

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS - MG

ENGENHARIA MECÂNICA
TIAGO ANDRADE BORTOLOTI

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca
N. Class. M 627 1352
Cutter B 439 a
Ano/Ed. 2010

ANÁLISE E SOLUÇÃO DA DEFICIÊNCIA DE OPERAÇÃO DA COMPORTA DE
LIMPEZA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITUTINGA

Varginha - MG
2010

TIAGO ANDRADE BORTOLOTI

SISTEMA DE BIBLIOTECAS

FEPESMIG

BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

**ANÁLISE E SOLUÇÃO DA DEFICIÊNCIA DE OPERAÇÃO DA COMPORTA DE
LIMPEZA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITUTINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. Esp. Alexandre Lopes.

**Varginha - MG
2010**

TIAGO ANDRADE BORTOLOTI

**ANÁLISE E SOLUÇÃO DA DEFICIÊNCIA DE OPERAÇÃO DA COMPORTA DE
LIMPEZA DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITUTINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico pela banca Examinadora composta pelos membros: Prof. Esp. Márcio de Santana, Prof. Ms. Alexandre Soriano e Prof. Esp. Alexandre Lopes

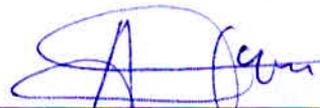
Aprovado em 01 / 12 / 2010



Prof. Esp. Márcio de Santana



Prof. Ms. Alexandre Soriano



Prof. Esp. Alexandre Lopes

OBS.:

Dedico este trabalho a toda minha família, amigos e professores, que contribuíram para o alcance deste objetivo.

Agradeço primeiramente a Deus, por essa oportunidade. Agradeço também a minha família e amigos, pelo apoio em toda a trajetória do curso.

“Que o teu trabalho seja perfeito para que,
mesmo depois da tua morte, ele permaneça.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, do Grupo CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais apresenta problemas na operação de abertura (descida) desde sua instalação. A Comporta é importante para a usina, pois tem a função de limpeza do reservatório, onde transfere para o rio a jusante folhas e outros corpos estranhos que ficam acumulados na superfície do reservatório, que ao longo do tempo poderiam comprometer o bom desempenho das máquinas geradoras de energia elétrica. Como a operação da Comporta indicava impedimento ao movimento de descida, uma vez que foi projetada para descer por atuação da força de peso próprio, optou-se então em calcular as forças de atrito resistentes oriundas de seu projeto e instalação, visando analisar se o projeto é adequado para proporcionar a abertura pela atuação da força de peso próprio. Diante dos resultados satisfatórios em relação ao seu projeto, foi desenvolvido um sistema mecânico de manobra adicional ao existente, com o objetivo de possibilitar a operação de abertura da Comporta. O desempenho deste sistema foi satisfatório.

Palavras-chaves: Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga. Operação de Abertura. Forças de Atrito. Mecanismo de Manobra

ABSTRACT

The cleaning behavior of Hydroelectric Itutinga Group CEMIG - Companhia Energetica de Minas Gerais, has problems with opening operation (down) since its installation. The behavior is important for the plant because it has the function of cleaning the tank, where it transfers to the river downstream leaves and other foreign bodies that are accumulated on the surface of the reservoir, which over time could compromise the proper performance of the machines generating electricity. As the operation indicated Holds impediment to the movement of descent as it was designed to descend by the force of weight acting itself, it was decided then to calculate resistant forces of friction arising out of your design and installation. Given the satisfactory results in relation to your project, we developed a mechanical maneuver additional to the existing one that aims to enable the operation to open the Floodgate. The performance of this system was satisfactory.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Exemplo de Tabuleiro de Comportas	14
Figura 02 – Componentes da Peças Fixas de uma Comporta	15
Figura 03 – Exemplo de Acionamento Hidráulico.....	16
Figura 04 – Exemplo por Acionamento por Cabos de Aço	16
Figura 05 – Exemplo de Comporta Ensecadeira.....	19
Figura 06 – Exemplo de Comporta Lagarta.....	20
Figura 07 – Exemplo de Comporta Segmento	20
Figura 08 – Exemplo de Comporta Vagão.....	21
Figura 09 - A Comporta de Limpeza sendo Içada para Manutenção	24
Figura 10 – A Comporta de Limpeza sendo Içada para Manutenção – Vista Geral.....	25
Figura 11 – Paramento e Vigamento a Montante da Comporta de Limpeza	25
Figura12 – Sistema de Suspensão e Içamento da Comporta de Limpeza.....	26
Figura 13 – Diagrama de Forças Atuantes na Comporta	28
Figura 14 – Carga Hidrostática em Comportas Plana de Superfície.....	30
Figura 15 – Roda da Comporta de Limpeza.....	31
Figura 16 – Eixo das Rodas da Comporta de Limpeza.....	31
Figura 17 – Borracha de Vedação Tipo Nota Musical.....	32
Figura 18 – Desenho do Mecanismo Original da Comporta de Limpeza.....	36
Figura 19 – Projeto Desenho do Mecanismo Adicional.....	37
Figura 20 – Detalhe dos Tambores do Mecanismo de Manobras.....	39
Figura 21 – Mecanismo de Manobras – Componentes Superiores.....	39
Figura 22 - Comporta de Limpeza e Componentes Inferiores do Mecanismo de Manobras.....	40
Figura 23 - Detalhe da Polia Inferior	40
Figura 24 - Chapa de Encabeçamento do Cabo de Aço Adicional.....	41
Figura 25 - Abertura Parcial da Comporta de Limpeza.....	42
Figura 26 - Abertura Total da Comporta de Limpeza.....	43
Figura 27 - Água Vertida da Comporta de Limpeza.....	43
Figura 28 - Comporta sendo Fechada.....	44
Figura 29 – Comporta Totalmente Fechada.....	45

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO	12
2.0 REFERÊNCIAL TEÓRICO	13
2.1. Comportas Hidráulicas.....	13
2.2. Principais Aplicações.....	13
2.3. Componentes de uma Comporta.....	13
2.4. Tabuleiro.....	13
2.5. Peças Fixas.....	14
2.6. Mecanismos de Manobras.....	15
2.7. Classificações.....	17
2.8. Classificação quanto a Função.....	17
2.9. Classificação quanto a Movimentação.....	17
2.10. Classificação quanto a Descarga.....	17
2.11. Classificação quanto a Composição do Tabuleiro.....	18
2.12. Classificação quanto a Forma do Paramento.....	18
2.13. Classificação quanto a Localização.....	18
2.14. Tipos de Comportas.....	19
2.15. A Comporta Vagão.....	21
3.0. DESENVOLVIMENTO	23
3.1. Estudo de Caso da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga.....	23
3.2. Definição do Método de Análise do Projeto.....	23
3.3. Dados Técnicos da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga	26
3.4. Roteiros e Cálculos Realizados para Verificação do Projeto da Comporta	26
3.5. Cálculo das Variáveis Envolvidas.....	28
3.6. Cálculo do Peso Próprio da Comporta (G).....	28
3.7. Cálculo do Empuxo de Arquimedes (E)	29
3.8. Cálculo da Força de Atrito nas Rodas (Fr).....	29
3.9. Cálculo da Força de Atrito nas Vedações Laterais (Fvl)	32
3.10. Cálculo da Força de Atrito na Vedação Inferior (Fvi)	33
3.11. Cálculo da Carga de Abaixamento (CA).....	34
3.12. Análise do Resultado.....	34
3.13. Solução do Problema.....	35
3.14. O Mecanismo de Manobra Adicional.....	35
3.15. Componentes Adicionais.....	35
3.16. Dimensionamentos Necessários dos Componentes.....	37
3.17. Definição do Material dos Componentes Adicionais.....	38
4.0. RESULTADO DO ESTUDO	42
5.0. CONCLUSÃO	46
6.0. BIBLIOGRAFIA	47

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um estudo no segmento de comportas hidráulicas, com abordagem em suas principais aplicações, componentes e tipos de comportas. Especificamente, apresenta um estudo sobre a Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, localizada no município de Itutinga, do Grupo CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, que visa identificar se o projeto da referida comporta é adequado, visto que o sistema apresenta problemas na operação de abertura desde sua instalação. Esta comporta é acionada por gravidade através de seu peso próprio na operação de abertura, com movimento de translação de descida em ralação ao reservatório.

O método escolhido para análise do projeto foi através da determinação das forças de atrito resistentes ao movimento de descida da comporta, que está detalhado e concluído neste trabalho.

Após a análise do projeto, está abordado um estudo para a solução do problema de abertura da comporta, através de um mecanismo de manobra adicional ao existente do projeto original.

1.1. OBJETIVO

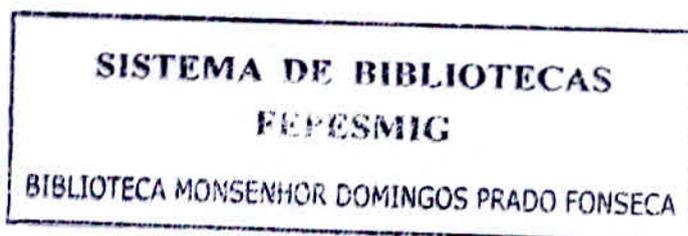
O estudo foi motivado pela busca da solução para a deficiência de operação de abertura da comporta, visto que a mesma não estava descendo por atuação da força de seu peso próprio. O objetivo está vinculado em calcular o esforço de manobra da comporta, através da identificação das forças de atrito resistentes ao movimento de descida. De posse dos resultados, torna-se necessário o desenvolvimento de um sistema mecânico adicional de manobras, que possibilite o movimento de abertura.

O correto funcionamento da comporta é importante para a Usina, sendo que na superfície do reservatório se acumulam folhas e outros corpos estranhos, que ao longo do tempo poderiam comprometer o bom desempenho das máquinas geradoras de energia elétrica. A função da comporta, através de sua abertura, é transferir estes detritos para o rio à jusante do reservatório.

A comporta é importante também pelo fato de poder ser usada como um vertedouro em caso de falta de energia na usina, uma vez que seria necessário dar vazão ao reservatório para impedir inundações. Os vertedouros principais são movidos através de motores elétricos associados com cabos de aço, e a comporta de limpeza tem o acionamento mecânico manual, através de engrenagens e cabos de aço, ou seja, não necessita de energia elétrica para seu acionamento de abertura, possibilitando assim vazão no reservatório em situações de emergência.

2.0. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Comportas Hidráulicas



Comporta Hidráulica é um elemento do sistema de controle artificial de vazão de água de rios e bacias, para fins de geração de energia elétrica, de agricultura, de lazer e para impedir inundações. (ERBISTE, 1987)

2.2. Principais Aplicações

São aplicadas em controle de nível de reservatórios, proteção de equipamentos, limpeza de reservatórios, regularização de vazões, manutenção de equipamentos, fechamento de obras de desvio de rio, tomadas d'água para usinas hidrelétricas, entre outras. (ERBISTE, 1987)

2.3. Componentes de uma Comporta

Uma comporta compõe-se basicamente de três elementos: tabuleiro, peças fixas e mecanismo de manobras. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 19)

2.4. Tabuleiro

É o componente principal de uma comporta. Trata-se do elemento móvel que serve de anteparo à passagem d'água e é constituído de paramento, vigamento, vedações (perfis de borracha aparafusados no paramento) e elementos de apoio e guiamento. (ERBISTE, 1987)

A figura abaixo nos dá o exemplo de um paramento de comportas.



Figura 1: Exemplo de Tabuleiro de Comportas
Fonte: Autor

De acordo com a geometria do tabuleiro, estes podem ser planos ou radiais. No caso da figura 1, trata-se de um paramento com geometria radial.

2.5. Peças fixas

São os componentes que ficam embutidos no concreto e servem para guiar e alojar o tabuleiro, redistribuir os esforços para o concreto e como elementos de apoio da vedação. (ERBISTE, 1987)

Os componentes básicos são a soleira, caminho de rolamento ou deslizamento, guias laterais e contra-guias, frontal e apoios das vedações. A figura abaixo nos dá a idéia de um exemplo do sistema de peças fixas de uma comporta.

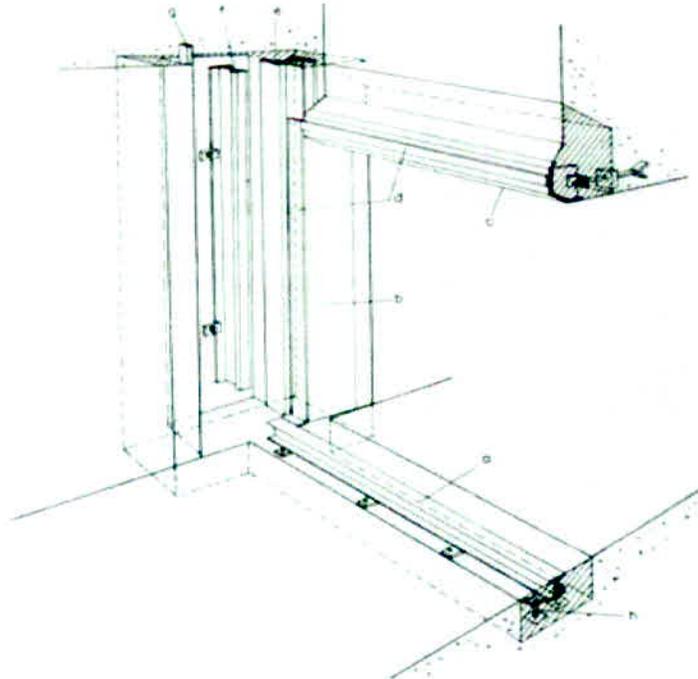


Figura 2: Componentes das Peças Fixas de uma Comporta
Fonte: (ERBISTE, 1987)

As regiões estão sinalizadas como (a) Soleira; (b) blindagem; (c) frontal; (d) apoio das vedações; (e) caminho de rolamento; (f) guia lateral; (g) contra guia

2.6. Mecanismos de Manobras

São os dispositivos responsáveis pela abertura e fechamento das comportas. Existem diversos tipos de mecanismos de manobras e dentre os mais importantes pode-se citar os fusos, cabos de aço, correntes de rolo e acionamento hidráulico. (ERBISTE, 1987)

A figura abaixo nos dá o exemplo de uma comporta de superfície com acionamento hidráulico.



Figura 3: Exemplo de Acionamento Hidráulico
Fonte: Autor

A figura abaixo é de um desenho com as vistas de elevação, planta e lateral, de um sistema de acionamento por cabos de aço, associados com motor e caixa de redução.

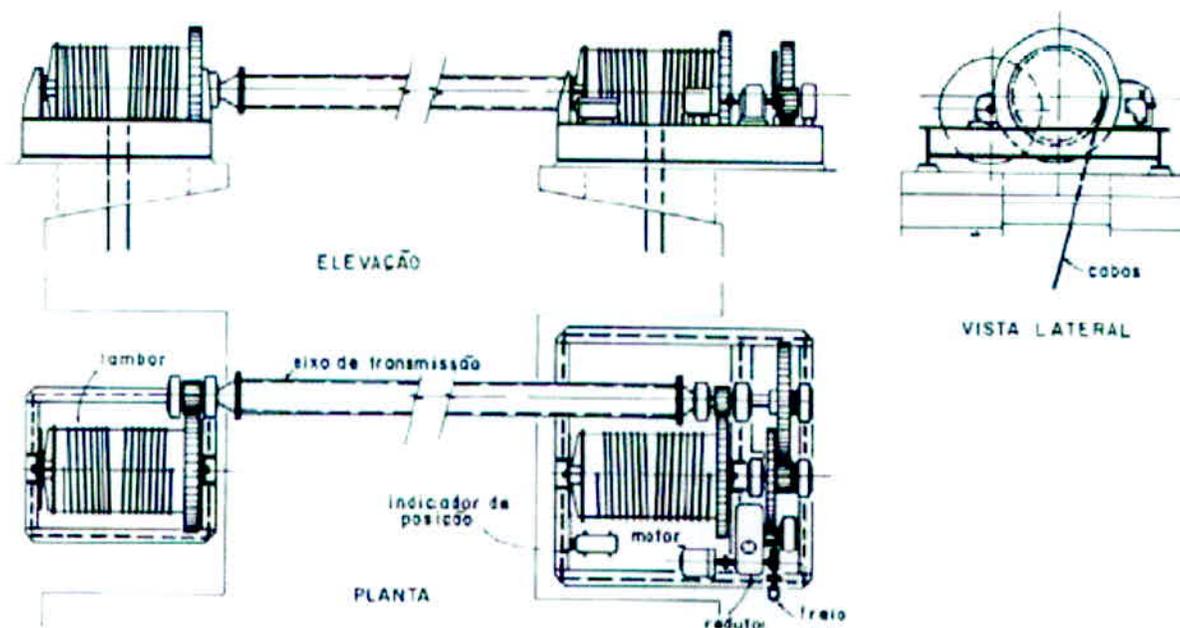


Figura 4: Exemplo de Acionamento por Cabos de Aço
Fonte: (ERBISTI, 2002)

2.7. Classificações

De acordo com suas características, as comportas podem ser agrupadas de varias formas e podem-se citar, entre outros, os seguintes critérios de classificação: função, movimentação, descarga, composição do tabuleiro, localização e forma do paramento. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 21)

2.8. Classificação quanto a Função

Conforme a função desempenhada em uma instalação hidráulica, as comportas podem ser de serviço, emergência e de manutenção. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 21)

2.9. Classificação quanto a Movimentação

De acordo com o movimento executado pelo tabuleiro ao longo de suas guias, as comportas são classificadas em translação, rotação e transloração. (ERBISTE, 1987)

2.10. Classificação quanto a Descarga

Em função da descarga da água em relação à posição do tabuleiro, as comportas podem ser classificadas em: comportas com descarga por cima do tabuleiro; comportas com descarga por baixo do tabuleiro e comportas com descarga por cima e por baixo do tabuleiro. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 23)

2.11. Classificação quanto a Composição do Tabuleiro

As comportas podem ser simples, mistas ou duplas, conforme a quantidade e os tipos de elementos que compõe o tabuleiro.

As simples têm o tabuleiro composto por um único elemento. Nas mistas, o tabuleiro principal é dotado, no seu topo, de uma comporta basculante. São conhecidas muitas aplicações de comportas segmento, vagão, rolante e Stoney combinadas com comportas basculantes, principalmente na Europa. Nas comportas duplas, o tabuleiro é composto de dois elementos moveis superpostos. (ERBISTE, 1987)

2.12. Classificação quanto a Forma do Paramento

As comportas podem ser planas ou radiais, em função da geometria do paramento. (ERBISTE, 1987)

Os seguintes tipos são projetados com paramento plano: gaveta, lagarta, vagão, Stoney, ensecadeira e telhado. São comportas radiais: segmento, setor, tambor, visor, cilíndrica e rolante. As comportas basculante e mitra podem ter paramento plano ou curvo. As comportas segmento com braços submetidos a tração, muito comuns na Alemanha, têm, na maioria das vezes, paramento plano. (ERBISTI, 2002, v. 2, p. 16)

2.13. Classificação quanto a Localização

As comportas podem ser de superfície ou de fundo. As de fundo são obrigatoriamente dotadas de vedações em todo o perímetro do paramento, enquanto que as de superfície dispensam a vedação na aresta superior. (ERBISTE, 1987)

Todos os tipos de comportas podem ser usados em obras de superfície, porém somente alguns são aplicados em instalações de fundo, a saber: vagão, segmento, lagarta, gaveta, ensecadeira, cilíndrica e Stoney. É usual classificarem-se as comportas de acordo com a altura d'água sobre a soleira, sendo as de baixa pressão até 15m, as de média pressão de 15 a 30m e as de alta pressão mais de 30m. (ERBISTI, 2002, v. 2, p. 16)

2.14. Tipos de Comportas

Os termos usualmente empregados na designação dos tipos de comportas são basculante, cilíndrica, ensecadeira, gaveta, lagarta, mitra, rolante, segmento, setor, Stoney, tambor, telhado, vagão e visor. Esses tipos estão definidos na norma brasileira NBR-7259/82. (ERBISTI, 2002, v. 2, p. 14)

A figura abaixo é de uma comporta ensecadeira utilizada em uma instalação de superfície.

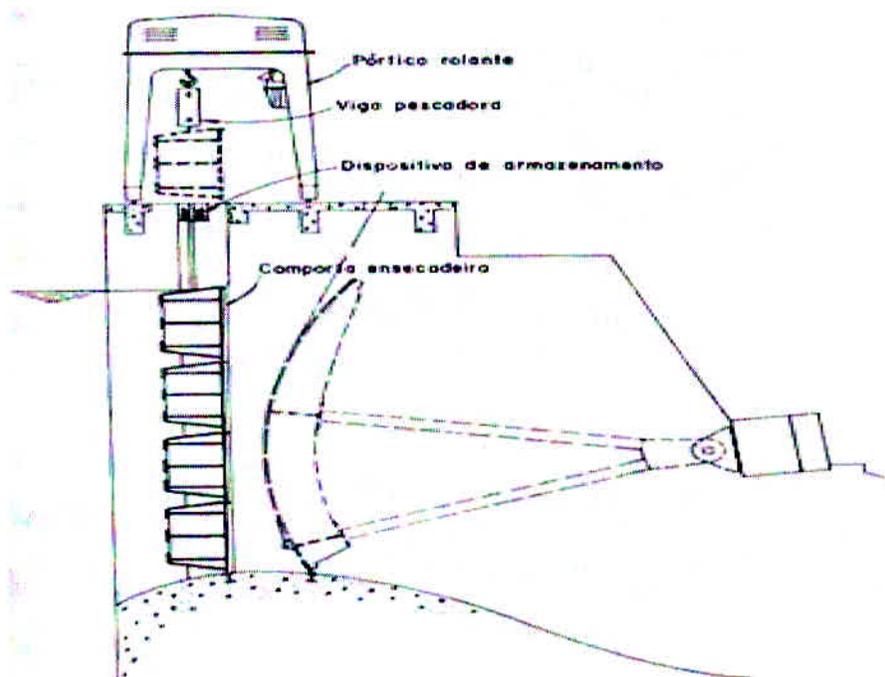


Figura 5: Exemplo de Comporta Ensecadeira
Fonte: (ERBISTE, 1987)

Estão sinalizadas as indicações de pórtico rolante, viga pescadora e dispositivo de armazenamento.

A figura abaixo é de uma comporta lagarta, utilizada em uma instalação de fundo.

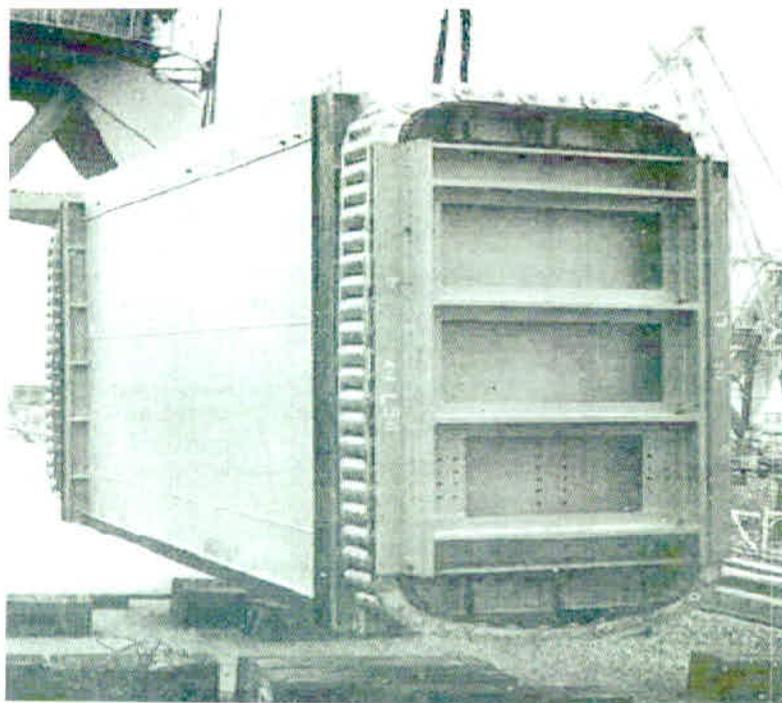


Figura 6: Exemplo de Comporta Lagarta
Fonte: (ERBISTE, 1987)

A figura abaixo é de uma comporta segmento, utilizada em uma instalação de superfície.



Figura 7: Exemplo de Comporta Segmento
Fonte: Autor

SISTEMA DE BIBLIOTECAS
FEPESMIG
 BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

2.15. A Comporta Vagão

Como a Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, principal objeto de estudo neste trabalho, é do tipo Vagão, torna-se importante conhecermos as principais características deste tipo de comporta.

A Comporta Vagão é certamente o tipo mais usado de comporta. Em sua forma habitual, constitui-se basicamente de tabuleiro, eixos, rodas e vedações. 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 em 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 diminuição dos esforços de atrito e de transmissão de cargas às peças fixas e ao concreto. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 88)

A figura abaixo é de uma comporta vagão utilizada em uma instalação de fundo.

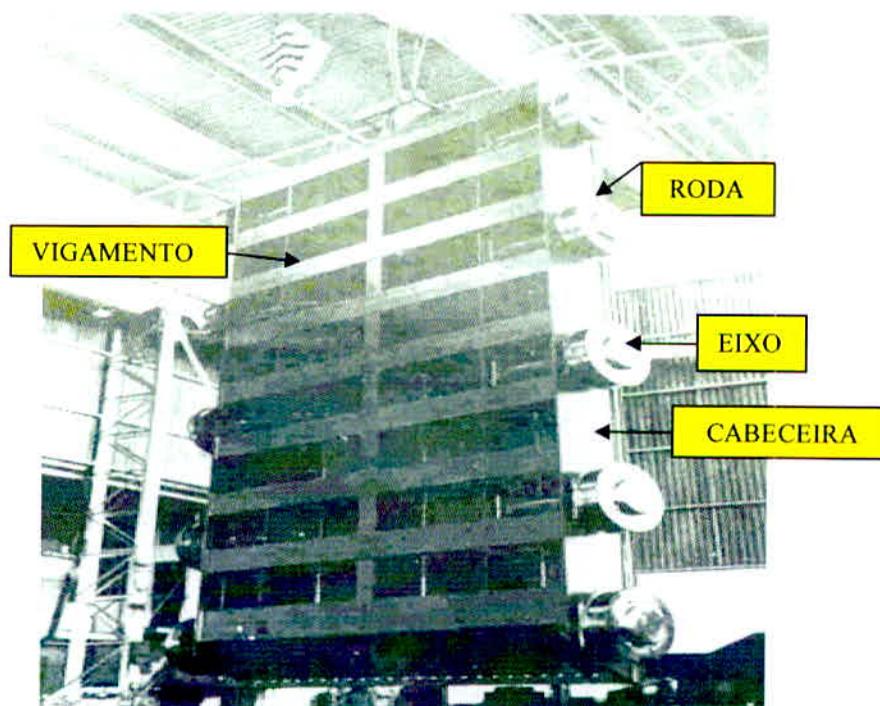


Figura 8: Exemplo de Comporta Vagão
 Fonte: (ERBISTI, 2002)

Estão sinalizados os componentes das rodas, vigamento, eixos e cabeceira, principais componentes de uma comporta vagão.

O campo de aplicação das Comportas Vagão é muito amplo. Como exemplos de sua versatilidade, citam-se as seguintes aplicações:

Tabela 1: Exemplos de Aplicação de Comportas Vagão

OBRA	APLICAÇÃO	VÃO(m)	ALTURA(m)	ALTURA D'ÁGUA(m)	FABRICANTE
São Simão	Tom. D'água	6,50	11,30	43,78	Voith
Jurumirim	Desc. Fundo	3,25	4,70	26,50	DSD-Noell
Sobradinho	Porta de Eclusa	17,00	18,50	18,00	ALSTOM
Itumbiara	Desvio	5,00	7,86	26,15/88,15	Bardella
P. Colombia	Tubo de Sucção	10,85	5,43	35,60/47,00	ALSTOM
Bariri	Aqueduto de Eclusa	2,95	2,10	32,40	CKD Blansko
Bariri	Vertedouro	11,5	6,00	6,00	ALSTOM

Fonte: (ERBISTI, 2002)

As comportas tipo vagão usadas em instalações de superfície (em vertedouros, por exemplo), têm vedação em três lados: nas laterais e na soleira e podem ser projetada com paramento a montante ou a jusante do vigamento. O paramento estende-se desde a soleira até o nível d'água máximo do reservatório, geralmente ultrapassando-o de 0,30 a 0,50m, para atuar como borda livre e impedir a descarga ou o respingo por sobre o tabuleiro devido às ondas criadas pelo vento no reservatório. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 90)

3.0. DESENVOLVIMENTO

3.1. Estudo de Caso da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga

De acordo com os empregados da Usina Hidrelétrica de Itutinga, esta comporta apresenta problemas na atividade de abertura desde sua instalação, ou seja, não desce quando o sistema de suspensão é liberado, o que deveria acontecer sendo que o sistema foi projetado e construído para descer por atuação da força de peso próprio da comporta, liberando a descarga de água por cima do tabuleiro.

A comporta tem um papel importante na Usina, pois tem a função de limpeza do reservatório, onde na abertura descarrega para o rio a jusante folhas e outros corpos estranhos que ficam acumulados na superfície do reservatório, que poderiam ao longo do tempo comprometer o funcionamento das máquinas geradoras.

Além da função de limpeza, esta comporta pode trabalhar como um vertedouro em situações de emergência onde é necessário dar vazão ao nível do reservatório, devido falta de energia na usina, uma vez que os vertedouros principais são acionados através de motores elétricos associados com cabos de aço. Como a comporta de limpeza possui o acionamento mecânico manual através de engrenagens e cabos de aço, o acionamento pode ser realizado mesmo com a falta de energia.

Diante da importância da comporta, foram realizados os estudos necessários para verificação da conformidade do projeto/instalação, bem como o desenvolvimento de um sistema adicional de manobra que possibilite a abertura da comporta.

3.2. Definição do Método de Análise do Projeto

Como a comporta já estava em operação, ou seja, trabalhando no bloqueio do fluxo de água do reservatório, não era possível a visualização de seus sistemas de vedação e apoio, para verificação de algum fator externo que poderia estar provocando o impedimento do movimento de descida, devido estes sistemas estar submersos parcialmente ou totalmente.

Diante desta questão, optou-se em realizar os cálculos das forças de atrito existentes resistentes ao movimento de descida da comporta. Este método possibilita concluir se o peso próprio da comporta é suficiente ou não para provocar o movimento de translação de descida.

A figura abaixo é da comporta de limpeza sendo içada para manutenção.



Figura 9: A Comporta de Limpeza sendo içada para Manutenção
Fonte: Autor

A comporta passou por manutenção, para recuperação das rodas, mancais de rolamento e vedações. Porém mesmo com a reforma, a abertura não foi possível ao voltar com a comporta em operação, ratificando a importância da realização dos cálculos necessários.

A figura abaixo é de uma vista geral da comporta sendo içada para manutenção, com utilização de cavalete.



Figura 10: A Comporta de Limpeza sendo içada para Manutenção – Vista Geral
Fonte: Autor

A figura abaixo é da vista da região montante da comporta, onde está o vigamento. Esta região também foi recuperada na atividade de manutenção.

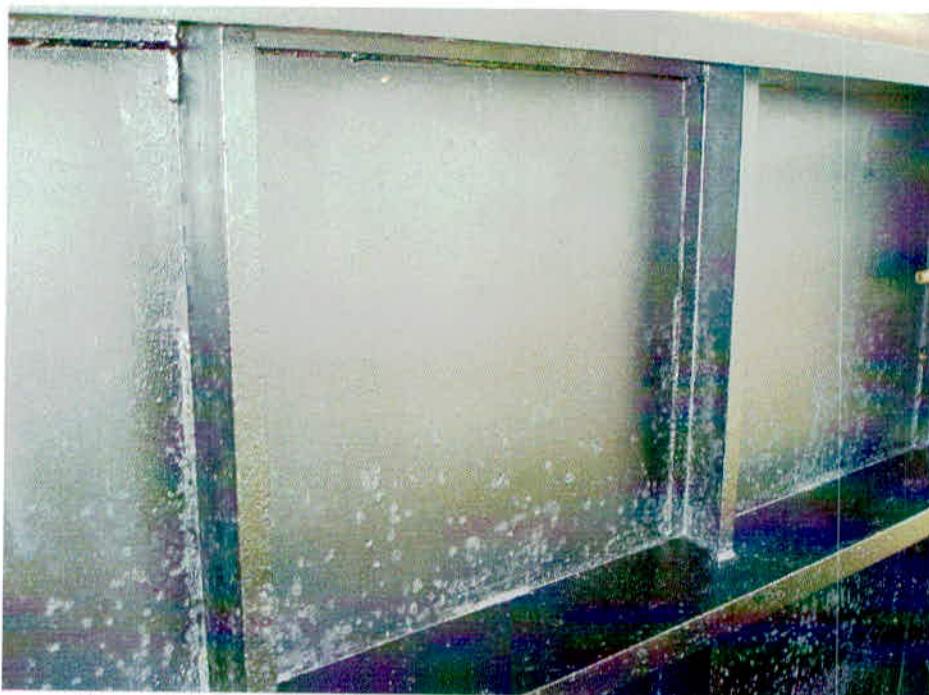


Figura 11: Paramento e Vigamento a Montante da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

3.3. Dados Técnicos da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga

Para a realização da análise sobre a eficiência do projeto original da comporta, torna-se necessário conhecer os dados técnicos da comporta. São os dados abaixo:

- Tipo: Plana Metálica de Vagão de Superfície;
- Número de rodas: 4
- Altura d'água sobre a soleira: 3m;
- Vão: 3m;
- Altura: 3m
- Sistema de Abertura: Por gravidade (peso próprio);
- Sistema de Fechamento/Suspensão: Mecânico Manual por Cabos de Aço;
- Vedações: Tipo Nota Musical

3.4. Roteiro e Cálculos Realizados para Verificação do Projeto da Comporta

Para movimentação de uma comporta é necessário que o dispositivo de manobras tenha uma capacidade de carga superior às forças resistentes. (ERBISTE, 1987, v. 1, p. 244)

No caso da Comporta de Limpeza, o dispositivo de manobras na operação de abertura é o peso próprio da comporta.



Figura 12: Mecanismo de Manobras da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

Segundo (ERBISTE, 1987, v. 1 p. 244) as forças que surgem na movimentação de uma comporta compõem-se de:

- a) G = Peso Próprio da Comporta;
- b) E = Empuxo de Arquimedes (referente à parte submersa da comporta);
- c) Fr = Força de Atrito nas Rodas;
- d) Fvl = Força de Atrito nas Vedações Laterais;
- e) Fvi = Força de Atrito na Vedação inferior;
- f) Fh = Forças Hidrodinâmicas.

Neste estudo estaremos desconsiderando as forças hidrodinâmicas, pois as mesmas geralmente são identificadas através de ensaios em modelos reduzidos. (ERBISTE, 1987).

Para o caso do sistema da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, as forças de atrito das rodas e as forças de atrito das vedações têm a direção vertical para cima, ou seja, sentido oposto ao peso próprio da comporta que provoca o movimento de descida.

Com essa análise, podemos definir a Carga de Abaixamento CA para a Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga conforme equação abaixo:

$$CA = (G - E) - Fr - Fvl - Fvi$$

(Eq. 1)

Fonte: Análise Técnica do Autor

Onde:

CA = Carga de Abaixamento em kN;

G = Peso Próprio da Comporta em kN;

E = Empuxo de Arquimedes em kN (referente à parte submersa da comporta);

Fr = Força de Atrito nas Rodas em kN;

Fvl = Força de Atrito nas Vedações Laterais em kN;

Fvi = Força de Atrito na Vedação Inferior em kN.

A figura abaixo é do diagrama de forças atuantes na operação de abertura da comporta.

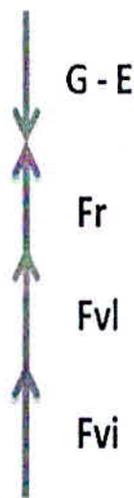


Figura 13: Diagrama de Forças Atuantes na Operação de Abertura da Comporta
Fonte: Autor

Analisando a (Eq. 1), podemos concluir que a Comporta irá descer se a diferença entre o peso próprio e o empuxo for maior que as forças de atrito resistentes.

3.5. CÁLCULO DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

Conforme verificado no item 3.4, para identificação da carga de abaixamento CA, torna-se necessário calcularmos o peso próprio da comporta, empuxo deslocado, e as forças de atrito resistentes ao movimento de descida. Este roteiro está detalhado nos itens 3.6 a 3.11.

3.6. Cálculo do Peso Próprio da Comporta (G)

O peso aproximado em KN de uma comporta vagão é dado conforme (Eq. 2).

$$G = 0,735(B^2hH)^{0,697}$$

(Eq. 2)

Fonte: (ERBISTI, 2002)

Onde:

B = Vão Livre em m;

h = Altura da Comporta em m;

H = Altura D'água na Soleira em m.



De acordo com os dados técnicos da comporta, podemos aplicar a (Eq. 2):

$$G = 0,735(3^2 \cdot 3 \cdot 3)^{0,697} \rightarrow G = 15,72 \text{ kN}$$

3.7. Cálculo do Empuxo de Arquimedes (E)

O Empuxo de Arquimedes referente à área submersa da comporta pode ser estimado conforme a (Eq. 3).

$$E = \frac{G}{7,85}$$

(Eq. 3)

Fonte: (ERBISTE, 1987)

Aplicando a (Eq. 3): $E = \frac{15,72}{7,85} \rightarrow E = 2 \text{ kN}$

3.8. Cálculo da Força de Atrito nas Rodas (Fr)

Seu valor máximo ocorre com a comporta fechada e é dada em kN pela (Eq. 4).

$$Fr = \frac{W(\mu r + f)}{R}$$

(Eq. 4)

Fonte: (ERBISTE, 1987)

Onde:

W = Carga Hidrostática Atuante sobre as Rodas em kN;

R = Raio da Roda ou Rolo, em cm;

r = Raio Médio do Mancal de Rolamento ou Raio Interno da Bucha, em cm;

μ = Coeficiente de Atrito do Mancal ou da Bucha;

f = Coeficiente de Atrito de Rolamento, em cm.

É necessário então, calcular a Carga Hidrostática atuante sobre a Comporta. A Figura 13 simula a atuação da Carga Hidrostática na comporta fechada. O desenho é de uma comporta de superfície, assim como a Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga.

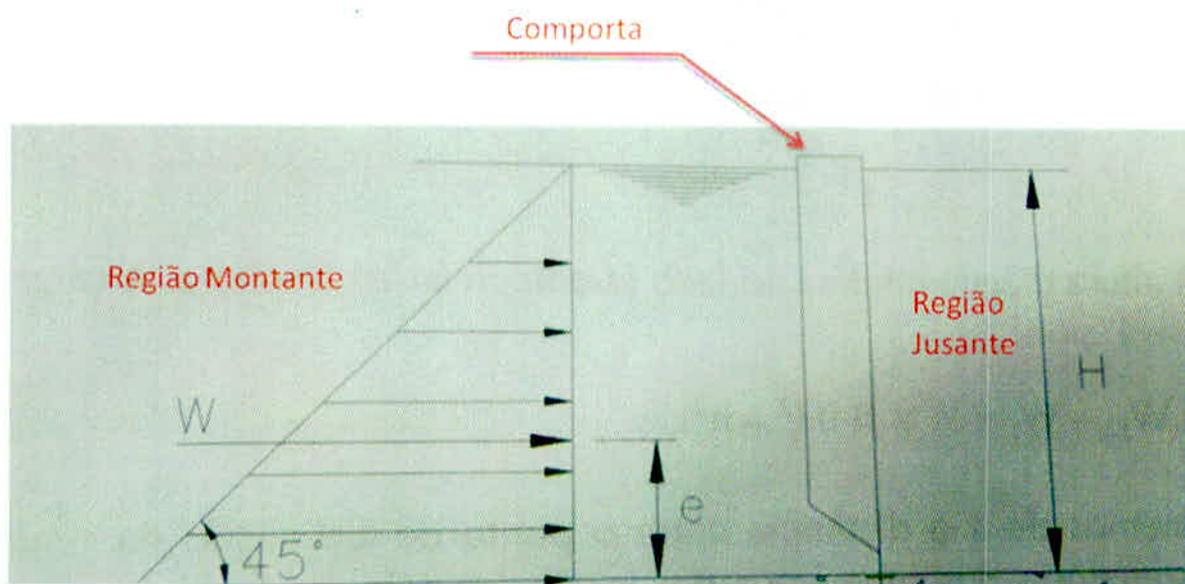


Figura 14: Carga Hidrostática em Comportas Plana de Superfície
Fonte: (ERBISTI, 2002)

Como a Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga é do tipo plana de superfície, e na condição fechada, possui água somente a montante, a Carga Hidrostática W máxima ocorre com a Comporta totalmente fechada e é dada em kN conforme (Eq. 5).

$$W = \frac{\gamma B H^2}{2}$$

(Eq. 5)

Fonte: (ERBISTE, 1987)

Onde:

γ = Peso Específico da Água = 10kN/m³;

B = Vão Livre em m;

H = Altura D'água sobre a Soleira em m.

Aplicando a (Eq. 5): $W = \frac{10 \cdot 3,3^2}{2} \rightarrow W = 135\text{kN}$

O raio das rodas e o raio médio do mancal de rolamento medem respectivamente $R = 15\text{cm}$ e $r = 2,2\text{cm}$. Abaixo, foto da roda da comporta de limpeza retirada para manutenção.



Figura 15: Roda da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

Abaixo, foto do eixo utilizado nas rodas da comporta, que também foi recuperado na atividade de manutenção.

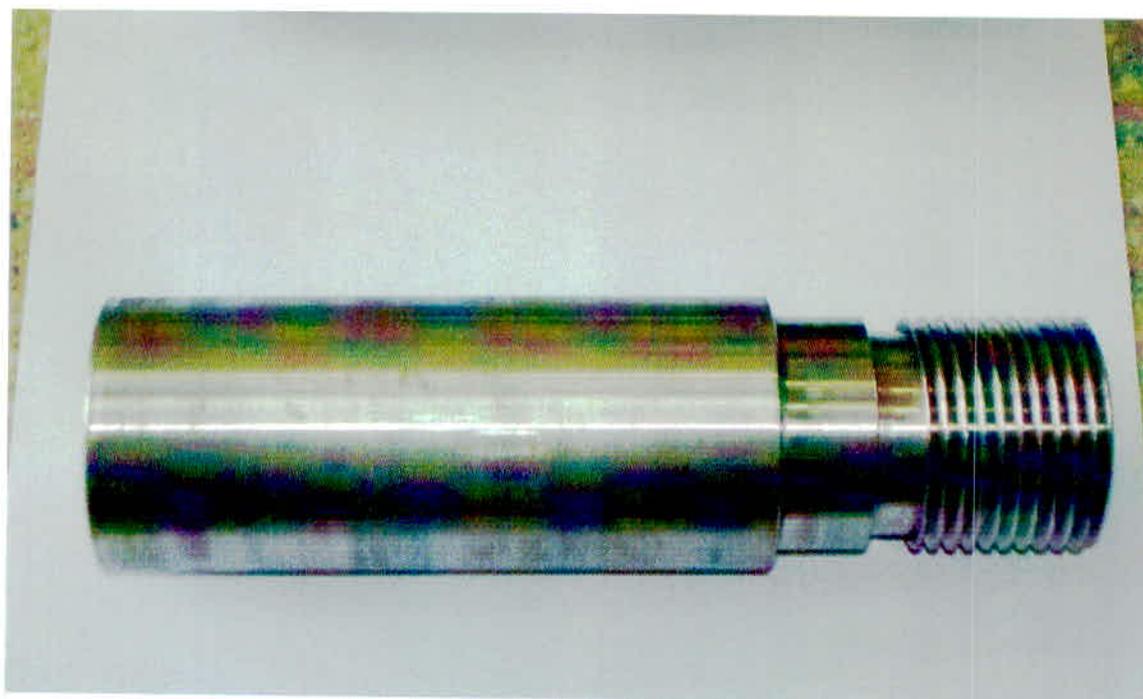


Figura 16: Eixo das Rodas da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

No caso de mancais de rolamento, adota-se $\mu = 0,015$. O coeficiente de atrito de rolamento f pode ser considerado igual a 0,05cm. (ERBISTE, 1987)

$$\text{Aplicando a (Eq. 4): } Fr = \frac{135 \cdot (0,015 \cdot 2,2 + 0,05)}{15} \rightarrow Fr = 0,747 \text{ kN}$$

3.9. Cálculo da Força de Atrito nas Vedações Laterais (Fvl)

A força de atrito resultante em função das vedações laterais é dada em kN conforme a (Eq. 6) abaixo.

$$Fvl = \frac{\mu p l (b^2 + a^2 + at)}{b}$$

(Eq. 6)
(ERBISTE, 1987)

Onde:

μ = Coeficiente de Atrito entre a Borracha de Vedação e a Área de Aço para Deslizamento;

p = Pressão Correspondente a Coluna D'água no Centro da Vedação, em kN/m²;

l = Comprimento Unitário da Vedação Lateral, em m;

a, b, t = Dimensões específicas da borracha de vedação em m, conforme figura abaixo.

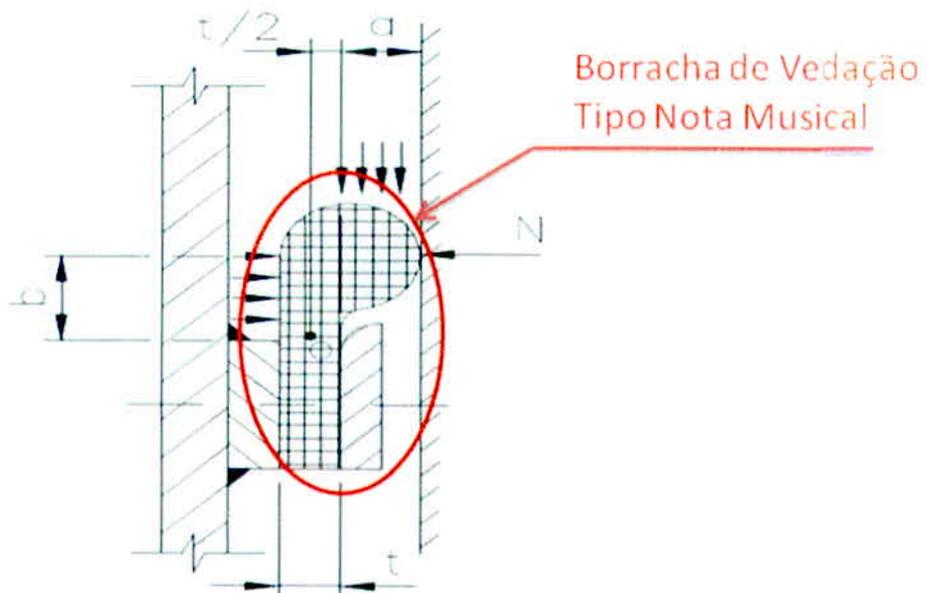


Figura 17: Borracha de Vedação Tipo Nota Musical
Fonte: (ERBISTE, 1987)

A pressão correspondente da coluna d'água no centro da vedação é definida conforme (Eq. 7).

$$p = \frac{HY}{2}$$

(Eq. 7)

Fonte: (ERBISTE, 1987)

Onde:

H = Altura D'água sobre a Soleira em m.

γ = Peso Específico da Água = 10kN/m^3 ;

De acordo com os dados técnicos da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga:

$$p = \frac{3.10}{2} \rightarrow p = 15\text{kN/m}^2$$

O comprimento l da vedação lateral é igual à altura h da comporta, ou seja, conforme dados técnicos da comporta igual a 3m.

Segundo (CEMIG, 2009) testes realizados pela RUBBERART indicaram coeficientes de atrito estático μ entre a borracha de vedação e o aço em torno de 1,35. Portanto vamos utilizar $\mu = 1,35$. As dimensões a , b e t da borracha de vedação utilizada no sistema da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga medem, respectivamente 0,0354; 0,0254 e 0,0508m.

$$\text{Aplicando a (Eq. 6): } Fvl = \frac{1,35.15.3.(0,0354^2+0,0254^2+(0,0254.0,0508))}{0,0354} \rightarrow Fvl = 5,47\text{kN}$$

3.10. Cálculo da Força de Atrito na Vedação Inferior (Fvi)

A força de atrito na vedação inferior é dada em kN conforme (Eq. 8).

$$Fvi = \frac{\mu pl(b^2 + a^2 + at)}{2b}$$

(Eq. 8)

(ERBISTE, 1987)

Onde:

μ = Coeficiente de Atrito entre a Borracha de Vedação e a Área de Aço para Deslizamento;

p = Pressão Correspondente a Coluna D'água no Centro da Vedação, em kN/m^2 ;

l = Comprimento Unitário da Vedação Lateral, em m;

a, b, t = Dimensões específicas da borracha de vedação em m, conforme figura abaixo.

Obs.: As variáveis são as mesmas utilizadas na (Eq. 6).

$$\text{Aplicando a (Eq. 8): } \frac{1,35 \cdot 15,3 \cdot (0,0354^2 + 0,0254^2 + 0,0254 \cdot 0,0508)}{2,0354} \rightarrow \mathbf{Fvi = 2,73kN}$$

3.11. Cálculo da Carga de Abaixamento (CA)

De posse de todas as forças envolvidas nos esforços de manobra da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, podemos verificar se o projeto é adequado ou não, ou seja, se a comporta deveria descer por atuação da força de peso próprio.

Para isso, vamos aplicar a (Eq. 1).

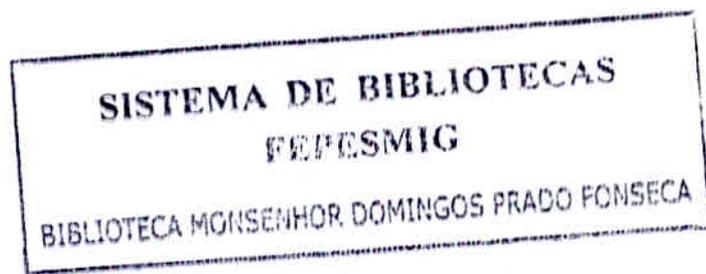
$$CA = (15,72 - 2) - 0,747 - 5,47 - 2,73$$

$$CA = \mathbf{4,773kN \text{ ou } 477,3kgf}$$

3.12. Análise do Resultado

Analisando o resultado, podemos verificar que o projeto é adequado, e a comporta deveria descer por atuação da força de peso próprio, pois a componente $(G - E)$ é maior do que o somatório das forças de atrito resistentes ao movimento de translação de descida.

Esta condição motiva a hipótese da existência de algum fator externo que pode estar causando atrito e impedimento ao movimento de descida, provavelmente no nível da vedação inferior (soleira) ao concreto de alojamento da comporta. Este fator pode ser alguma falha na construção e instalação da comporta. Como estes sistemas estão submersos, não é possível a visualização para comprovação desta hipótese.



3.13. Solução do Problema

Como a comporta estava em operação, não era possível visualizar a soleira e o concreto de alojamento, para verificação da existência de algum fator externo que poderia estar causando atrito e impedimento ao movimento de descida. Diante disto, foi sugerido o desenvolvimento de um sistema mecânico de manobra adicional ao já existente, de modo que esse sistema provocasse uma força vertical para baixo, somando com a força de peso próprio da comporta, possibilitando assim o movimento de descida (abertura).

3.14. O Mecanismo de Manobra Adicional

O mecanismo de manobra adicional consiste em adaptar tambores, polias e cabos de aço ao sistema existente de manobras da comporta. Os componentes adicionais foram projetados e instalados de modo que os dois sistemas funcionassem de forma simultânea, ou seja, enquanto o mecanismo original libera o cabo de aço para que a comporta possa descer devido atuação da força de peso próprio, o mecanismo adicional provoca uma força vertical para baixo, através das polias inferiores e dos cabos de aço que são fixados na região superior da comporta.

Da mesma forma, os sistemas funcionam na operação de subida (fechamento), sendo que, enquanto o sistema original traciona seus cabos de aço para içamento da comporta, o sistema adicional recolhe os cabos de aço que foram utilizados na operação de abertura.

3.15. Componentes Adicionais

O sistema de manobra adicional é formado por:

- a) Dois tambores soldados ao eixo do sistema de manobra original;
- b) Dois suportes com polias inferiores, soldadas no nível da soleira da comporta;
- c) Cabos de aço;
- d) Duas chapas para encabeçamento dos cabos de aço, soldadas no topo da comporta;

- e) Dois dinamômetros com registro de carga máxima em série com os cabos de aço, para verificação e limitação da carga aplicada.

O desenho abaixo simula o funcionamento do mecanismo original da comporta de limpeza na operação de abertura (descida). Quando o eixo é acionado conforme indicação, os cabos de aço são liberados e a comporta deveria descer por atuação da força de peso próprio.

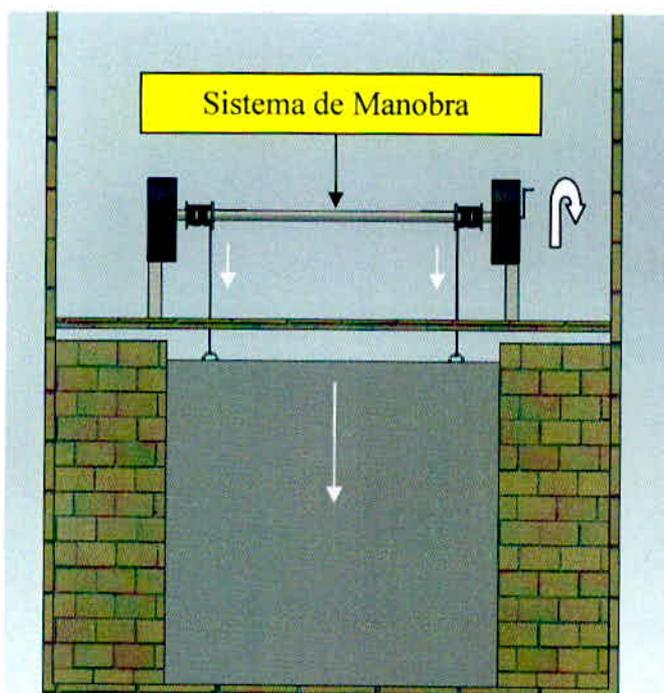


Figura 18 – Desenho do Mecanismo Original da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

Essa análise foi importante para o desenvolvimento do sistema adicional, visto que a idéia era adaptar o sistema adicional ao original, mantendo porém as condições técnicas de segurança do sistema.

O desenho abaixo representa o projeto do mecanismo adicional, implantado junto ao mecanismo original.

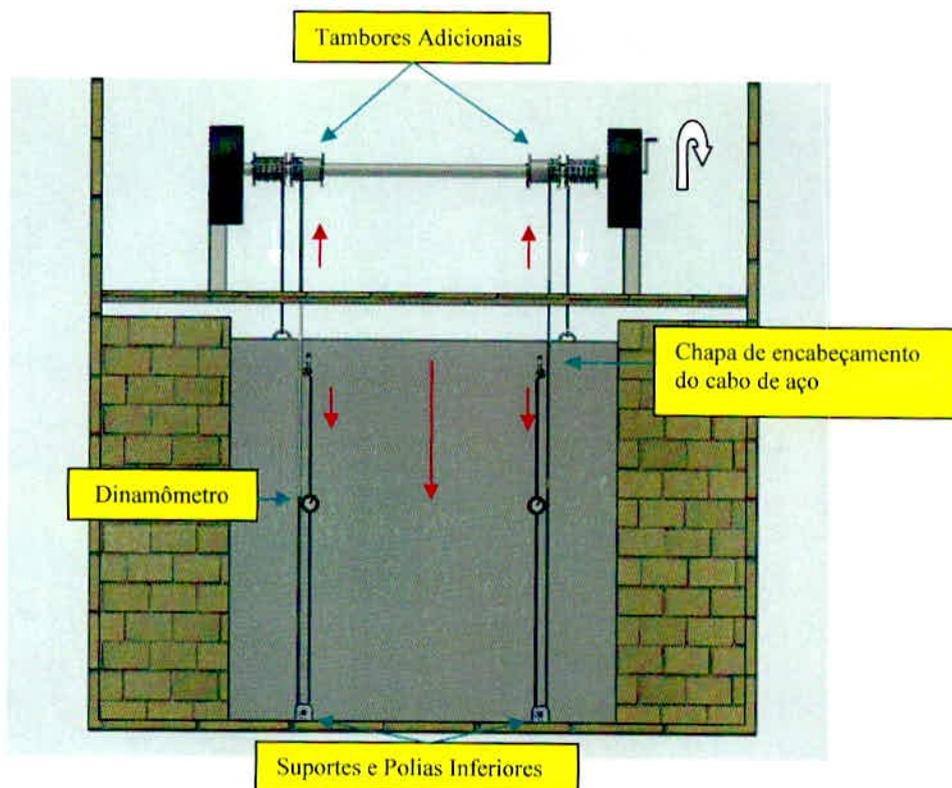


Figura 19 – Projeto e Desenho do Mecanismo Adicional
Fonte: Autor

Analisando a Figura 19, verificamos que as setas brancas indicam as reações criadas em função do mecanismo original e as setas vermelhas indicam as reações criadas em função do mecanismo adicional.

3.16. Dimensionamentos Necessários dos Componentes

Para a escolha dos materiais a serem utilizados no projeto, é necessário conhecer algumas grandezas mecânicas que serão geradas com o funcionamento do mecanismo adicional.

Os dinamômetros foram sugeridos justamente para se controlar a intensidade da força que será gerada no acionamento, visto que não conhecemos o fator que está causando o impedimento de descida da comporta.

Para início do dimensionamento dos componentes, adotou-se que a força máxima que seria criada para movimentar a comporta seria a do seu peso próprio adicionada com todas as forças de atrito resistentes, pois no movimento de fechamento da comporta (subida), o sistema original está submetido a estas forças, e entende-se que este está projetado para suportar a carga. Esta condição foi definida para não danificar os componentes originais, uma vez que não temos as especificações técnicas do sistema original.

A carga máxima de fechamento (subida) da comporta é definida conforme (Eq. 9), onde já temos todas as variáveis envolvidas nos cálculos anteriores.

$$CF = G + Fr + Fvl + Fvi$$

(Eq. 9)

Fonte: Análise Técnica do Autor

Onde:

CF = Carga de Fechamento em kN;

Fr = Força de Atrito nas Rodas em kN;

Fvl = Força de Atrito nas Vedações Laterais em kN;

Fvi = Força de Atrito na Vedação Inferior em kN.

Aplicando a (Eq. 9), definimos a carga de fechamento ou carga máxima que será gerada pelo mecanismo adicional sendo igual a 2466,7kgf.

3.17. Definição do Material dos Componentes Adicionais

De acordo com a carga máxima de 2466,7kgf que será gerada pelo mecanismo adicional, os materiais dos componentes adicionais foram aplicados com alta margem de segurança. Foram avaliadas todas as tensões e reações envolvidas. Os componentes foram desenvolvidos conforme abaixo:

- a) Suportes e polias inferiores – Aço Carbono SAE 1020;

- b) Chapas para encabeçamento dos cabos de aço – Aço Carbono SAE 1020;
- c) Cabos de Aço – $\varnothing \frac{1}{2}$ " – AF – 8 pernas x 19 fios – Capacidade 6580kgf

A figura abaixo é do tambor adicional implantado junto ao sistema de suspensão da comporta.

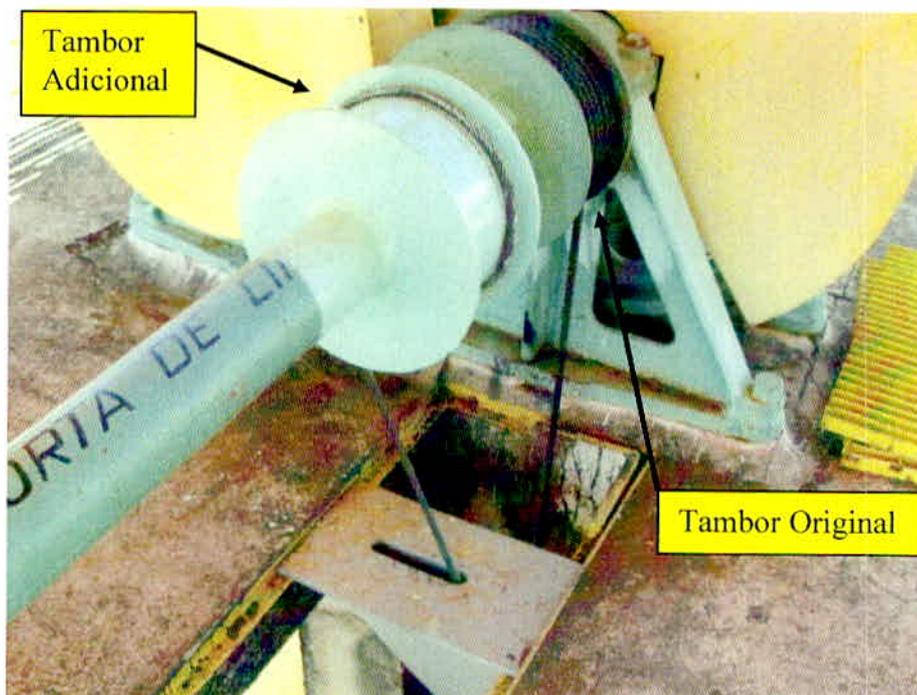


Figura 20 – Detalhe dos Tambores do Mecanismo de Manobras
Fonte: Autor

Os tambores foram fixados sem desmontagem do sistema, pois foram soldados de forma bi-partida ao eixo do sistema de suspensão, evitando mão de obra excessiva.



Figura 21 – Mecanismo de Manobras – Componentes Superiores
Fonte: Autor

A figura abaixo é da vista a jusante da comporta, com as polias inferiores e chapas de encabeçamentos dos cabos de aço, instaladas junto à comporta de limpeza.

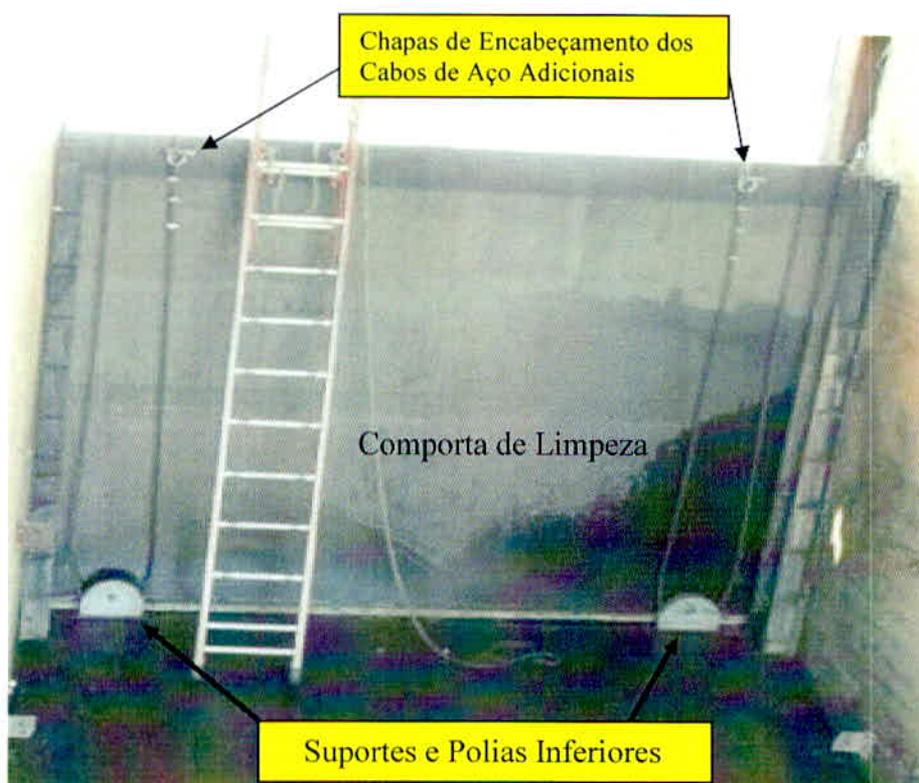


Figura 22 – Comporta de Limpeza e Componentes Inferiores do Mecanismo de Manobras
Fonte: Autor

Estes componentes foram fixados ao sistema utilizando a solda por eletrodo revestido, visando garantir a máxima confiabilidade de operação.



Figura 23 – Detalhe da Polia Inferior
Fonte: Autor

A figura abaixo mostra com detalhe a chapa de encabeçamento do cabo de aço adicional.



Figura 24 – Chapa de Encabeçamento do Cabo de Aço Adicional

Fonte: Autor

Foi utilizado um olhal de capacidade 7,2kN para o encabeçamento do cabo de aço, com a instalação de conectores paralelos para trabalhar como presilhas.

4.0. RESULTADO DO ESTUDO

Após a conclusão da adaptação do mecanismo de manobras, foram iniciados os testes de operação de abertura da comporta. Por decisão da Empresa, não foram instalados os dinamômetros para leitura e controle da intensidade da carga, pois entenderam que a carga seria muito inferior ao limite da tensão admissível dos componentes e também pelo fato do sistema ser manual, ou seja, proporciona ao operador sentimento da dificuldade da comporta descer. Os testes foram satisfatórios, e a comporta desceu e fechou novamente sem dificuldades. Após o fechamento, constatou-se um pequeno vazamento, considerado normal na operação, que foi eliminado após uma semana devido à acomodação da borracha de vedação.

A figura abaixo é da comporta de limpeza no início de operação de abertura.



Figura 25 – Abertura Parcial da Comporta de Limpeza
Fonte: Autor

O operador não encontrou dificuldades em fazer a primeira movimentação da comporta, e com isso foi dado continuidade no teste de abertura.

Toda a operação foi realizada cuidadosamente, pois como a empresa optou em não instalar os dinamômetros, era importante observar a dificuldade da comporta descer. Contudo, o operador não encontrou dificuldades em operar a comporta, o que indicava que o sistema não estava sobrecarregado. A figura abaixo é da comporta de limpeza totalmente aberta.



Figura 26 – Abertura total da Comporta de Limpeza

Fonte: Autor

A figura abaixo é da crista formada pela água vertida da comporta de limpeza, na operação de abertura total.



Figura 27 – Água Vertida da Comporta de Limpeza

Fonte: Autor

Após a operação de abertura, foi realizada uma inspeção no sistema, constatando a normalidade dos componentes. Foram então iniciados os testes para a operação de fechamento da comporta. A figura abaixo é da comporta no movimento de fechamento, acionada pelo sistema original.



Figura 28 – Comporta sendo Fechada
Fonte: Autor

Novamente não foi encontrada dificuldade pelo operador para a realização da operação de fechamento, e a comporta foi fechada totalmente.

A figura abaixo é da comporta totalmente fechada. Ao término da operação, realizou-se uma inspeção no sistema original e adicional, comprovando a integridade de todos os componentes, indicando assim o sucesso de toda a operação.



Figura 29 – Comporta Totalmente Fechada
Fonte: Autor

Ao término da operação de fechamento, foi encontrado um pequeno vazamento na região inferior da comporta, porém este fato foi considerado normal e o mesmo foi eliminado totalmente após uma semana, devido à acomodação da borracha de vedação.

5.0. CONCLUSÃO

A hipótese principal para o problema da operação de abertura estaria relacionada com uma falha na construção e/ou instalação de algum componente das peças fixas do sistema, provavelmente no nível da soleira, impedindo a comporta de descer pela atuação da força de peso próprio.

Este trabalho nos permite ratificar a importância da engenharia na análise de problemas, com o desenvolvimento de soluções técnicas e financeiramente viáveis.

Foi possível, através de pesquisas específicas no ramo de Comportas Hidráulicas, analisar a eficiência do projeto da Comporta de Limpeza da Usina Hidrelétrica de Itutinga, evitando muito certamente custos elevados para a solução do problema, caso a Empresa optasse em contratar uma consultoria para propor soluções para a falha de operação.

Através do desenvolvimento de um projeto simples adicional, com poucos componentes mecânicos e de fácil instalação, a comporta pôde ser operada normalmente.

BIBLIOGRAFIA

ERBISTE, César Ferreira Paulo. **Comportas Hidráulicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1987.

ERBISTE, César Ferreira Paulo. **Comportas Hidráulicas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

SHIGLEY, Edward Joseph. **Elementos de Máquinas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A

CEMIG, Curso de Comportas Hidráulicas, 2009