon floodgate, Pequena Central Hidrelétrica, non-linear analysis, finite element method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Objetivos	8
1.2. Organização do trabalho	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. A comporta vagão e seus componentes	9
2.2. Sistemas de manobra	10
2.3. Análise por elementos finitos (MEF)	11
2.4. Análise linear estática	12
2.5. Análise não-linear	12
2.6. Modelo elasto-plástico e encruamento isotrópico	13
2.6.1. Comportamento elasto-plástico ideal	13
2.6.2. Encruamento isotrópico	14
2.6.3. Comportamento elasto-plástico com encruamento isotrópico	14
2.7. Método dos estados limites	15
2.7.1. NBR 8800 (2007)	15
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	16
4. METODOLOGIA	16
4.1. Definição da força de acionamento	17
4.2. Análise pela NBR 8800	18
4.3. Modelo em elementos finitos	20
4.4. Análise não-linear	20
5. RESULTADOS	21
5.1. Estados limites	22
5.2. Análise não-linear	23
6. CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS	26
ANEXO A – Valores de γ_m, χ e λ_0 conforme NBR8800	27

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Resolução N.º 394, de 04 de dezembro de 1998, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 1998), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), no Brasil, são os empreendimentos hidrelétricos com potência instalada superior a 1.000 kW (1 MW) e igual ou inferior a 30.000 kW (30 MW), com área total de reservatório igual ou inferior a 3 km² para uma cheia centenária. Devido aos custos envolvidos, o Governo Federal incentivou a sua exploração por grupos empresariais privados. Este tipo de hidrelétrica é utilizada principalmente em rios de pequeno e médio portes que possuam desníveis significativos ao longo do percurso.

A figura 1.1 ilustra o esquema básico de uma usina hidrelétrica.

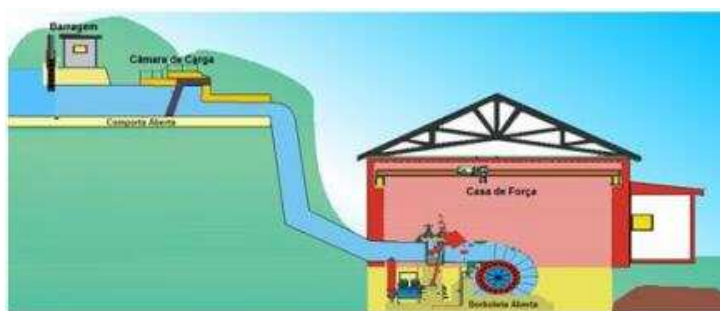


Figura 1.1: Esquema básico de uma Usina Hidrelétrica

As PCHs representam um grande potencial de geração de energia no Brasil, devido à procura por produção de energia limpa, renovável e que cause menor impacto no meio ambiente. Além do custo acessível e menor impacto ambiental, há outras vantagens como: menor prazo de implementação, facilidades oferecidas pela legislação, disponibilidade de tecnologias eficientes, redução de tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, isenção do pagamento da compensação financeira pelo uso dos recursos hídricos e incentivos legais. A promessa de tarifa especial e a garantia de compra de 1,1 mil MW de energia elétrica por parte da Eletrobrás, pelo programa Proinfa, são dois dos grandes atrativos para se investir em pequenas centrais hidrelétricas no País.

A Retiro Velho Energética S.A. (figura 1.2) está estabelecida como produtora independente de energia elétrica, por meio das Resolução N.º 626/2002 (ANEEL, 2002) e da Resolução Autorizativa N.º 460/2006 (ANEEL, 2006) da ANEEL, mediante o aproveitamento do potencial hidráulico da PCH Retiro Velho, localizada no rio da Prata, no município de Aporé, Goiás. Possui capacidade instalada de 18 MW, com investimento total de R\$98,9 milhões, e iniciou sua operação comercial em 18 de junho de 2009.

Os componentes mecânicos principais, quando se trata da barragem em uma central hidrelétrica, são as comportas hidráulicas. Estes elementos, além de necessários para a operação do reservatório, constituem itens fundamentais de segurança do empreendimento.

Durante o período de formação do lago para entrada em operação da usina, na estrutura de desvio do rio da barragem da PCH Retiro Velho, foi utilizada um comporta do tipo vagão para reter a passagem das águas do Rio da Prata e conseqüente elevação do nível até a cota nominal de operação da barragem. Esta comporta apresentou problemas nas operações de subida e



Figura 1.2: Vista aérea da PCH Retiro Velho, instalada no Rio da Prata, Aporé-GO.

descida, sendo instalado um dispositivo alternativo de manobra que deveria ser solidário ao sistema original sem o tornar inoperante.

1.1. OBJETIVOS

- **Objetivo Geral:** Realizar um estudo crítico da estrutura de uma comporta do tipo vagão utilizada no desvio do Rio da Prata, no município de Aporé, estado do Goiás, com ênfase em seu sistema de manobra;
- **Objetivos Específicos:**
 1. Avaliar possíveis pontos críticos dos componentes do sistema de manobra em função do seu comportamento dentro da estrutura geral;
 2. Utilizar diferentes ferramentas e métodos de análise para avaliação das tensões do sistema estrutural;
 3. Propor soluções para os componentes mal dimensionados.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde os conceitos básicos utilizados durante o desenvolvimento são descritos. No capítulo 3 é apresentado o problema analisado neste trabalho. A seguir, no capítulo 4, é apresentada a metodologia adotada. Os resultados obtidos são o assunto do capítulo 5, e, finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A COMPORTA VAGÃO E SEUS COMPONENTES

Uma comporta hidráulica é composta basicamente por três elementos principais, sendo eles:

- **Tabuleiro:** elemento móvel que serve de anteparo à passagem d'água, e é constituído por: paramento (chapa de revestimento), vigamento, vedações (perfis de borracha parafusados no paramento), elementos de apoio e guiamento;
- **Peças Fixas:** componentes que ficam embutidos no concreto e servem para guiar e alojar o tabuleiro, de forma a redistribuir os esforços para o concreto; servem também como elementos de apoio da vedação.
- **Mecanismos de manobra:** dispositivos diretamente responsáveis pela abertura e fechamento das comportas. Alguns tipos de comporta dispensam o uso de mecanismo de manobra e são movimentadas pela própria pressão da água.

Dentre os tipos de comportas presentes em grandes obras hidráulicas, a Comporta Vagão é certamente o tipo mais utilizado e versátil, que, em sua forma habitual, constitui-se basicamente de tabuleiro (em geral plano), eixos, rodas e vedações. Uma representação dos elementos básicos de uma comporta pode ser visualizada na figura 2.1.

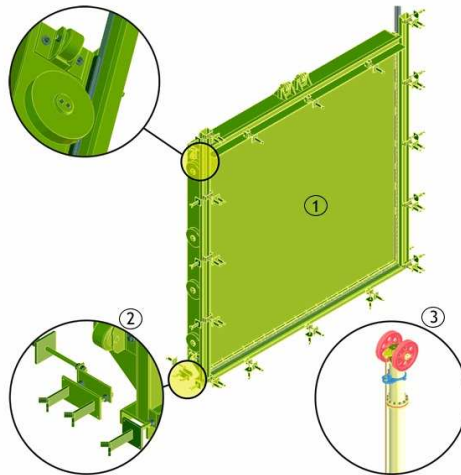
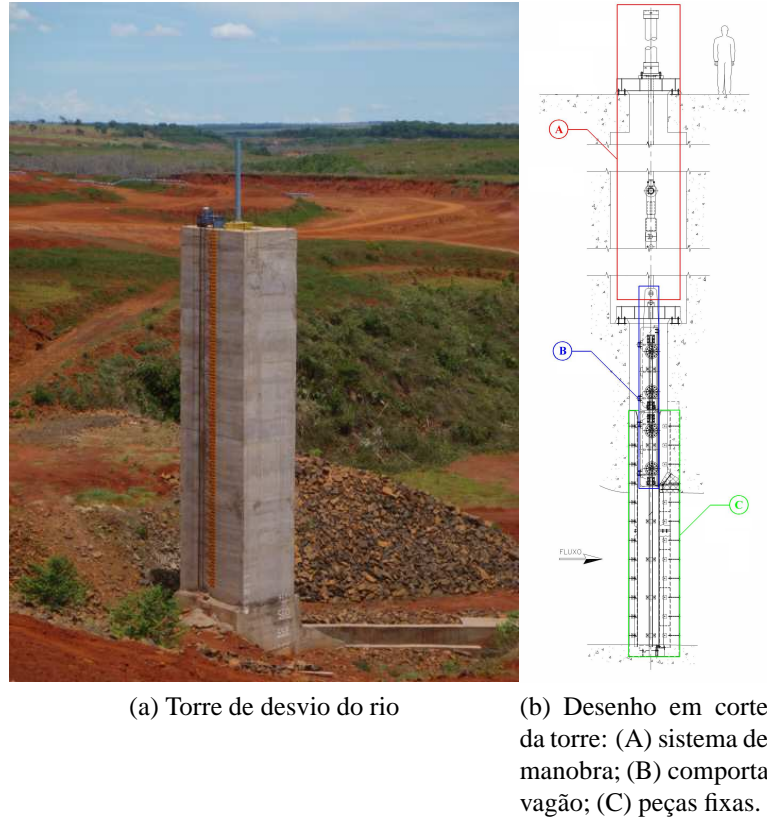


Figura 2.1: Elementos de uma comporta (vagão): (1) tabuleiro, (2) peças fixas, (3) sistema de manobra.

O tabuleiro é formado por uma chapa de paramento, geralmente plana, reforçada por meio de vigas horizontais e nervuras. Em cada lado do tabuleiro, as extremidades das vigas horizontais são soldadas a uma viga vertical denominada cabeceira. As rodas são montadas em eixos fixados lateralmente no tabuleiro, sobre as vigas cabeceiras, e têm a dupla função de diminuir os esforços de atrito e de transmitir cargas às peças fixas e ao concreto.

A principal aplicação da comporta vagão é em instalações que necessitem de elementos de proteção capazes de fechar pelo próprio peso. É o caso, por exemplo, de tomadas d'água

profundas e instalações de desvio do rio, sendo este último o abordado neste trabalho. Na figura 2.2 é apresentada uma foto da torre de desvio do rio da PCH Retiro Velho (a) e o esquema básico da mesma torre em corte (b).



(a) Torre de desvio do rio

(b) Desenho em corte da torre: (A) sistema de manobra; (B) comporta vagão; (C) peças fixas.

Figura 2.2: Desvio do rio na barragem da PCH Retiro Velho

2.2. SISTEMAS DE MANOBRA

Segundo (ERBISTI, 2002), os mecanismos mais comumente utilizados para manobra de comportas são os descritos abaixo. Na figura 2.3 são ilustrados os principais sistemas.

- Acionamento hidráulico: pode facilmente multiplicar a energia relativamente pequena empregada no sistema em grandes capacidades de movimentação. Sua operação é rápida e simples.
- Acionamento por fusos: método geralmente utilizado no acionamento manual de comportas de pequeno porte, nas quais, preferencialmente, o fuso fique fora da água.
- Acionamento por cabos de aço: comumente utilizado em conjunto com viga pescadora, de forma que se possa desconectar o cabo da comporta.
- Acionamento por correntes: é semelhante à utilização de cabos de aço. Os cabos, no entanto, são mais vantajosos em relação ao custo e à facilidade de manuseio.

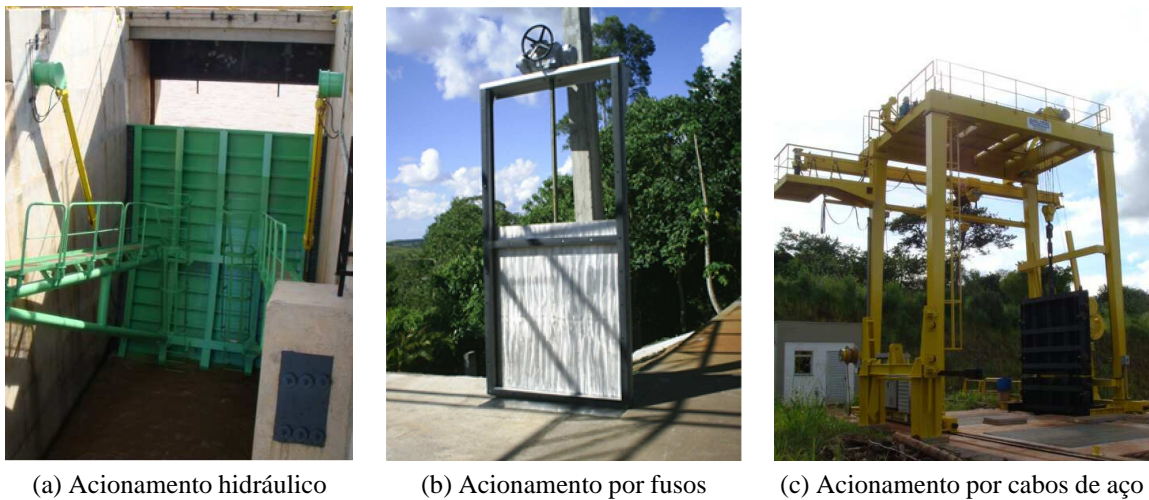


Figura 2.3: Tipos mais comuns de sistemas de manobra de comportas

2.3. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O método permite que a peça em estudo tenha forma geométrica, carregamento e condições de contorno quaisquer. Transforma-se um modelo físico com infinitas incógnitas em um modelo finito, definido por nós, elementos e condições de contorno, como mostrado na figura 2.4.

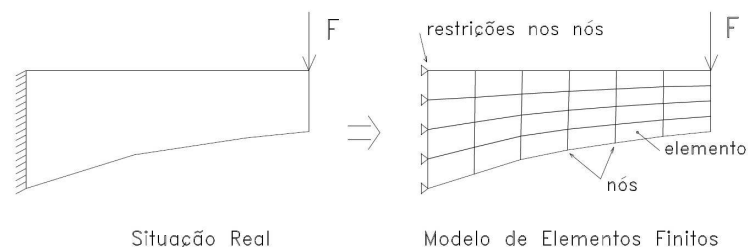


Figura 2.4: Passagem do modelo físico para o modelo em elementos finitos.

Nas análises pelo MEF, os passos descritos abaixo correspondem às etapas de implementação computacional para a aplicação deste tipo de método:

1. Pré-processamento:

- Modelamento: consiste no desenho da forma da peça a ser analisada. Pode ser executado dentro do próprio programa de análise ou importado de outros CAD's (*Computer Aided Design*);
- Malha de elementos finitos: consiste na discretização da estrutura, ou seja, a sua divisão em *elementos* conectados por *nós*;
- Condições de contorno:
 - Restrições: definem como a estrutura se relaciona com o meio ambiente (engastamentos);

- Carregamentos: definem as solicitações às quais a estrutura está submetida (forças nodais, pressões, momentos, carga térmica, etc.).
 - Propriedades do material: definição das características físicas do material a ser utilizado na estrutura.
2. Processamento:
- Cálculo da matriz de rigidez;
 - Cálculo dos deslocamentos nodais e tensões.
3. Pós-processamento:
- Deslocamentos: visualização da estrutura deformada e deslocamentos individuais de nós em regiões de interesse;
 - Visualização das direções principais, valores máximos e mínimos e valores de acordo com critérios de resistência utilizados.

Existem diversos tipos de elementos finitos os quais estão relacionados com os modelos estruturais clássicos. Desta forma, é possível encontrar elementos finitos de barras, estado plano (estado plano de tensões, estado plano de deformações, axissimétrico), cascas e modelos tridimensionais.

Neste trabalho foi utilizado o software Ansys[®] Multiphysics[™] 1 (ANSYS, 2010) para modelar o sistema em elementos finitos.

2.4. ANÁLISE LINEAR ESTÁTICA

A análise linear estática calcula os efeitos da condição de carregamento estático em uma estrutura, enquanto ignora a inércia e os efeitos de amortecimento, como os causados pela variação no tempo da carga. Ela pode, no entanto, incluir efeitos de inércia (como a gravidade e velocidade rotacional) e cargas que variam no tempo, mas que podem ser aproximadas por cargas estáticas equivalentes (como carregamentos estáticos equivalentes causados pelo efeito do vento e cargas sísmicas).

A análise estática determina o deslocamento, estado de tensões, deformações e esforços na estrutura ou componente causados por cargas que não induzem uma inércia significativa e efeitos de amortecimento. Nestes casos, é assumido que os carregamentos e as respostas da estrutura variam muito lentamente em relação ao tempo.

2.5. ANÁLISE NÃO-LINEAR

Não-linearidades estruturais ocorrem com frequência. A característica fundamental é a mudança da rigidez da estrutura em função da carga aplicada, que fica evidente quando é desenhada a curva carregamento *vs* deformação nos casos em que esta situação não-linear ocorre.

¹Ansys Multiphysics é marca registrada de Ansys, Inc.

À medida que a carga é aplicada na estrutura, de forma incremental, a deformação difere do comportamento linear definido pela *Lei de Hooke*.

A característica de não-linearidade estrutural resulta de vários fatores, que podem ser agrupados nestas principais categorias:

1. Variação de estado: possui relação direta com o comportamento de variação do carregamento, incluindo variação de estado e forma de contato entre a estrutura e a carga aplicada;
2. Não-linearidades geométricas: grandes deformações podem causar uma resposta não-linear da estrutura devido à mudança de geometria;
3. Não-linearidades dos materiais: relações não-lineares entre *tensão x deformação* são as causas mais comuns que levam a esta condição. Podem ser causadas por efeitos do ambiente, tempo de aplicação da carga e histórico de carregamento.

Para avaliar corretamente os efeitos citados acima, o carregamento é dividido em uma série de incrementos de carga. Para cada incremento, a geometria da estrutura e sua matriz de rigidez são atualizados e o próximo incremento é aplicado à nova configuração. Esta metodologia é mostrada na figura 2.5.

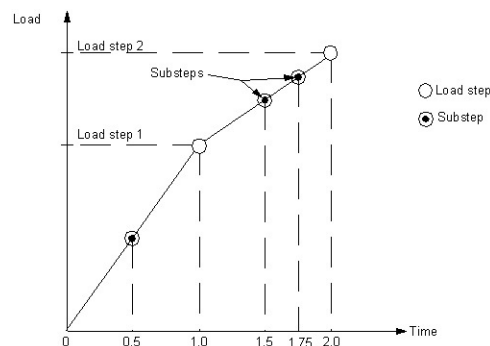


Figura 2.5: Incrementos de carga, subdivisões e tempo.

2.6. MODELO ELASTO-PLÁSTICO E ENCRUAMENTO ISOTRÓPICO

2.6.1. Comportamento elasto-plástico ideal

A relação tensão vs deformação num modelo constitutivo elasto-plástico ideal é apresentada na figura 2.6, onde σ_y representa a tensão de escoamento do material e o termo ∂E_σ , o contorno do conjunto de tensões admissíveis para o material (superfície de escoamento).

Nota-se que, devido à ausência de encruamento neste modelo, o conjunto de tensões admissíveis será constante ao longo do tempo.

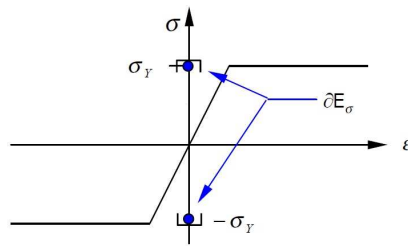


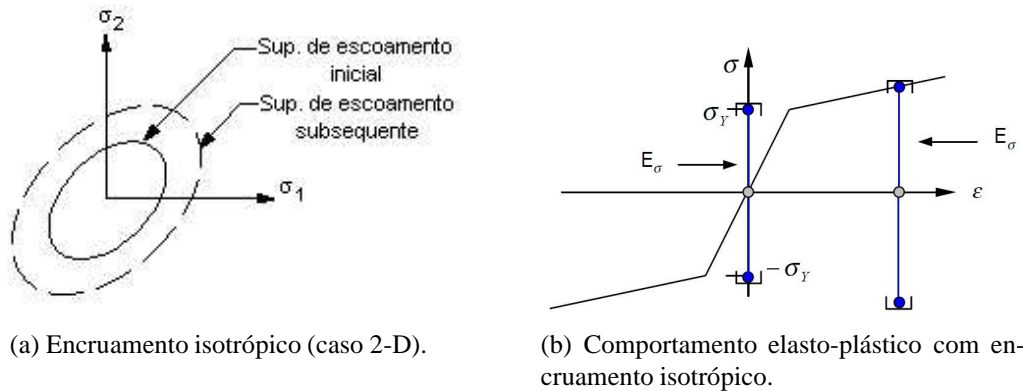
Figura 2.6: Comportamento elasto-plástico ideal.

2.6.2. Encruamento isotrópico

No encruamento isotrópico, a superfície de escoamento permanece centrada em relação à sua condição inicial e se expande em tamanho à medida que a deformação plástica se desenvolve. Este comportamento é usualmente adotado para materiais como aço carbono. O comportamento descrito está mostrado na figura 2.7a. Então, ao ser atingido o limite de escoamento σ_y , temos uma expansão deste limite proporcionalmente à deformação plástica sofrida pelo material e conseqüente encruamento do material.

2.6.3. Comportamento elasto-plástico com encruamento isotrópico

Agora considerando o modelo elasto-plástico ideal e introduzindo o efeito do encruamento isotrópico, uma relação constitutiva elasto-plástica com encruamento isotrópico linear é apresentada na figura 2.7b. Nesta figura, o termo E_σ corresponde ao conjunto de tensões admissíveis. Na figura 2.7, nota-se que o conjunto de tensões admissíveis E_σ não é mais constante



(a) Encruamento isotrópico (caso 2-D).

(b) Comportamento elasto-plástico com encruamento isotrópico.

Figura 2.7: Modelo elasto-plástico com encruamento isotrópico linear

ao longo do tempo, apresentando uma expansão que caracteriza o encruamento isotrópico do material. Esta expansão nos limites de tensões admissíveis devido ao encruamento pode ser utilizado como uma reserva de energia do material, se comparado ao modelo elasto-plástico linear ideal.

2.7. MÉTODO DOS ESTADOS LIMITES

O método dos estados limites utilizado para o dimensionamento de uma estrutura exige que nenhum estado limite aplicável seja excedido quando a estrutura for submetida a todas as combinações apropriadas de ações. Se um ou mais estados limites forem excedidos, a estrutura não atende mais aos objetivos para os quais foi projetada.

Existem dois estados a serem considerados:

- Estados limites últimos (ELU): estão relacionados com a segurança da estrutura sujeita às combinações mais desfavoráveis de ações previstas em toda a vida útil, durante a construção ou quando atuar uma ação especial ou excepcional;
- Estados limites de serviço (ELS): Os estados limites de serviço estão relacionados com o desempenho da estrutura sob condições normais de utilização.

A garantia de segurança no método dos estados limites é traduzida pela equação de conformidade, para cada seção da estrutura:

$$S_d = S(\sum \gamma_{fi} F_i) \leq R_d = R\left(\frac{f_k}{\gamma_m}\right) \quad (2.1)$$

onde:

S_d solicitação de projeto

R_d resistência de projeto

F_i combinação de ações

γ_{fi} coeficiente de majoração das cargas (ou ações)

f_k resistência característica do material

γ_m coeficiente de redução de resistência interno do material

Trata-se de um método que considera as incertezas de forma mais racional do que o método das tensões admissíveis, além de considerar as reservas de resistência após o início da plastificação.

2.7.1. NBR 8800 (2007)

A Norma NBR8800 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 2007a) define os princípios gerais que regem o projeto, à temperatura ambiente, de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto. A norma adota uma formulação compatível com as normas nacionais e internacionais de segurança das estruturas.

Ela é baseada no método dos estados limites, estabelecendo os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações, nas quais:

- (a) Os perfis de aço sejam laminados ou soldados, ou perfis de seção tubular com ou sem costura;
- (b) As ligações sejam executadas com parafusos ou soldas.

Os perfis de aço devem ser fabricados obedecendo-se às normas brasileiras aplicáveis ou, na ausência destas, às normas ASTM aplicáveis.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de manobra original instalado para a comporta de desvio do rio da PCH Retiro Velho é do tipo hidráulico. Devido a problemas ocorridos durante uma das operações de abertura da comporta, surgiu a necessidade de se ter um mecanismo alternativo de manobra. O novo mecanismo deveria movimentar-se juntamente com o original. Nenhuma das hastes de manobra poderia ser desconectada para a ligação do novo sistema, pois as condições de acesso à torre não permitiriam a união das partes novamente. No caso da nova estrutura, figura 3.1, as vigas de suporte inferiores (1) são as responsáveis pela transmissão de movimento à comporta. Se estes elementos não atenderem às solicitações de carga, o restante do sistema de manobra também não atenderá.

De acordo com medições executadas no local, a forma construtiva do mecanismo de manobra alternativo instalado para a comporta vagão de desvio do rio apresenta-se conforme figura 3.1. Com exceção da base de sustentação do sistema principal de manobra (componente 6), todos os outros elementos foram adicionados, formando o novo dispositivo.

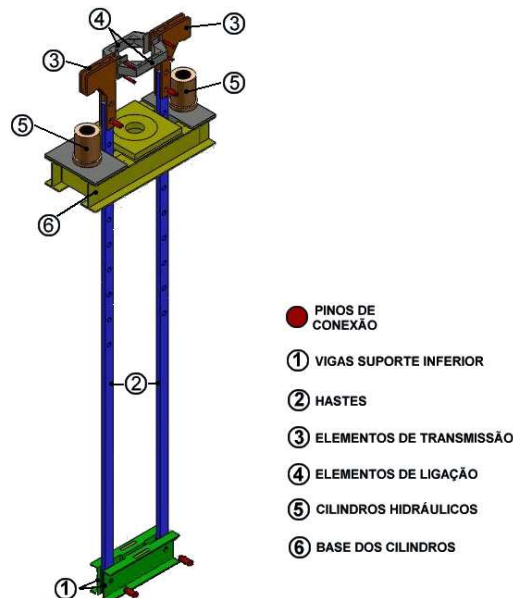


Figura 3.1: Mecanismo de manobra alternativo.

Na figura 3.2, está indicado o ponto onde ocorre a junção dos dois mecanismos de manobra. Nesta posição, é permitido o movimento solidário entre os dois dispositivos sem interferência de um em relação ao outro.

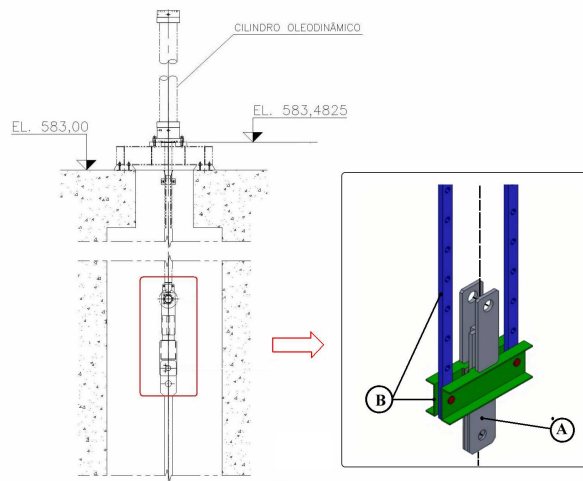


Figura 3.2: Ponto de união entre sistemas de manobra original e alternativo: (A) elemento original (B) novo mecanismo.

4. METODOLOGIA

4.1. DEFINIÇÃO DA FORÇA DE ACIONAMENTO

Conforme (VATECH HYDRO BRASIL LTDA, 2006) e as exigências de (ABNT, 2007b), os esforços de acionamento a serem vencidos pelo mecanismo de manobra proposto são conforme a tabela 4.1. Nesta tabela, foi considerado o peso da parte estrutural (tabuleiro completo), peso do lastro, peso da proteção anti-corrosiva, peso da água e/ou corpos estranhos retidos, peso dos componentes de acionamento, o tipo de vedação lateral e frontal (material, espessura, coeficiente de atrito, pressão média na vedação), número de rodas da comporta, cargas radiais e axiais em cada roda, força de resistência ao giro em cada roda, mancais de rolamento utilizados nas rodas, força nos patins de contraguia, volume de água deslocado durante o fechamento, forças hidrodinâmicas e o empuxo sobre a comporta.

Tabela 4.1: Esforços no acionamento da comporta

Força devida ao peso total da comporta	170008 N
Força total devida ao atrito	99546 N
Força devida à carga hidrostática na vedação frontal	39522 N
Força devida à componente hidrostática	192150 N
Força devida ao empuxo	-19758 N
Força necessária para abrir a comporta	481469 N
Fator de segurança para o acionamento	1,15
Força de acionamento adotada na abertura	553689 N

A carga de 553689 N (553,689 kN) estará dividida em duas áreas de apoio na estrutura, sobre as vigas de suporte inferior. A área de aplicação desta força será de $0,0126 \text{ m}^2$ ($0,2 \text{ m} \times 0,0315 \text{ m} \times 2$). Teremos desta forma, uma carga distribuída equivalente a $43943571,4 \text{ N/m}^2$ ($43,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$).

4.2. ANÁLISE PELA NBR 8800

A seção 5.5.2.3 da norma NBR 8800 permite verificar seções quaisquer, não tubulares, submetidas a momento de torção, força axial, momentos fletores e forças cortantes. A tensão resistente de cálculo para os estados limites últimos a seguir deverá ser igual ou superior à tensão solicitante de cálculo, expressa em termos de tensão normal, σ_{sd} , ou tensão de cisalhamento, τ_{sd} , determinadas pela teoria da elasticidade, utilizando-se as combinações de ações de cálculo. Assim:

- (a) para os estados limites de escoamento sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{sd-a} \leq \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4.1)$$

onde:

σ_{sd-a} tensão normal solicitante de cálculo

f_y tensão de escoamento do material

γ_{a1} coeficiente de ponderação de resistência do material

- (b) para os estados limites de escoamento sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{sd-b} \leq \frac{0,60 \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4.2)$$

onde:

τ_{sd-b} tensão cisalhante solicitante de cálculo

- (c) para os estados limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal:

$$\sigma_{sd-c} \leq \frac{\chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4.3)$$

onde:

σ_{sd-c} tensão limite de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão normal;

χ fator de redução associado à resistência e à compressão.

- (d) para os estados limites de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão de cisalhamento:

$$\tau_{sd-d} \leq \frac{0,60 \cdot \chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (4.4)$$

onde:

τ_{sd-d} tensão limite de instabilidade ou flambagem sob efeito de tensão de cisalhamento;

O coeficiente γ_{d1} é definido pela tabela 3 da NBR 8800, reproduzida no Anexo. Já o coeficiente χ utilizado nas expressões acima é definido de acordo com a curva de dimensionamento e compressão, também retirada da NBR8800 (Anexo), o qual é função do tipo de seção transversal, do modo de instabilidade e do eixo em relação ao qual a instabilidade ocorre.

O valor χ é obtido em função da esbelteza reduzida λ_0 , utilizando as tabelas fornecidas pela NBR 8800 (vide Anexo).

(a) para tensões normais:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E}} \quad (4.5)$$

onde:

σ_E tensão crítica elástica normal.

(b) para tensões de cisalhamento:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{0.60 \cdot f_y}{\tau_E}} \quad (4.6)$$

onde:

τ_E tensão crítica elástica de cisalhamento.

Ambas as solicitações, σ_E e τ_E , referem-se ao estado limite de flambagem em questão, que no caso desta avaliação, estará relacionado à carga crítica do primeiro modo de flambagem, da seguinte forma:

$$\sigma_E = P_{crit} \cdot \sigma_{3-max} \quad (4.7)$$

$$\tau_E = P_{crit} \cdot \tau_{max} \quad (4.8)$$

onde:

P_{crit} autovalor para o primeiro modo de flambagem;

σ_{3-max} terceira tensão principal (compressão) máxima em um ponto da peça, aplicando sobre ela uma carga de valor unitário;

τ_{max} esforço cortante máximo em um ponto da peça, avaliado nas direções XY, XZ ou YZ.

Para as tensões resistentes de cálculo, será utilizado o modelo em elementos finitos com uma solução linear estática e comportamento elasto-plástico ideal do material, a ser resolvido pelo do software Ansys[®] Multiphysics[™] para análise elástica e de flambagem. Neste modelo, será aplicada uma carga unitária distribuída ($P = 1 \text{ N/m}^2$) e retiradas as informações necessárias para entrada nas equações 4.1 a 4.8. Como a carga aplicada será unitária, será associado um

coeficiente multiplicador α_0 , α_1 , α_2 e α_3 para cada caso de carga descrito em a, b, c e d, respectivamente.

$$\sigma_{sd-a} = \sigma_{1-max} \cdot \alpha_0 \quad (4.9)$$

$$\sigma_{sd-b} = \tau_{max} \cdot \alpha_1 \quad (4.10)$$

$$\sigma_{sd-c} = \sigma_{3-max} \cdot \alpha_2 \quad (4.11)$$

$$\sigma_{sd-d} = \tau_{max} \cdot \alpha_3 \quad (4.12)$$

O resultado encontrado para o menor valor dos coeficientes será a carga máxima distribuída que o componente suporta, ou seja:

$$P_{sol} = \alpha_{min} [N/m^2] \quad (4.13)$$

onde

$$\alpha_{min} = \text{minimo}[\alpha_0 \dots \alpha_3] \quad (4.14)$$

Cabe salientar que desta forma o que se está utilizando é análise numérica convencional (elástica e de flambagem elástica) para avaliar o comportamento último de estruturas metálicas, combinando os valores obtidos pela análise numérica e pela metodologia proposta pela NBR 8800.

4.3. MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Na discretização das vigas de suporte inferior, utilizou-se um elemento de casca de 8 nós (SHELL93), com a região de carga delimitada pelo contato entre a haste de manobra da comporta e a mesa das vigas de suporte inferior. Por simetria, somente uma das vigas foi considerada nos cálculos. A discretização resultou em uma malha, refinada ao redor dos furos, totalizando 41.468 nós. O refinamento, no geral, foi excessivo, e um estudo de convergência de malha seria necessário para avaliar qual seria a discretização adequada.

A figura 4.1 mostra a discretização e as dimensões básicas do componente.

Na figura 4.1a, a região de carga distribuída aplicada refere-se à área onde as solicitações sobre a estrutura serão atribuídas ao modelo, correspondendo a 0,0063 m² (200 mm x 31,5 mm). Na mesma figura, são mostradas as restrições impostas (apoios do modelo físico), onde define-se $U_x = 0$, $U_y = 0$ apenas na metade superior de ambos os furos e $U_z = 0$ em somente um dos furos.

4.4. ANÁLISE NÃO-LINEAR

Nesta abordagem do problema, será resolvido o modelo em elementos finitos (seção 4.3) em duas etapas: primeiramente, pela análise de flambagem elástica ("buckling") por autovalores, onde se obtém os modos de flambagem e a carga crítica (P_{crit}) correspondente, servindo

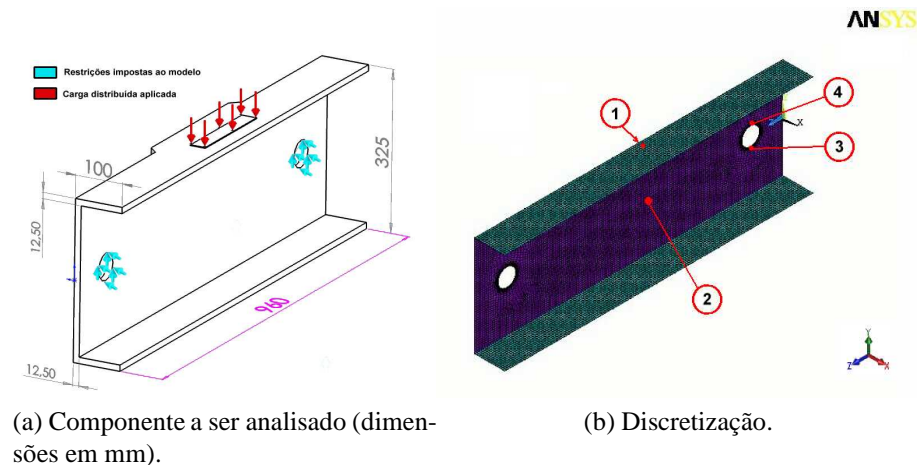


Figura 4.1: Discretização da viga de suporte inferior

para incorporar as imperfeições geométricas iniciais e, após, pela análise não-linear física e geométrica utilizando-se o método do comprimento de arco, com a inclusão das imperfeições geométricas obtidas na etapa anterior e deformações plásticas.

O material de fabricação das vigas (ASTM A36 - aço carbono), com tensão de escoamento de 250 MPa, será modelado como um material homogêneo e isotrópico, considerando o encruamento isotrópico e a superfície de escoamento de von Mises. A figura 4.2 mostra o gráfico de comportamento do aço adotado.

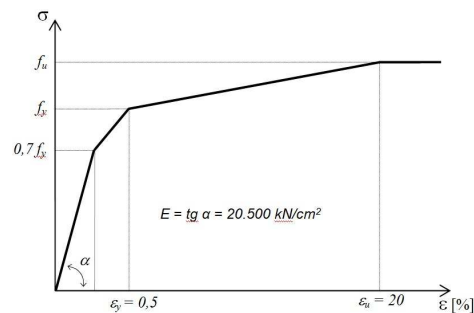


Figura 4.2: Gráfico tensão-deformação: modelo elasto-plástico trilinear adotado para simular o comportamento do aço.

As simulações numéricas foram baseadas na metodologia implementada por (GRIGOLETTI, 2008), utilizando o software Ansys[®].

5. RESULTADOS

5.1. ESTADOS LIMITES

Da análise linear estática resolvida por elementos finitos com a aplicação de uma carga unitária ($P = 1 \text{ N/m}^2$), foram obtidos os esforços iniciais, ou seja, σ_1 (primeira tensão principal), σ_3 (terceira tensão principal) e τ_{XY} , τ_{YZ} e τ_{XZ} (esforços cortantes), conforme a tabela 5.1.

Foram escolhidos quatro pontos de interesse, considerando os níveis de tensão naqueles locais, a fim de determinar a região mais solicitada. A posição dos pontos está indicada na figura 4.1b.

Tabela 5.1: Esforços iniciais (em Pa) avaliados nos 4 pontos de interesse

Ponto	1	2	3	4
σ_1	22,9	7,5	28,9	35,6
σ_3	-26,5	-9,3	-29,1	-35,9
τ_{XY}	-0,4	-0,2	2,3	3,0
τ_{YZ}	$-0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,9 \cdot 10^{-1}$	$-1,0 \cdot 10^{-1}$	1,9
τ_{XZ}	$-0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	0,9	-0,3

O valor de carga crítica (P_{crit}), para o primeiro modo de flambagem, foi de $0,241 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Com este valor e os resultados da tabela 5.1, chega-se aos resultados apresentados nas tabelas 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

Tabela 5.2: Resultados para σ_e e τ_e , em MPa

Ponto	1	2	3	4
σ_e	6375,4	2241,8	7007,1	8647,8
τ_e	103,1	40,7	555,0	711,4

Tabela 5.3: Coeficientes calculados

Ponto	1	2	3	4
$\lambda_0 - c$	0,20	0,33	0,19	0,17
$\lambda_0 - d$	1,21	1,92	0,52	0,46
χ_c	1,000	0,934	1,000	1,000
χ_d	0,429	0,210	0,832	0,865

De acordo com os resultados da tabela 5.5, o valor mínimo encontrado foi de α_2 para o ponto 4. Isto significa dizer que, considerando as equações 4.13 e 4.14, a carga máxima distribuída que o componente suporta pela NBR 8800 é de $6333715,9 \text{ N/m}^2$ ($6,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$). Para o valor de carga distribuída nominal (sem o coeficiente de ponderação de resistência do material γ_{a1}), tem-se o valor de $6967086,5 \text{ N/m}^2$ ($6,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$).

Tabela 5.4: Tensões solicitantes de cálculo, em Mpa

Ponto	1	2	3	4
σ_{sd-a}	227,3	227,3	227,3	227,3
τ_{sd-b}	136,4	136,4	136,4	136,4
σ_{sd-c}	227,3	212,3	227,3	227,3
τ_{sd-d}	58,5	28,6	113,5	117,9

Tabela 5.5: Coeficientes multiplicadores de carga

Ponto	1	2	3	4
α_0	9909859,9	30327292,1	7877464,5	6392325,1
α_1	318606627,0	806885422,3	59211305,4	46193643,7
α_2	8591242,4	22820116,9	7816774,8	6333715,9
α_3	136682243,0	169445938,7	49263806,1	39957501,8

5.2. ANÁLISE NÃO-LINEAR

Para a análise estática não-linear, a carga distribuída aplicada ao modelo foi de $20 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ e adotado um critério de interrupção da simulação caso fosse atingido o deslocamento máximo de 20 mm na direção do eixo y. Este deslocamento máximo ocorreu próximo à região de aplicação da carga, com 64% da carga máxima a ser aplicada, ou seja, $12,8 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Este critério de deslocamento máximo foi adotado devido à forma como o programa aplica o carregamento. Quando se define uma pressão, F/A , a mesma é atribuída perpendicularmente à área de aplicação, mantendo-se perpendicular à medida que ocorre o deslocamento ou deformação da região.

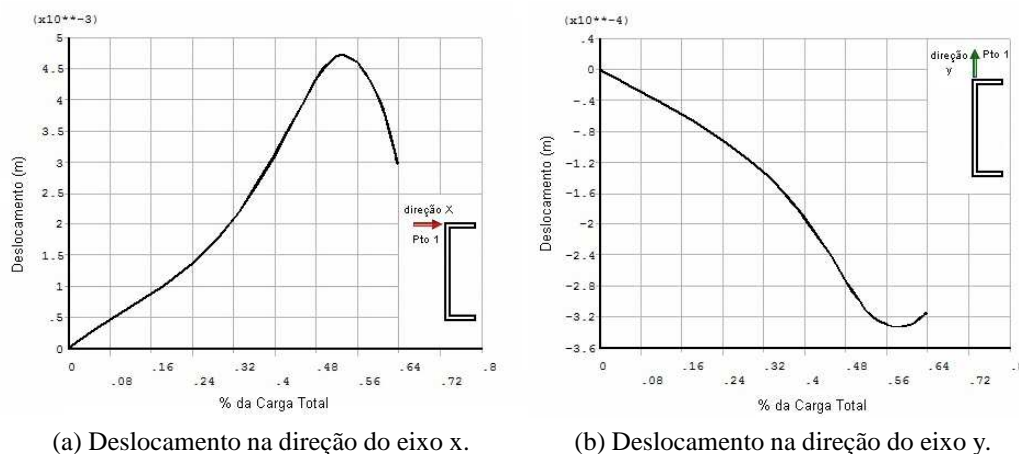


Figura 5.1: Deslocamentos no Ponto 1 (conforme figura 4.1b) nas direções x e y

A figura 5.1 mostra o comportamento não-linear do ponto 1 durante a evolução das tensões na peça. Com base nos deslocamentos deste ponto, pode-se definir o valor de $10,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ como a solicitação máxima que o componente suporta, o que corresponde a 52% do carregamento inicialmente aplicado ($20 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$). Este valor é encontrado pelo ponto de inflexão no

gráfico da figura 5.1a.

Nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são mostrados os valores de tensão para os resultados encontrados com a análise não-linear, quando atingido o valor de $10,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

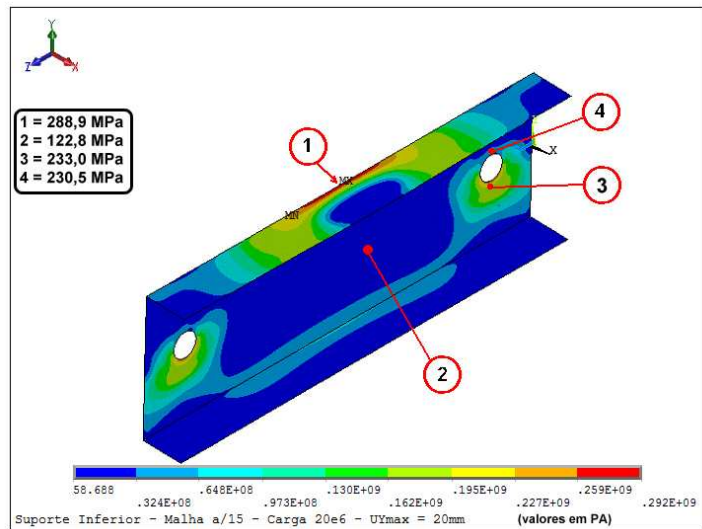


Figura 5.2: Valores de σ_1 para 52% do carregamento da análise não-linear.

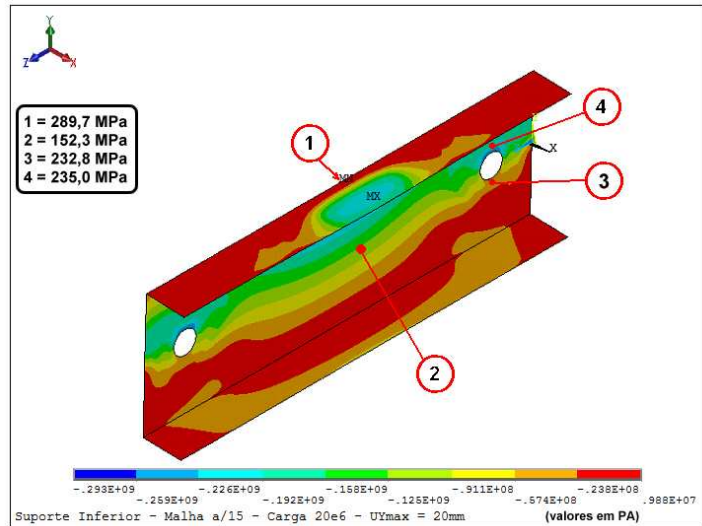


Figura 5.3: Valores de σ_3 para 52% do carregamento da análise não-linear.

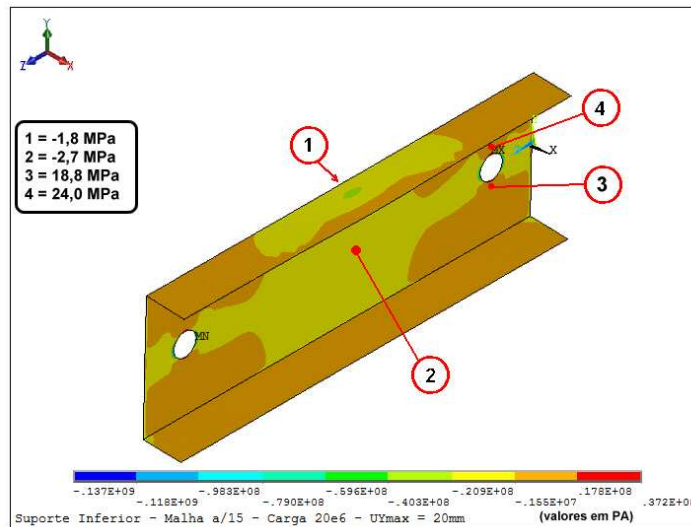


Figura 5.4: Valores de τ_{xy} para 52% da carga da análise não-linear.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados, tanto pelo método dos estados limites através da NBR 8800, quanto pela análise não-linear, o componente analisado não atende às solicitações que deveria suportar.

A solicitação de projeto ficou em $43,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, enquanto que pela avaliação dos estados limites com a NBR8800, chegou-se a um valor de resistência nominal de projeto igual a $6,9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$. Por meio da análise não-linear, o valor obtido como limite de resistência da estrutura foi de $10,4 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.

Uma explicação para a diferença encontrada entre os dois tipos de avaliação reside no fato da análise não-linear considerar o material como sendo perfeitamente homogêneo e isotrópico, enquanto a norma leva em conta as imperfeições inerentes ao processo de produção dos aços estruturais e possíveis tensões residuais nos perfis.

Apesar dos valores diferentes, o comportamento descrito por ambas as formas de análise aponta para o mesmo sentido. Pela NBR8800, o primeiro estado limite atingido é a instabilidade causada pelo esforço normal (α_2 para o ponto 4 na tabela 5.5). Ao mesmo tempo, na análise não-linear, nota-se um comportamento do deslocamento na direção do eixo x (deslocamento para o ponto 1, figura 5.1a), demonstrando o início de instabilidade ou flambagem lateral.

Ambas as análises dependem da resolução do modelo em elementos finitos, e como foi comentado no texto, resultados melhores podem ser obtidos após um estudo de convergência de malha para a discretização pretendida.

Voltando ao mecanismo de manobra como um todo, mesmo que outras partes da estrutura atendam às exigências de carga, como o elemento diretamente ligado à comporta não resiste aos esforços, todo o mecanismo fica comprometido. A parte analisada está atualmente submersa dentro da torre de desvio do rio, o que torna economicamente inviável o seu reparo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro, Novembro 2007. 40 p.
- ABNT. *NBR8883 - Cálculo e fabricação de comportas hidráulicas*. Rio de Janeiro, Novembro 2007. 40 p.
- ANEEL. *Resolução N.º 394, de 4 de dezembro de 1998. Estabelece os critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na condição de pequenas centrais hidrelétricas*. 1998. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 136, n. 234-E, 7 de dez. 1998. Seção 1, p. 45. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>>.
- ANEEL. *Resolução N.º 626, de 12 de novembro de 2002. Autoriza a empresa Araguaia Centrais Elétricas S.A. a estabelecer-se como Produtor Independente de Energia Elétrica, mediante a exploração do potencial hidráulico denominado PCH Retiro Velho, localizado no rio da Prata, Município de Aporé, Estado de Goiás*. 2002. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 139, n. 220, 13 de nov. de 2002. Seção 1, p. 78. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2002626.pdf>>.
- ANEEL. *Resolução Autorizativa N.º 460, de 13 de fevereiro de 2006. Anui com a transferência do controle societário da Retiro Velho Energética S.A., detido pela Araguaia Centrais Elétricas S.A. - ACESA, para a PCHPAR - PCH Participações S.A.* 2006. Diário Oficial da União, Brasília, DF, v. 143, n. 37, 21 de fev. de 2006. Seção 1, p. 143. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/rea2006460.pdf>>.
- ANSYS, I. *Help on-line*. <http://www.ansys.com/>: [s.n.], junho 2010. [Http://www.ansys.com/](http://www.ansys.com/). Disponível em: <<http://www.ansys.com/>>.
- ERBISTI, P. C. F. *Comportas Hidráulicas*. [S.l.]: Interciência, 2002.
- GRIGOLETTI, G. de C. *Otimização via algoritmos genéticos de perfis U formados a frio submetidos à compressão utilizando o Método da Resistência Direta*. Tese (Doutorado) — UFRGS, 2008.
- MERRITT, R. L. B. F. S. *Structural steel designer's handbook*. [S.l.]: United States, 1999.
- POPOV, E. P. *Introdução à Mecânica dos Sólidos*. [S.l.]: Edgar Blücher, 1978.
- VATECH HYDRO BRASIL LTDA. *NC8305-04719 - Desvio do Rio - Comporta Vagão - Memorial de Cálculo*. Revisão a. São Paulo, Setembro 2006. 80 p.

ANEXO A – Valores de γ_m , χ e λ_0 conforme NBR8800

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de ponderação das resistências γ_m

Combinações	Aço estrutural, pinos e parafusos (γ_a)		Concreto (γ_c)	Aço das armaduras (γ_s)
	Escoamento e Instabilidade (γ_{a1})	Ruptura (γ_{a2})		
Normais	1,10	1,35	1,40	1,15
Especiais ou de construção	1,10	1,35	1,20	1,15
Excepcionais	1,00	1,15	1,20	1,00

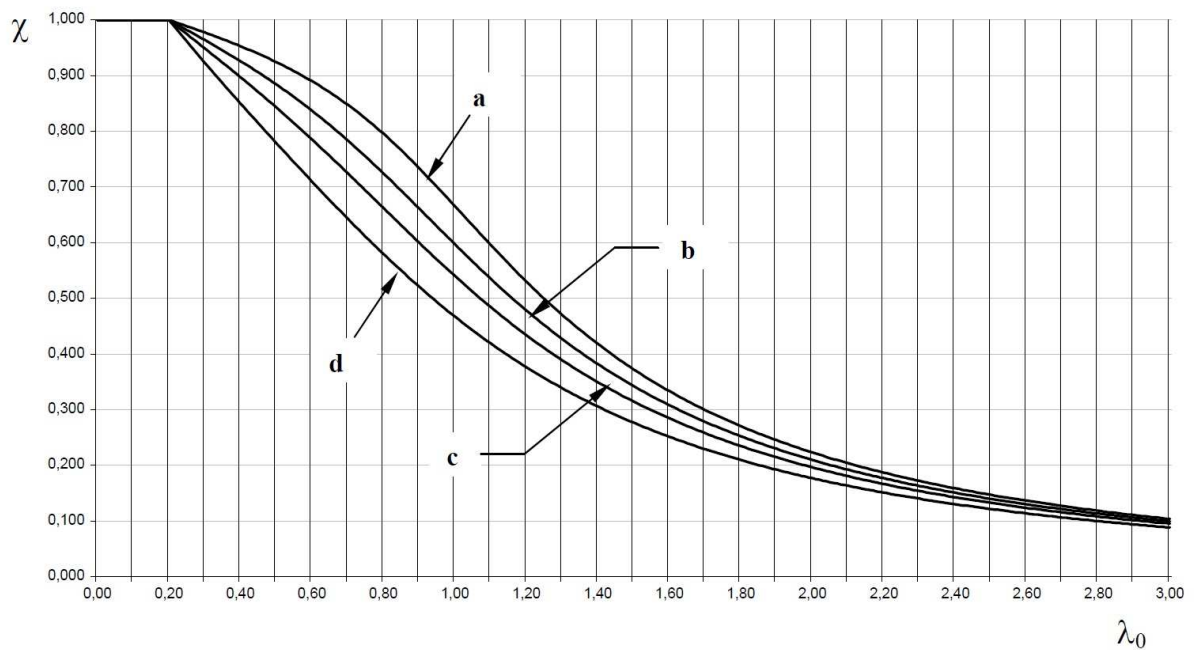


Figura 11 - Curvas de dimensionamento à compressão (ver tabela 4)

