



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -1**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**ANÁLISE DE TENSÕES EM UMA VÁLVULA BORBOLETA E COMPARAÇÃO COM MEDIÇÕES NO  
PROTÓTIPO.**

**Fernando Gaion(\*)**

**Wanderley Silva**

**ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL**

**RESUMO**

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma comparação de tensões e deformações mecânicas atuantes em uma válvula borboleta com os resultados obtidos através do modelamento da mesma por softwares de elementos finitos. As tensões e deformações atuantes no equipamento foram obtidas mediante sua instrumentação com extensômetros elétricos (strain gages) e relógios comparadores.

Será apresentado um breve descritivo da válvula borboleta, bem como da modelagem feita pelo método dos elementos finitos, para finalmente serem detalhados os ensaios realizados, o comparativo entre os valores obtidos nas medições e os valores calculados e as considerações finais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Válvula borboleta, Análise de tensões e deformações, Elementos finitos, Extensômetros elétricos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Na fase de projeto de equipamentos de geração de energia, normas técnicas, códigos de projeto e principalmente especificações técnicas do cliente devem ser respeitadas de forma a garantir a performance do equipamento, sua segurança e durabilidade. Para alguns componentes há também testes específicos requeridos, antes de sua montagem final e entrada em operação, como, por exemplo, ensaios de pressão.

A válvula de guarda ou segurança da turbina é um componente que sempre é testado nas instalações do fabricante mediante a pressurização da mesma e verificação de eventuais vazamentos, que devem ser corrigidos antes do componente ser liberado para o envio ao canteiro de obras da usina hidrelétrica [1]. As válvulas de segurança funcionam como uma comporta em casos de emergência, cortando o fluxo da água que chega à turbina hidráulica, isolando assim o grupo gerador da pressão de montante.

As válvulas borboletas são estruturas de aço mecânico-soldadas, constituídas de corpo, obturador ou disco, de alavancas com contra-pesos, de servomotores e virolas (ou condutos) de ligação à montante, com o conduto forçado, e a jusante, com a caixa espiral da turbina. Os servomotores são os elementos que manobram e mantêm o disco da válvula borboleta aberta, o que ocorre na condição de operação normal da turbina. Na necessidade de fechamento do disco ou obturador, os servomotores são despressurizados e então os contrapesos, também fixos às alavancas, produzem o torque necessário para cortar o fluxo de água. A velocidade de fechamento é controlada através de diafragmas na saída do óleo dos servomotores.

(\*) Av. Charles Schneider, s/n – CEP 12040-001 Taubaté, SP, – Brasil  
Tel: (+55 12) 3608-3622 – Fax: (+55 12) 3608-3286 – Email: fernando-henrique.gaion@power.alstom.com

A abertura de uma válvula borboleta se dá com pressão equilibrada, ou quase equilibrada, entre os dois lados da mesma, o que é obtido através de uma válvula by-pass. O corpo da válvula é normalmente apoiado sobre bases de concreto, bem como os servomotores. Em algumas configurações os servomotores podem ser apoiados no próprio corpo da válvula borboleta. Toda a estrutura de uma válvula borboleta deve ser dimensionada de modo a não permitir grandes deformações que causem vazamentos nas regiões de vedação ou entre as juntas de montagem mecânicas, necessárias para a montagem do disco dentro do corpo.

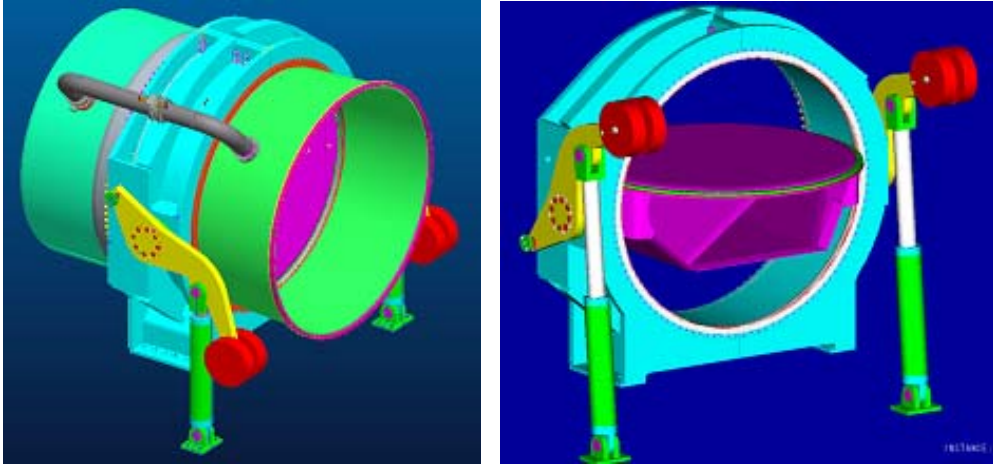


Figura 1 – Válvula borboleta com disco bi-plano e dois servomotores

## 2.0 - DESCRIÇÃO DA VÁLVULA BORBOLETA - PROTÓTIPO

A válvula borboleta (denominada protótipo), objeto de estudo deste documento, foi vendida e fabricada para ser utilizada como órgão de segurança de uma turbina Francis. O contrato assinado entre a Alstom e seu cliente previa desde o início medições especiais na estrutura da válvula borboleta de forma a se obter valores de tensões e deslocamentos que seriam comparados com resultados obtidos de modelizações por elementos finitos. O objetivo do cliente era o de comprovar que o equipamento teria sido projetado de forma adequada e que todos os esforços teriam sido considerados na elaboração dos cálculos mecânicos.

A válvula borboleta é de construção clássica, com corpo bi-partido e disco em uma peça. O corpo possui duas metades, sendo uma estrutura mecâno-soldada (figura 2).



Figura 2 – Corpo da válvula borboleta em duas etapas do processo de fabricação.

O disco bi-plano, ou também chamado “treliçado” é uma estrutura mecâno-soldada feita de chapas de aço carbono, sendo que os munhões, que são a ligação entre o disco e o corpo, são de aço fundido de alta resistência. Nas extremidades dos munhões do disco são montados as alavancas, que por sua vez recebem os servomotores e os contrapesos (figura 1 e 3).

O disco deve ser rígido de forma a não sofrer deformações globais importantes que possam causar alguma deficiência na vedação com o corpo.



Figura 3 – Disco em processo de fabricação

### 3.0 - MODELIZAÇÃO MATEMÁTICA DO PROTÓTIPO

Para se obter uma boa correlação entre o comportamento do protótipo (equipamento fabricado), com os modelos matemáticos especialmente desenvolvidos para as comparações, foi necessário estabelecer alguns critérios. Baseado em experiências similares foi definido, por exemplo, que zonas de concentração de tensões [2] não deveriam ser instrumentadas por risco de obtenção de resultados não comparáveis (não linearidade no carregamento, por exemplo). Assim a posição dos extensômetros no protótipo, e consequentemente nos modelos de elementos finitos, obedeceu a um plano previamente definido entre a Alstom e seu cliente.

Os modelos matemáticos foram desenvolvidos num software comercial de cálculos por elementos finitos (Ansys) [3], sendo que as condições de contorno foram ajustadas conforme acordado com o cliente. Foi definida a elaboração de modelos separados para o corpo e o disco, conforme detalhado a seguir:

#### 3.1 Modelos do corpo

Foram produzidos dois modelos para a obtenção das tensões nos pontos onde os extensômetros seriam posicionados, um para o corpo da válvula montada com a tubulação à sua montante (figura 4) e outro somente com a tubulação à jusante do corpo da válvula.

O modelo principal, do corpo e tubulação à montante, foi elaborado com elementos sólidos de 20 nós cada e 3 graus de liberdade em cada nó (deslocamentos nas direções x, y e z) e constituído pelo corpo propriamente dito da válvula borboleta, dos parafusos de união entre os corpos, da virola ou tubulação à montante com a calota de fechamento para o teste, além dos parafusos de união do flange da virola montante com o flange do corpo.

Como condições de contorno (figura 4) do modelo de elementos finitos, os deslocamentos dos nós correspondentes à face inferior da base onde a válvula se apóia foram restringidos em todas as direções. A pressão de ensaio foi aplicada em todas as áreas onde havia o contato com a água que preenchia a válvula borboleta. Na região onde o disco se apóia no corpo foi aplicada pressão correspondente à força total descarregada ali durante a condição de teste.

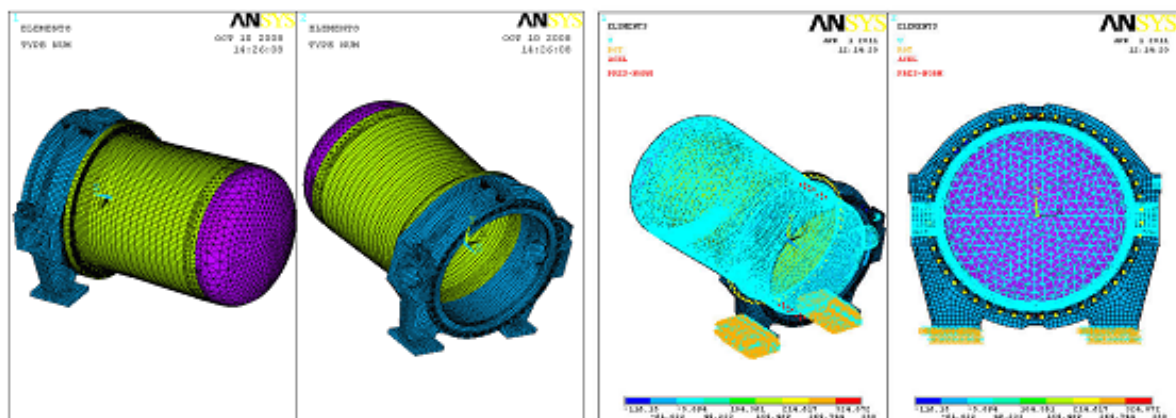


Figura 4 – Modelo de elementos finitos do corpo da válvula e condições de contorno consideradas para os cálculos.

### 3.2 Modelo do disco

O modelo do disco também foi elaborado com elementos sólidos de 20 nós cada e 3 graus de liberdade em cada nó (deslocamentos nas direções x, y e z). A fim de simular a união do disco com o corpo foi modelada uma bucha cilíndrica na região de apoio do disco no corpo, sendo que entre esta bucha e o munhão do disco foi considerado a folga de projeto e utilizados elementos de contato entre as superfícies dos dois sólidos. (figura 5).

Como condições de contorno do modelo de elementos finitos, os deslocamentos dos nós nas extremidades dos munhões do disco foram bloqueados tangencialmente, obedecendo a um sistema local de coordenadas cilíndricas, com o eixo z passando axialmente pelos munhões do disco. As buchas que servem de apoio para os munhões tiveram todos os nós de sua face externa bloqueados (figura 5). O disco teve também os nós da face externa bloqueados no sentido axial da válvula, em uma pequena porção relativa à área de contato entre sua superfície externa e uma viga perfil I estrutural usada para impedir a rotação do disco durante o ensaio (o ensaio é feito sem as alavancas). Toda a região “molhada” do disco, ou seja, onde a água está em contato com a estrutura, teve a pressão de teste aplicada. A massa da estrutura também foi considerada.

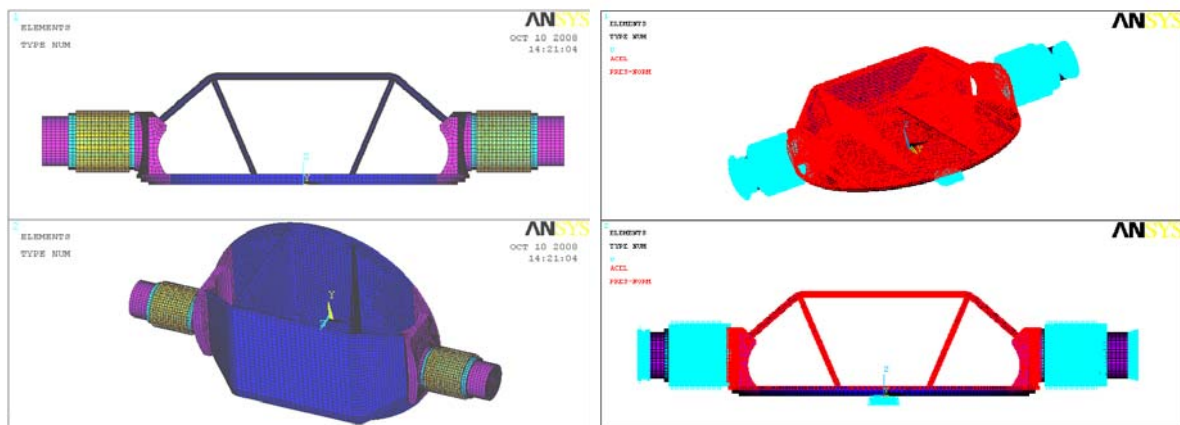


Figura 5 – Modelo de elementos finitos do disco da válvula e condições de contorno consideradas para os cálculos.

## 4.0 - ENSAIO DE PRESSÃO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Em situação de funcionamento normal as válvulas borboletas permanecem abertas, sendo que nesta ocasião o disco praticamente não é estressado, apenas o corpo da válvula recebe as cargas da pressão atuantes internamente.

Durante uma operação de fechamento de emergência o disco da válvula é fechado em um tempo que varia em média entre 30 e 60 segundos. Com este fechamento abrupto um golpe de aríete é produzido em todo o conduto hidráulico. Para a válvula em questão, foi estabelecido que se realizasse um teste de pressão de acordo com os critérios definidos no código ASME [4]. Desta forma foi definido como pressão de teste o valor correspondente à máxima pressão alcançada pelo golpe de aríete acrescido de 30%.

### 4.1 Preparação para os ensaios

Após as montagens completas da válvula, 30 extensômetros foram posicionados de acordo com planos pré-estabelecidos. Foram instalados 12 extensômetros no disco, sendo 9 na parte interna, em contato com a água, e 3 na parte externa. Outros 18 extensômetros foram instalados no corpo e condutos à montante e jusante da válvula, sendo 10 internos, em contato com a água, e os demais externos. Também foram posicionados os relógios comparadores para a medição dos deslocamentos da estrutura. (figura 6 e 13).

Para a fixação dos extensômetros, as regiões onde os mesmos seriam colados foram lixadas e limpas (figura 6). Os extensômetros utilizados foram de 3 sinais (chamados de rosetas), especiais para trabalharem submersos. O sistema de aquisição de dados utilizado foi um módulo de 64 canais, 16 bits de resolução e 14 bits de precisão.





Figura 6 – Posicionamento dos extensômetros e relógios comparadores

#### 4.2 Realização dos ensaios

Os ensaios foram realizados em duas etapas para tornar possível a repetição da aquisição de alguns sinais, para controle. Desta forma o ensaio foi dividido como segue:

- Primeira etapa: controle da totalidade dos extensômetros instalados no disco (internos como externos) e mais 7 extensômetros instalados no corpo, perfazendo um total de 19 extensômetros, ou 57 sinais.
- Segunda etapa: demais extensômetros (11 no corpo) mais a repetição da aquisição dos sinais de 6 extensômetros medidos na primeira etapa. No total 17 extensômetros.

A pressão de teste foi aplicada de forma gradual, em patamares e monitorada através de sensores instalados em dois manômetros. Os deslocamentos da estrutura da válvula foram monitorados através de leituras diretas nos relógios comparadores. Para as medições de deformação na estrutura foram gerados arquivos contendo as séries temporais correspondentes a cada um dos pontos instrumentados. Antes do início das medições foram realizados os ajustes de zero e calibração dos extensômetros elétricos.

#### 4.3 Resultados obtidos dos ensaios

Os resultados das medições das deformações captadas pelos extensômetros são obtidos em  $10^{-6}$  m/m ( $\mu$ S ou microstrain). Os extensômetros utilizados, tri-axiais (rosetas), medem deformações em 3 direções, duas formando um ângulo reto ( $E_x$  e  $E_y$ ) e uma ( $E_{45}$ ) na bissetriz de 45 graus (figura 7).



Figura 7 – Esquema de um extensômetro de três direções.

Para a obtenção dos valores finais de tensão equivalente, através dos valores medidos de deformação pelos extensômetros, é necessário fazer as seguintes considerações [7]:

- As tensões no sistema de eixos locais, associadas ao extensômetro, são dadas pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Onde:} \quad \varepsilon_x = E_x \quad \varepsilon_y = E_y$$

$$\gamma_{xy} = E_{45} - \frac{E_x + E_y}{2}$$

- As tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ), a tensão equivalente de Von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) e a direção da tensão principal ( $\theta$ ) são calculadas como segue:

$$\sigma_1 = E \left\{ \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2(1-\nu)} + \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \right\} \quad \sigma_2 = E \left\{ \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2(1-\nu)} - \frac{1}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y)^2} \right\}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right)$$

Assim como para os valores medidos com extensômetros, os valores obtidos dos modelos de elementos finitos precisam de tratamento para a obtenção de valores de tensão equivalente. No modelo de elementos finitos é localizada a posição do extensômetro, correspondente a posição no protótipo, e então é criado um sistema de coordenadas local alinhado da mesma forma que o extensômetro quando colado à estrutura. Desta forma, após a obtenção dos resultados dos cálculos, são extraídos valores de deslocamento nodal nos três eixos correspondentes aos do extensômetro e com isso é calculada a tensão equivalente.

Nas tabelas de resultados a seguir são apresentados valores relativos entre as tensões medidas e as calculadas pelo método dos elementos finitos, com as diferenças entre eles. A tabela da figura 8 (abaixo) apresenta a comparação dos valores obtidos para o disco da válvula. A figura 9 apresenta a comparação entre os valores obtidos para o corpo da válvula. No caso específico da válvula borboleta objeto de estudo deste documento, foram definidos critérios de desvio aceitáveis entre os valores medidos e calculados. Desta forma se definiu como desvio aceitável  $\pm 33\%$ , sendo que para desvios maiores justificativas técnicas deveriam ser fornecidas junto com os relatórios de ensaio e cálculo dos equipamentos.

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES CALCULADOS X MEDIDOS - DISCO			
Extensômetro*	$\sigma_{eq}$ - Modelo EF	$\sigma_{eq}$ - Medições	Diferença (%)
D1	0,865	1	15,6
D2	0,830	1	20,4
D3	1,171	1	17,1
D4	0,768	1	30,3
D5	1,035	1	3,5
D6	0,943	1	6,1
D7	1,151	1	15,1
D8	1,044	1	4,4
D9	1,142	1	14,2
D10	1,211	1	21,1
D11	1,039	1	3,9
D12	0,861	1	16,1

$\sigma_{eq}$  = Valores comparativos entre medições e modelo

Figura 8 – Tabela comparativa entre os valores calculados e medidos para o disco da válvula borboleta.

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES CALCULADOS X MEDIDOS - CORPO			
Extensômetro*	$\sigma_{eq}$ - Modelo EF	$\sigma_{eq}$ - Medições	Diferença (%)
C1	1,039	1	3,9
C2	1,145	1	14,5
C3	1,153	1	15,3
C4	0,976	1	2,5
C5	1,220	1	22,0
C6	0,604	1	65,5
C7	1,096	1	9,6
C8	1,620	1	62,0
C9	1,034	1	3,4
C10	1,245	1	24,5
C11	1,245	1	24,5
C12	1,015	1	1,5
C13	1,311	1	31,1
C14	1,072	1	7,2
C15	1,160	1	16,0
C1 VJ	0,997	1	0,3
C2 VJ	0,993	1	0,8
C3 VJ	1,673	1	67,3

$\sigma_{eq}$  = Valores comparativos entre medições e modelo

Figura 9 – Tabela comparativa entre os valores calculados e medidos para o corpo da válvula borboleta.

De acordo com os critérios previamente definidos, os resultados alcançados para o disco foram considerados plenamente aceitáveis. A estrutura mostrou-se, de uma forma geral, bastante rígida, sendo que a medição do vazamento máximo de água pela vedação entre o disco e o corpo atingiu apenas 10% do admissível para o ensaio.

Os resultados alcançados para o corpo mostraram uma boa correlação entre os valores medidos x calculados, com exceção de quatro pontos (C6, C8, C13 e C3 VJ). Os extensômetros C13 e C3 VJ possuíam um correspondente simétrico na estrutura, no caso o C12 e C2 VJ. Pela tabela comparativa (figura 9) verifica-se que os resultados obtidos para estes últimos não apresentaram grandes desvios (para posicionamento dos extensômetros, ver figuras 10 e 11).

Os extensômetros C6 e C8 não possuíam um correspondente simétrico na estrutura da válvula. O C6 foi posicionado em frente ao munhão do corpo, e foi medido sem que a tubulação à jusante estivesse montada. Já o extensômetro C8 possuía um correspondente interno na estrutura (extensômetro C9), ou seja, na mesma posição, porém do lado pressurizado pela água que preenchia a válvula borboleta durante o ensaio, que apresentou um desvio bastante pequeno nos resultados.

Desta forma foi apresentado no relatório final ao cliente, como justificativa, que os extensômetros C8, C13 e C3 VJ apresentaram problemas durante os ensaios, como falha no sinal, dano causado pela pressurização, etc, uma vez que os outros extensômetros, pares desses, mencionados nas explicações acima, obtiveram estreita correlação entre medição e cálculo, atestando assim o bom comportamento (e dimensionamento) da estrutura, restando apenas, passível de maiores explanações, os resultados obtidos para o extensômetro C6.

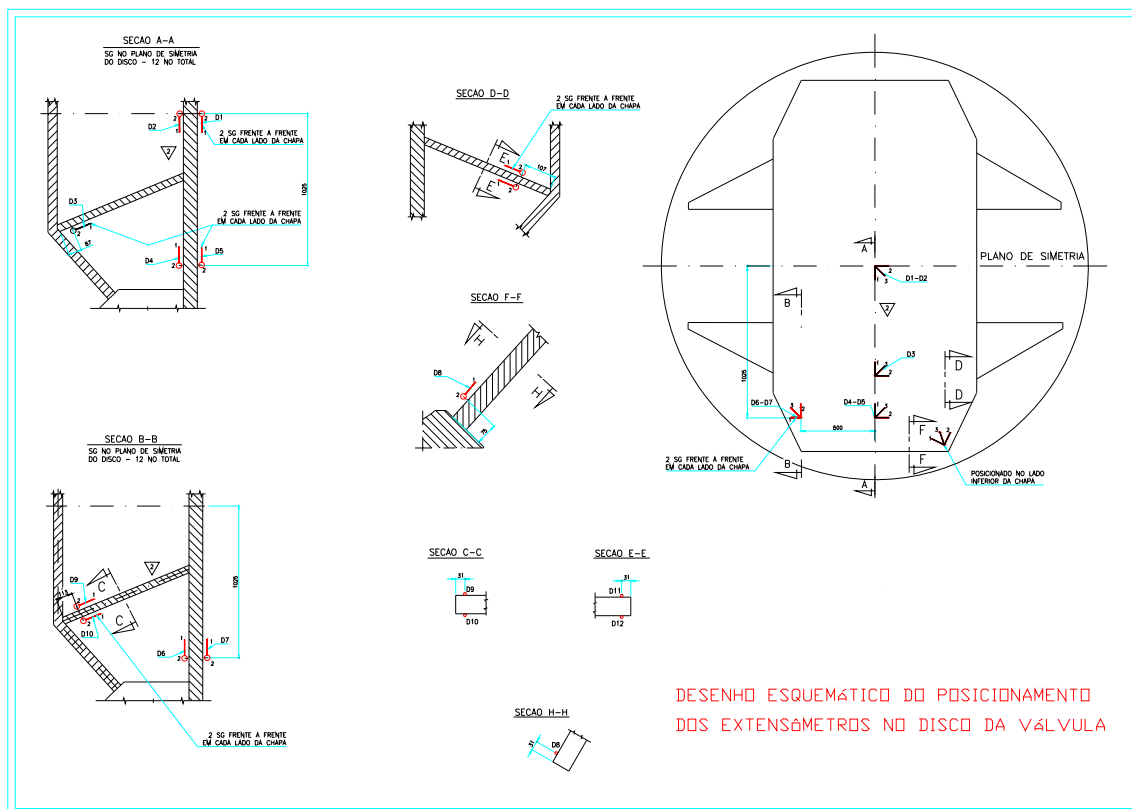


Figura 10 – Desenho utilizado para posicionamento dos extensômetros no disco da válvula borboleta

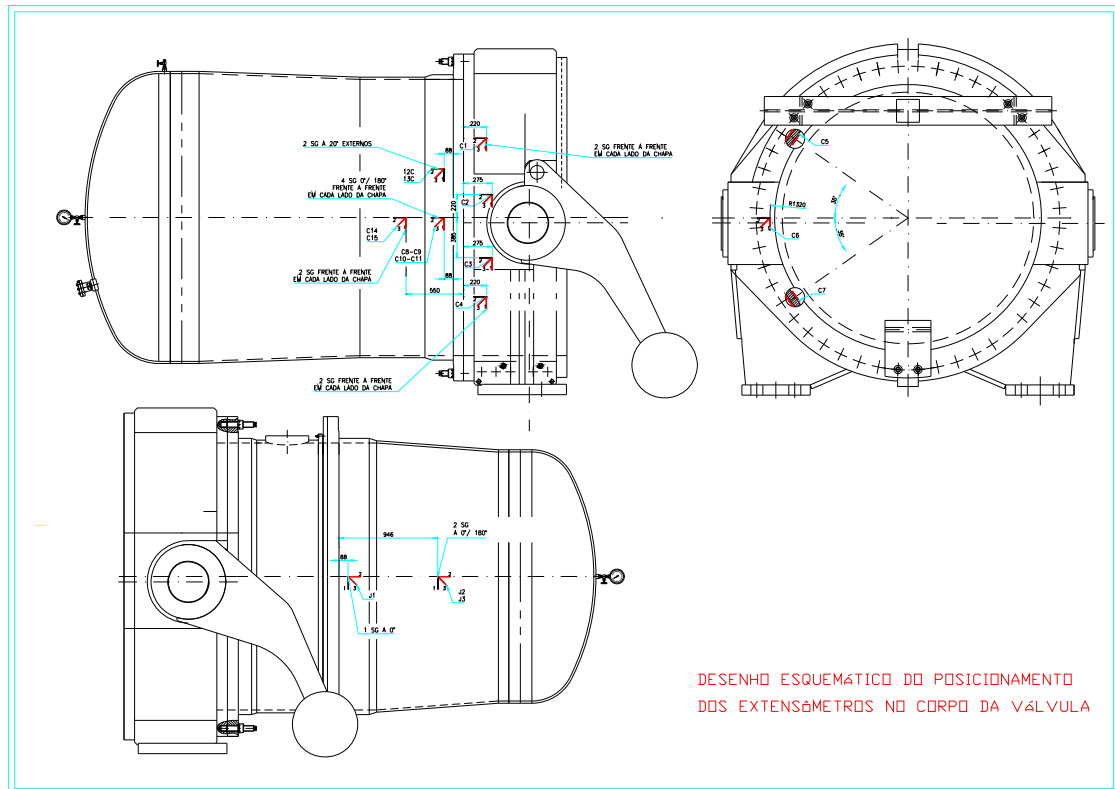


Figura 11 – Desenho utilizado para posicionamento dos extensômetros no corpo da válvula borboleta

A seguir são apresentados na tabela da figura 12 os valores de deslocamentos obtidos pelos relógios comparadores posicionados no corpo e disco da válvula borboleta. O posicionamento de cada relógio pode ser observado no desenho da figura 13. Os valores calculados ficaram rigorosamente próximos dos medidos pelos relógios comparadores. O maior desvio encontrado foi de 0,05 mm. Devido à precisão obtida para os valores de deslocamento, os valores de tensão puderam ser todos validados, mesmo o caso relativo ao extensômetro C6, do corpo da válvula borboleta, pois se pôde concluir que os modelos de elementos finitos tinham uma boa correlação com o protótipo, representando bem os fenômenos físicos observados durante os ensaios.

COMPARATIVO ENTRE VALORES DE DESLOCAMENTO DO CORPO E DISCO				
Relógios Comparadores	Deslocamentos calculados - EF (mm)			Deslocamentos medidos (mm)
	Corpo	Disco	Total	
R1	3,85	0,21	4,06	4,0
R2	4,40	0	4,40	4,4
R3	3,85	0,70	4,55	4,6
R4	3,85	1,66	5,51	5,5
R5	3,85	0,70	4,55	4,6
R6	4,40	0	4,40	4,4
R7	3,85	3,06	6,91	6,9
R8	0,55	0	0,55	0,6
R9	-1,90	0	-1,90	-1,9
R10	-7,09	-0,23	-7,32	-7,3
R11	-7,09	-0,23	-7,32	-7,3
R12	3,11	0	3,11	3,1
R13	3,11	0	3,11	3,1
R14	0,00	0	0	0
R15	0,00	0	0	0
R16	3,85	2,75	6,60	6,6
R17	0,30	0	0,30	0,3
R18	0,27	0	0,27	0,3
R19	-1,54	0	-1,54	-1,5
R20	0,12	0	0,12	0,1

Figura 12 – Tabela comparativa para os valores de deslocamento do corpo e disco da válvula borboleta.



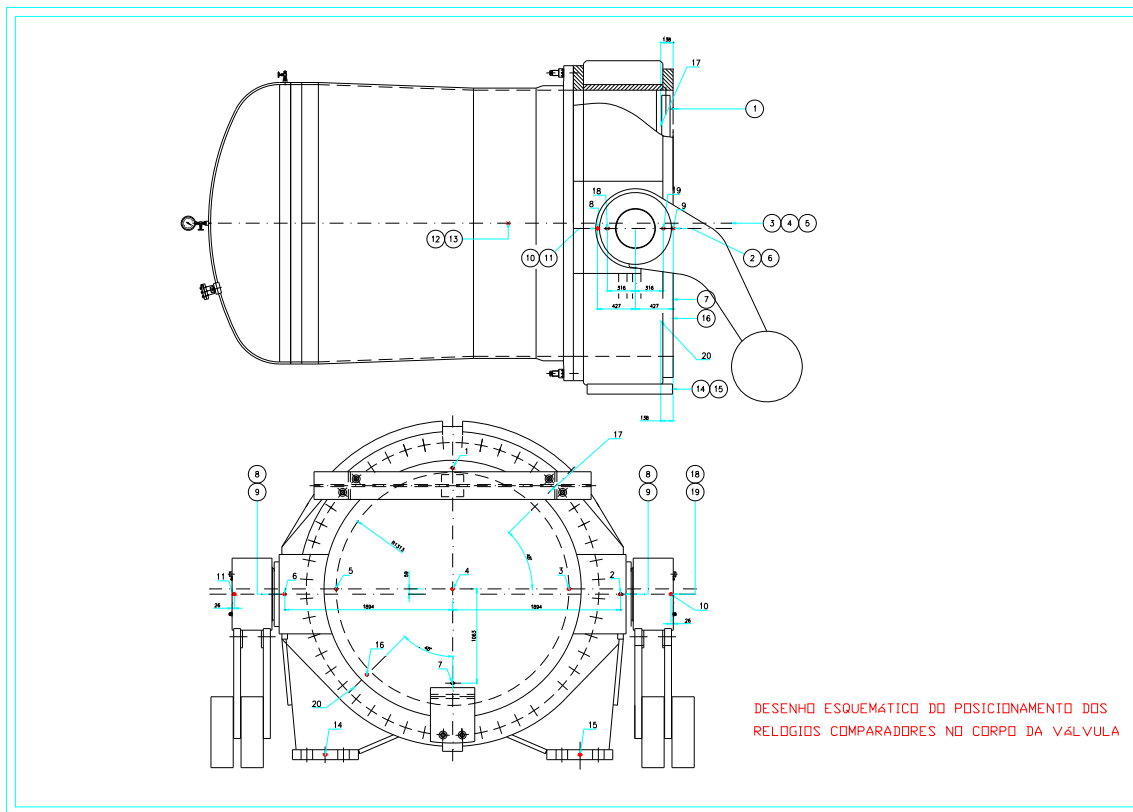


Figura 13 – Posicionamento dos relógios comparadores no corpo e disco da válvula borboleta.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios realizados na válvula borboleta, bem como a comparação destes com os valores calculados através dos modelos em elementos finitos foram bastante satisfatórios, atendendo aos critérios do cliente.

A boa correlação entre cálculo e medição também permitiu validar o tipo de modelo utilizado bem como as condições de contorno utilizadas.

Apesar do critério estabelecido para as comparações não aparentar ser muito restritivo, é importante lembrar que o equipamento em questão é uma estrutura mecâno-soldada de geometria complexa, sendo que devido às tolerâncias de fabricação pode apresentar variações de geometria e forma que não são reproduzidos nos modelos de elementos finitos. Adicionalmente, nem todos os detalhes de projeto dos componentes foram introduzidos nos modelos, por uma questão de capacidade de processamento dos cálculos.

Para o fabricante do equipamento este tipo de experimento realizado (medições e comparações com valores calculados) é bastante interessante e proveitoso, pois possibilita adquirir conhecimentos relativos ao comportamento estrutural do equipamento de forma a otimizar considerações de projeto e, sobretudo, produzir cálculos mecânicos mais apurados em aplicações futuras.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Máquinas Hidráulicas –Macyn tire, Archibald Joseph; Jorge Frederico de Sousa da, 1960
- [2] Peterson's Stress Concentration Factors – Second edition - Walter D. Pilkey
- [3] Finite Element Analysis – Theory and Application with Ansys – Third Edition – Saeed Moaveni
- [4] ASME(American Society of Mechanical Engineers) Boiler and Pressure Vessel Code – Section 8 Division 1 & 2.
- [5] Theory of Elasticity – Timoshenko, S.P. e Goodier, J.N.: McGraw-Hill Kogakusha, 1970.