



## **ESTUDO DE DEFORMAÇÕES EM PALHETAS PARA REDUÇÃO DE VAZAMENTOS EM DISTRIBUIDORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS**

**Wagner Vanci da Silva**

*wagner.vanci@andritz.com*

Andritz Hydro S.A.

Rod. Manoel de Abreu, Km 4,5 CEP 14801-970 - Araraquara - SP - Brasil

**Ernesto Massaroppi Jr.**

*massarop@sc.usp.br*

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Trabalhador São-Carlense, 400, CEP 13566-590 – São Carlos – SP - Brasil

**Resumo:** *Palhetas diretrizes são elementos encontrados em turbinas hidráulicas cuja principal função é regular a quantidade de água e direcionar o fluxo de entrada nos rotores destas turbinas, promovendo assim um controle de potência no equipamento. Quando utilizada como elemento de interrupção de fluxo, as palhetas diretrizes estão sujeitas a grandes esforços de pressão e torque que resultam em deformações elásticas que podem comprometer a estanqueidade do distribuidor da turbina. Este trabalho apresenta estudos estruturais deste componente, fazendo uso de ferramentas computacionais, como o método de elementos finitos, utilizando o software comercial ANSYS®, e ilustra a metodologia utilizada para cálculo de uma geometria especial, percorrendo sobre alguns detalhes como geração de malha, aplicação de cargas e contatos.*

**Palavras-chave:** *Palhetas diretrizes, Turbinas, Elementos finitos*

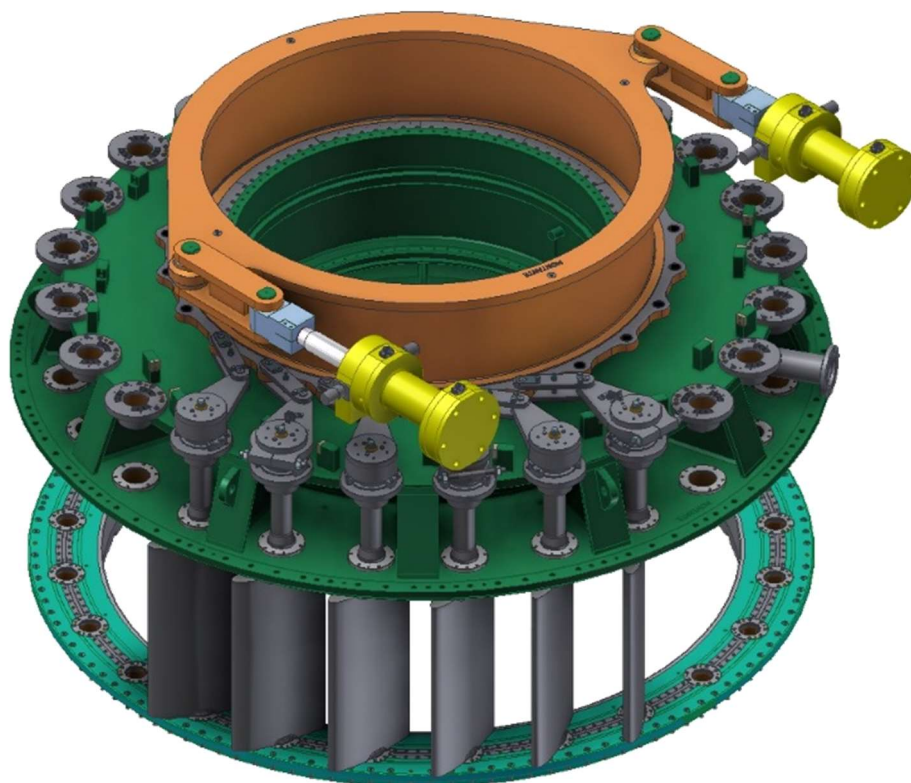
## 1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que palhetas diretrizes de distribuidores de turbinas hidráulicas têm duas funções principais: a primeira, direcionar o fluxo e regular a vazão de água de modo a adequar os parâmetros operacionais da turbina; e, a segunda, conter totalmente o escoamento permitindo a parada da unidade ou operação da máquina como compensador síncrono (Macintyre, 1983).

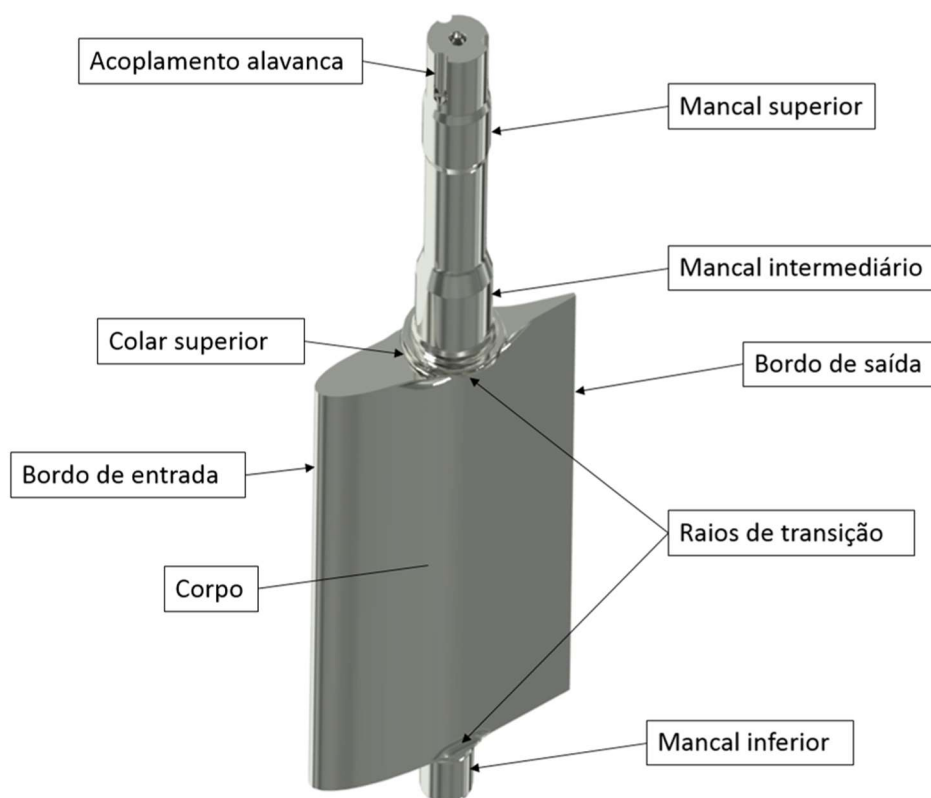
Quando utilizada como elemento de interrupção de fluxo, seja em condições normais de operação ou situações especiais, como rejeição de carga ou parada de emergência, as palhetas diretrizes estão sujeitas a grandes esforços de pressão e torque que resultam em deformações elásticas, que podem comprometer a estanqueidade do distribuidor.

Este problema é especialmente relevante em máquinas que apresentam palhetas delgadas, uma vez que o perfil hidráulico delimita a estrutura na região do corpo da palheta, impossibilitando qualquer tentativa de aumento de rigidez em situações onde a peça já é maciça.

A Fig. 1 ilustra um exemplo de distribuidor de uma turbina do tipo Francis e a Figura 2 apresenta as principais partes de uma palheta diretriz.



**Figura 1 - Protótipo eletrônico de distribuidor de turbina do tipo Francis montada parcialmente e na posição de palhetas diretrizes abertas. Fonte: Andritz Hydro Inepar - Acervo 3D**



**Figura 2 - Partes principais de uma palheta diretriz. FONTE: Andritz Hydro S.A. - Acervo 3D**

Com as palhetas diretrizes na posição fechada, objetiva-se estanqueidade para que o rotor da turbina não continue a converter o escoamento hidráulico em torque no eixo, pois, caso contrário os freios da unidade podem ter dificuldades para parar o conjunto girante ou mantê-lo parado, além disto, uma vez parada, os vazamentos representam perdas, visto que esta vazão não é convertida em energia elétrica. Em uma palheta diretriz, a parte que está em contato com o escoamento é denominada corpo. A seção transversal do corpo possui um perfil hidráulico - similar ao perfil de asa - para minimizar perdas de carga no escoamento. Quando as palhetas diretrizes se encontram na posição fechada, a região de bordo de entrada toca a região do bordo de saída da palheta adjacente. Nesta situação são possíveis vazamentos em todo o perímetro de vedação, nas faces superior e inferior das palhetas, porém, podem ser introduzidas vedações flexíveis na tampa da turbina e no anel inferior de modo a reduzir folgas que são necessárias para operação do mecanismo do distribuidor da turbina. Já nas faces de contato entre palhetas, a vedação ocorre puramente pelo contato, desta forma, a superfície recebe cuidados adicionais, como, por exemplo, a deposição de camada de aço inoxidável quando as palhetas são fabricadas em aço carbono e controle de rugosidade em ambas as superfícies, ainda, é usual que seja aplicado um torque adicional para acentuar as forças de contato entre as palhetas, denominado *squeeze*. Mesmo com todas as medidas acima, a pressão atuante a montante das palhetas resulta em deformações no corpo da palheta, podendo prejudicar a estanqueidade.

Uma alternativa encontrada para este problema é prever antecipadamente a geometria da palheta em sua condição de trabalho, ou seja, deformada elasticamente, porém, este tipo de análise, não é linear. Greco (2004) considera como não linearidades geométricas, aquelas que são relacionadas à influência das mudanças de geometria da estrutura na resposta, a não

linearidade física, relacionada aos materiais de que é constituída a estrutura e a não linearidade de contato, relacionada às mudanças nas condições de contorno e iniciais na estrutura.

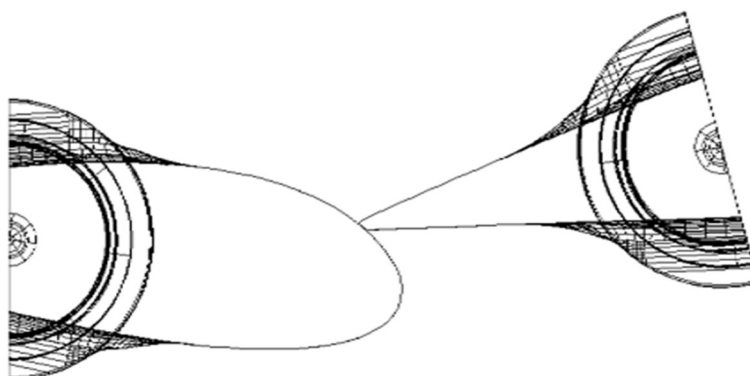
Bathe (1982) define que as condições de contorno estão relacionadas às posições (ou deslocamentos) e forças, enquanto as condições iniciais estão relacionadas a variável tempo. Neste caso, as não linearidades presentes são as de contato, pois ocorre separação das partes quando submetidas à pressão externa, desta forma, pode-se obter respostas através do emprego de técnicas de elementos finitos, determinando-se a geometria corrigida para compensar as deformações operacionais através de usinagem nas superfícies de contato melhorando a estanqueidade e tornando possível até mesmo a redução do *squeeze* requerido.

## 2 MODELO TRIDIMENSIONAL (CAD)

Toda análise estrutural começa com uma modelagem, e isto significa simplificação e posterior discretização. Uma boa solução pressupõe uma boa modelagem, e mesmo os métodos de análise mais precisos requerem uma modelagem cuidadosa. O primeiro passo para isso é uma simplificação bem dosada: o modelo não deve nem incluir detalhes supérfluos e nem desprezar pormenores necessários a uma solução precisa. É de se notar que a “quantidade” de simplificação é função da qualidade da resposta desejada. (Lirani, 1998)

O modelo tridimensional das palhetas diretrizes considerado na análise utilizou dois softwares comerciais para sua execução, Autodesk Inventor® v. 2012 e Siemens NX® 8.0, no primeiro, a geometria básica da palheta foi executada considerando para a elaboração do perfil hidráulico uma tabela de pontos bidimensionais fornecida pelo departamento de hidráulica da companhia (Andritz Hydro Inepar), seguido da execução dos eixos e mancais. O segundo software foi utilizado para aplicar raios de concordância de dupla curvatura, também alinhados com diretrizes hidráulicas e também para a execução de secções na superfície do modelo (*split*) a fim de facilitar a aplicação dos carregamentos. Foram feitas análises considerando diferentes condições como:

- Opção 1: Modelo individual completo de uma palheta isolada;
- Opção 2: Modelo dividido de duas palhetas com metades preparadas para uso de simetria cíclica (Figura 3);



**Figura 3 - Modelo CAD preparado para uso de simetria cíclica em software de elementos finitos**

- Opção 3: Modelo da montagem completa do jogo de palhetas (Figura 4);

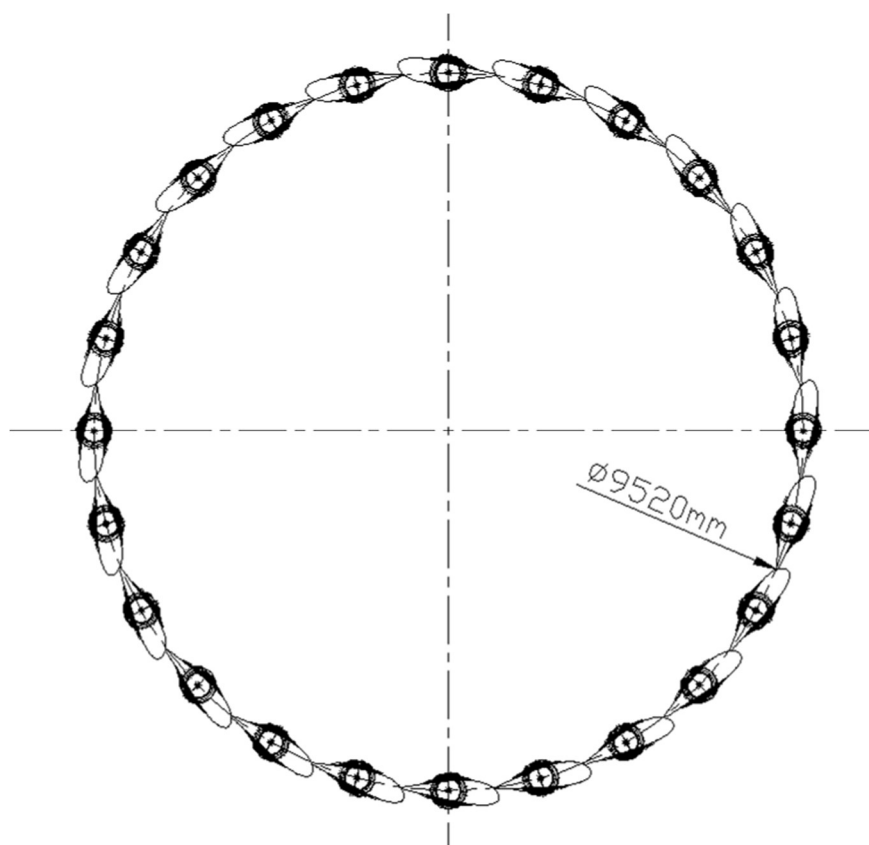


Figura 4 - Modelo completo do círculo de palhetas diretrizes (24 elementos)

Das opções apresentadas acima, a opção 1, mais simplificada, resultou em tempos de processamento significativamente menores, porém, como elemento individual, surgiram dúvidas se os resultados observados seriam similares aos casos de análises realizadas utilizando montagens - opções 2 e 3 - uma vez que os contatos não estavam presentes e apenas as condições de contorno aplicadas nas linhas de contato teórico simulavam a presença das palhetas adjacentes.

A opção 2 foi descartada após tentativas frustradas de convergência empregando o recurso de simetria cíclica no software de elementos finitos, também se tentou, sem sucesso, aplicar simetria utilizando a opção 1.

A opção 3 foi utilizada de duas maneiras, na primeira tentativa, mesmo com uma malha grosseira de baixa relevância, constatou-se que o número de elementos sugeridos pelo software de elementos finitos, necessários para obter razoável precisão, seria impraticável para os recursos computacionais disponíveis na ocasião, dado que cada palheta apresenta dimensões relativamente grandes, a massa estimada de cada palheta é de 7850 kg. Para fins de escala, como nota-se na Figura 4, o círculo de palhetas possui quase 10 m de diâmetro (9520 mm) e a análise deveria considerar o efeito dos raios de transição individual de cada palheta (uma *feature* da ordem de 15 mm). Assim, a alternativa encontrada foi utilizar o modelo 3D do conjunto montado conforme a opção 3, porém, suprimindo 21 palhetas no software de elementos finitos, mantendo, portanto, apenas 3 palhetas ativas, sendo a palheta central o objeto de estudo.

### 3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A grande parte das formulações analíticas cobre somente os casos mais simples, sendo que alguns exigem hipóteses de difícil ocorrência como, por exemplo, completa homogeneidade, isotropia, linearidade de resposta, de forma que mesmo sendo soluções analíticas elas não são completamente exatas.

Dentre as possíveis soluções de sistemas contínuos complexos é possível a confecção e ensaio de modelos. Quando os modelos são feitos em escala reduzida, o uso da teoria da semelhança faz-se necessário e geralmente são enfrentados problemas devido ao efeito de escala. As críticas maiores a essa técnica são o alto custo e a baixa versatilidade visto que novas versões ou novas opções construtivas exigem novos modelos (Lirani, 1998).

Desta forma, o uso de softwares de elementos finitos representa a solução mais atrativa em termos econômicos, para isto, neste caso foi utilizado o ANSYS® release 14.5, ambiente Workbench, disponível na empresa Andritz Hydro S.A. A seguir são descritas condições aplicadas no estudo.

#### 3.1 Sistemas de coordenadas

Foi necessário adicionar sistemas de coordenadas no centro do distribuidor com um dos eixos orientados para a projeção da região de contato das palhetas, como mostrado na Figura 5 para uso posterior em equações de restrição de deslocamento.

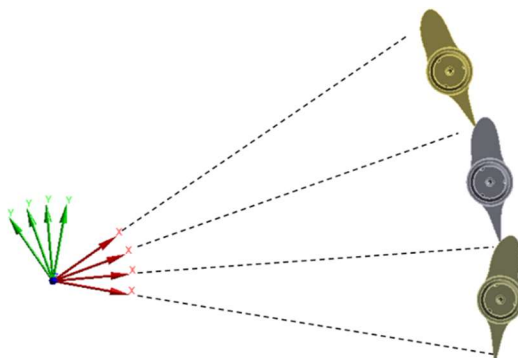


Figura 5 - Sistemas de coordenadas alinhados aos pontos de contatos entre palhetas.

De modo similar, acrescentaram-se sistemas de coordenadas locais, mas desta vez com um dos eixos coincidente com a linha de centro das palhetas, conforme mostrado na Figura 6.

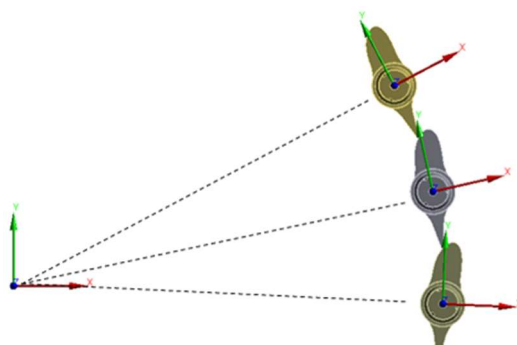


Figura 6 - Sistemas de coordenadas locais, centralizados ao eixo das palhetas diretrizes e alinhados radialmente ao centro do distribuidor.

### 3.2 Pontos remotos

Para cada palheta diretriz, acrescentaram-se regiões de “pontos remotos”, estas regiões, localizadas no bordo de entrada e de saída também foram necessárias para aplicar relações de deslocamentos nas condições de contorno. Cada região de “pontos remotos” foi associada a um sistema de coordenadas, definidos na Figura 5 e mostrados na Figura 7.

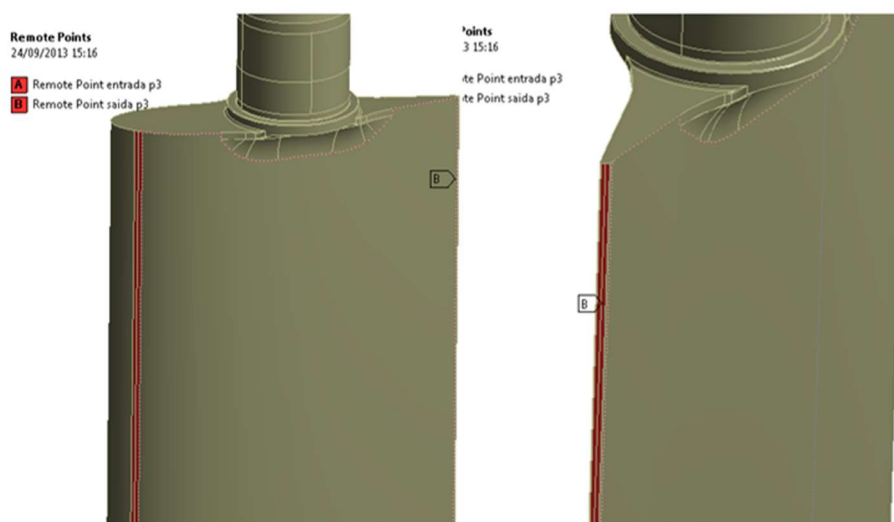


Figura 7 - Regiões de "pontos remotos" aplicadas nas superfícies de contato entre palhetas

### 3.3 Malha

A primeira avaliação considerada empregou as configurações padrões do software, empregando apenas o recurso de dimensionamento avançado em curvaturas, tamanho máximo de elemento limitado em 400 mm e refinamento de malha em regiões de contato. Os elementos, por padrão do software, foram predominantemente tetraédricos, totalizando para o caso analisado 206930 elementos e 321176 nós.

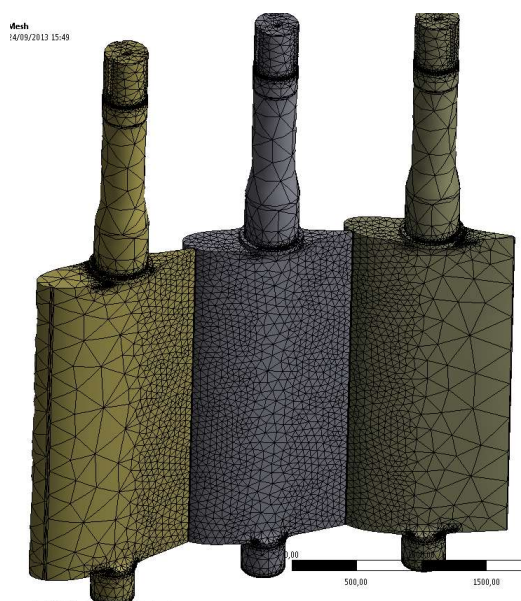


Figura 8 - Visão geral da malha obtida com configurações padrões do software.

Para avaliação de qualidade da malha obtida, foi acionado o indicador *Skewness*, este indicador pode resumidamente ser entendido como a diferença entre o elemento analisado em termos de ocupação volumétrica, onde zero representaria um elemento equilátero e “1” representa elemento inadequado, distorcido, portanto, na Fig. 9, quanto mais à esquerda do gráfico, melhor a qualidade do elemento (Ansys, 2013).

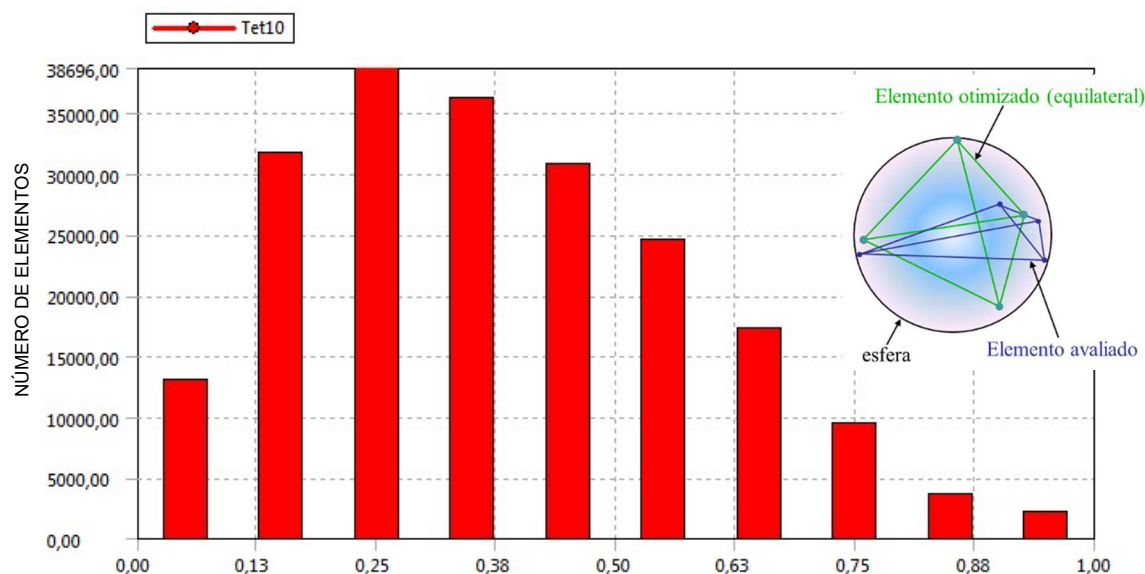


Figura 9 - Métrica de qualidade da malha (*Skewness*)

No componente analisado, temos, uma distribuição predominante de 38696 elementos (18,7% do total) com uma relação de ocupação volumétrica igual a 0,25 o que foi assumido como qualidade aceitável. Elementos de outras formas poderiam ser utilizados, como hexaedro, entretanto, optou-se por utilizar inicialmente as configurações padrões do software.

### 3.4 Apoio nos mancais

Para os mancais, aplicaram-se condições de *remote displacement*, ou seja, as superfícies selecionadas do eixo na região do mancal podem deslocar-se como uma rótula esférica em torno de um ponto específico. A superfície nos mancais já havia sido seccionada no software de modelamento, em 180 graus e ainda tiveram o ponto central de aplicação do engastamento localizado a 2/5 da altura da bucha de apoio do mancal, medidos a partir do centro da palheta (Figura 10), esta definição advém de diretriz interna da empresa Andritz Hydro, obtida em estudos realizados anteriormente para este componente.

Foram restringidos os deslocamentos nas direções “x” e “y” dos sistemas de coordenadas locais (fig. 6), deixando livres os deslocamentos na direção vertical (eixo “z”) e deslocamentos angulares em todas as direções (engastamento do tipo rótula esférica).

A exceção foi o mancal superior, que teve também restrições aplicadas ao deslocamento vertical (eixo “z”) de modo a simular o mancal de escora existente neste local, porém as demais condições de liberdade angular foram mantidas.

Esta hipótese de liberdade angular em eixos perpendiculares ao eixo da articulação da palheta diretriz é aceitável uma vez que os mancais costumam utilizar buchas autolubrificantes de base

não metálica, normalmente polímeros, que apresentam baixo módulo de elasticidade. Esta característica não representa limitações em sua utilização, pois as espessuras de tais buchas costumam ser pequenas em relação ao diâmetro do eixo das palhetas (geralmente  $< 0.1 \times d$ ). As deformações das buchas evitam que tensões de aresta sejam acentuadas caso ocorram deslocamentos angulares acentuados nos eixos das palhetas.

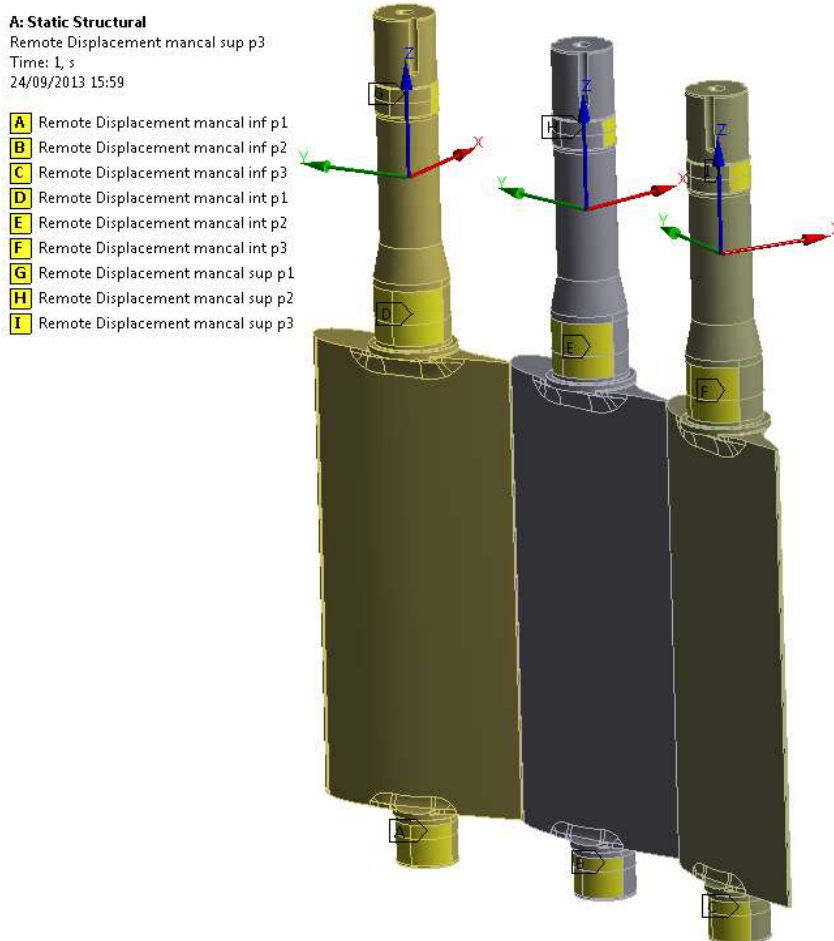


Figura 10 - Restrições de deslocamento aplicadas aos mancais superiores, intermediários e inferiores.

### 3.5 Equações de restrição

Como não foi possível utilizar simetria no estudo, as regiões denominadas “pontos remotos” (Fig.7) foram utilizadas para simular artificialmente um contato entre palhetas que não estavam efetivamente modeladas de forma adjacente (palhetas 1 e 3), para isto, utilizou-se equações de compatibilidade de deslocamentos.

As regiões foram nomeadas de “bordo de entrada” e “bordo de saída” e após isto, o deslocamento nestas áreas foi igualado por equações (somatório igual a zero) de modo a correlacionar os deslocamentos entre palhetas, por exemplo, deslocamentos no ponto remoto “bordo de entrada” da palheta 1 com “bordo de entrada” da palheta 3 deveriam ser iguais, da mesma forma o “bordo de saída” da palheta 1 foi restringido como igual ao da palheta 3.

Esta alternativa visa simular um sistema completo, ou seja, evitar que os lados das palhetas sem contato, fossem consideradas livres, o que não corresponderia ao modelo de um distribuidor real.

Esta restrição, porém, não foi aplicada entre palhetas sucessivas (não foi feita restrição do tipo “bordo de saída” 2 igual “bordo de entrada” 3, por exemplo), pois isto resultaria em condição similar a um contato do tipo aderente (*bonded*) e as folgas de interesse entre as palhetas não seriam observadas.

Ao invés disto, uma condição de contato livre de atrito foi atribuída na interface entre palhetas subsequentes. Foram feitas também tentativas utilizando atrito, mas o tempo de processamento mostrou-se muito maior e pouca ou nenhuma diferença observada nos resultados.

### 3.6 Cargas aplicadas

Basicamente três cargas foram aplicadas no estudo, primeiramente, a pressão hidrostática atuando apenas nas faces a montante das linhas de vedação, no caso analisado esta pressão foi correspondente a uma queda hidráulica de 100,5 metros de coluna d’água.

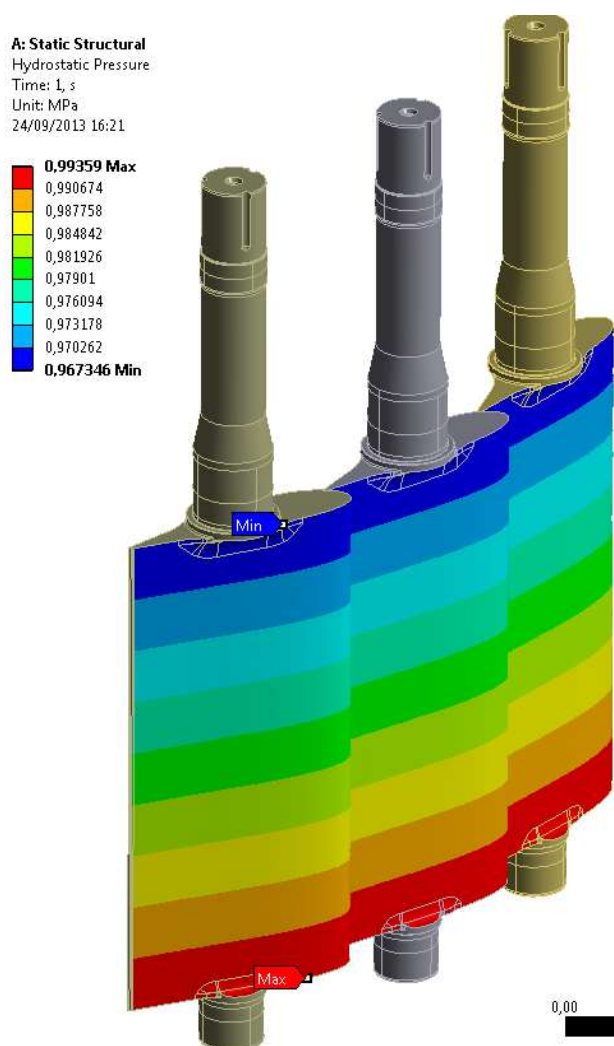


Figura 11 - Aplicação de pressão hidrostática nas faces de montante das palhetas diretrizes.

O corpo da palheta avaliada possui 2.7 metros de altura, o que é relativamente grande, mas a aplicação de pressão constante não resultaria em resultados muito diferentes (variação de 3%), porém, como não há vantagem computacional significativa em se fazer esta simplificação, o rigor deste carregamento foi mantido.

Cada palheta está fisicamente acoplada a uma alavanca para transmitir o torque responsável pelo seu movimento angular, no estudo, optou-se por representar este conjugado por uma força equivalente, distante de uma distância conhecida do eixo da palheta (distância que corresponde ao comprimento da alavanca). Este carregamento tem a magnitude de 3280 kN.

A razão de ter sido selecionado força remota ao invés de torque é que no primeiro caso, se verifica o efeito fletor no eixo da palheta e não simplesmente torsão que seria observada caso fosse aplicado torque. (Figura 12).

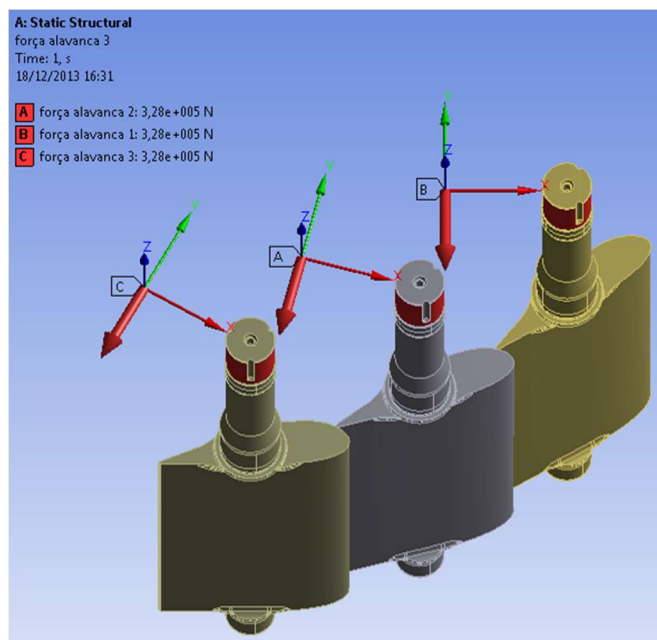


Figura 12 - Força remota representando a carga do mecanismo de fechamento.

## 4 RESULTADOS

Como o presente trabalho objetiva a redução de vazamentos provenientes das deformações nas palhetas submetidas aos carregamentos de trabalho, as deformações nas arestas de vedação foram obtidas em uma linha, através de um caminho, *path*, pré-definido na palheta, sendo um deles correspondente aos deslocamentos observados no bordo de entrada e outro caminho, no bordo de saída da palheta adjacente.

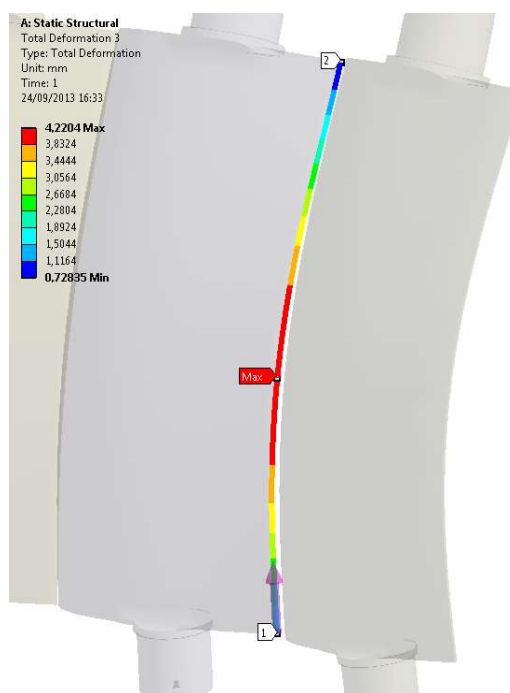


Figura 13 - Exemplo de deslocamentos entre pontos 1 e 2.

Conforme esperado, os deslocamentos no bordo de entrada foram menores do que os deslocamentos do bordo de saída. Atribui-se a isto a diferença de rigidez presente devido ao perfil hidrodinâmico, que provê maior “espessura” no primeiro em relação ao bordo de saída.

A folga gerada pela diferença nos deslocamentos, mostrada na Figura 14 revela a origem de uma das fontes de vazamento nos distribuidores na posição fechada, mesmo com aplicação de torque adicional (*squeeze*).

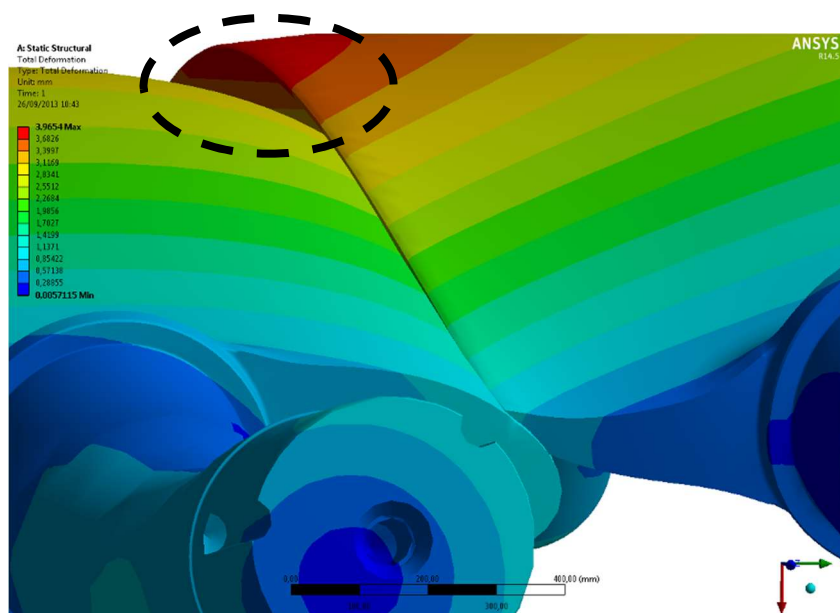


Figura 14 - Representação gráfica em escala aumentada dos diferentes deslocamentos observados entre palhetas. A folga entre peças resultaria em vazamentos no distribuidor.

Depois de obtidos, os resultados foram exportados na forma de tabela, o gráfico abaixo representa os deslocamentos em milímetros relacionados à localização ao longo da linha de contato “eixo z”, onde a origem ( $z=0$ ) é o ponto inferior de contato entre palhetas.

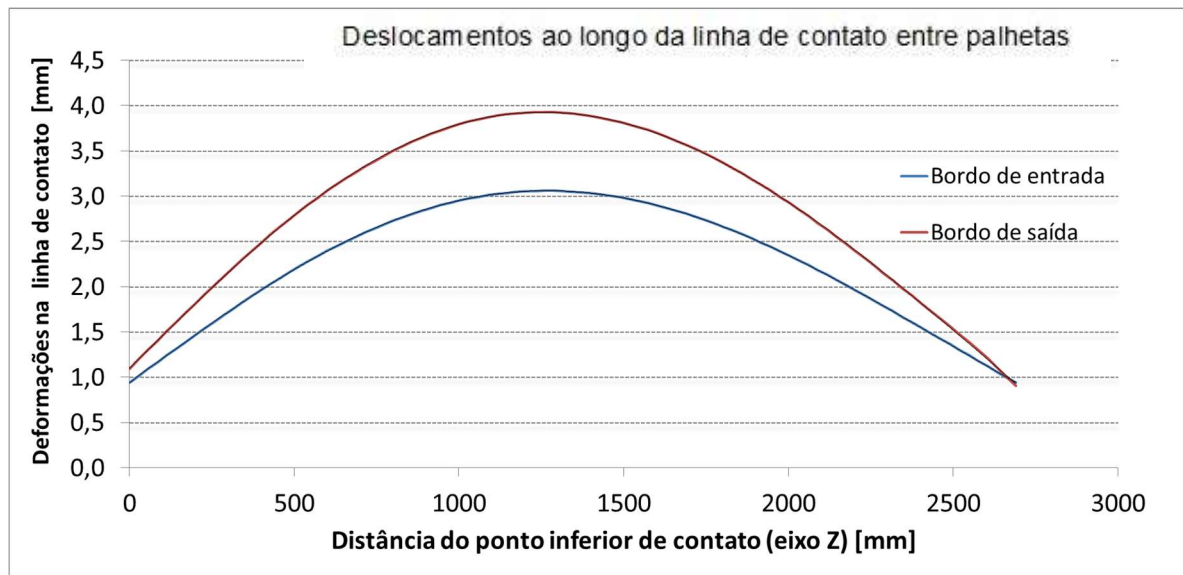


Figura 15 - Deslocamentos ao longo da linha de contato entre palhetas

Para cada uma das curvas obtidas foi adicionada uma linha de tendência polinomial e observou-se que na escala do gráfico não mais percebia-se diferenças entre o resultado da análise de elementos finitos e os polinômios de grau 5, obtidos por regressão polinomial, recurso disponibilizado pelo pacote comercial Microsoft Excel<sup>®</sup>, conforme descritos nas equações (1) e (2):

$$f(x) = -4,90452E - 17x^5 + 5,30149E - 13x^4 - 1,71049E - 09x^3 + 3,78026E - 07x^2 + 3,54601E - 03x + 1,09983 \quad (1)$$

Da mesma forma, para o bordo de entrada:

$$g(x) = -2,64656E - 17x^5 + 3,44636E - 13x^4 - 1,19909E - 09x^3 + 2,75327E - 07x^2 + 2,61462E - 03x + 9,41865E - 01 \quad (2)$$

O cálculo da área entre as curvas pode ser determinado por:

$$\int_a^b (f(x) - g(x)) dx = A \quad (3)$$

Apesar da altura total da palheta ser 2700 mm, o intervalo de integração considerado foi de  $a = 0$  mm até  $b = 2676,42$  mm, isto porque o ponto “b” representa a coordenada onde ocorre o toque entre as palhetas.

Substituindo (1) e (2) em (3) e resolvendo, obtemos:

$$A = 1566 \text{ mm}^2$$

Uma vez obtida a área, foi possível calcular a velocidade do escoamento.

Dados:

Queda d'água a montante = 100,5 m.c.a.

Queda d'água a jusante = 9,06 m.c.a.

Queda líquida:

$$H = 100,5 - 9,06 = 91,44 \text{ m.c.a} \quad (4)$$

$g = 9,7805 \text{ m/s}^2$  (aceleração da gravidade)

$$\text{Velocidade} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 42,3 \text{ m/s} \quad (5)$$

Assim, o vazamento em cada uma das palhetas diretrizes devido ao deslocamento é:

$$Q_1 = 42,3 \times (1566 \times 10^{-6}) = 0.0662 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6)$$

Como são 24 palhetas diretrizes, resulta:

$$Q_{1(\text{total})} = 24 \times Q_1 = 1.6 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7)$$

O deslocamento de cada uma das palhetas é conhecido, logo, é possível realizar um ajuste na geometria de modo a compensar os deslocamentos verificados em operação para adequar as curvas do bordo de entrada e bordo de saída, reduzindo assim, a área formada pela folga entre as superfícies. Pode-se, por exemplo, realizar uma usinagem nas extremidades superior e inferior do bordo de saída, deste modo, o vazamento será menor quanto melhor for o ajuste realizado.

## CONCLUSÕES

A previsão da geometria deformada das palhetas diretrizes em etapa que antecede a fabricação permite, através do uso da técnica computacional de elementos finitos, prever a folga que irá surgir entre as superfícies de contato e com isto, fornece subsídios para que sejam realizados ajustes nas faces de vedação, que irão contribuir para a melhoria da estanqueidade do distribuidor de turbinas hidráulicas de modo geral, especialmente máquinas de grande porte que possuem palhetas com corpo delgado como é o caso de turbinas do tipo Francis de baixa queda e turbinas Kaplan.

A análise considerando palhetas em conjunto, quando comparada à análise de palheta individual, indica resultados mais aderentes ao que se observa em campo. Credita-se a isto o fato de ocorrerem interações não lineares entre os dois corpos em contato, onde, devido à pressão aplicada resultar em um desacoplamento das superfícies de vedação dada a diferença

de rigidez inerente ao perfil hidráulico quando consideradas diferentes regiões. Este desacoplamento seria dificilmente obtido em um modelo de palheta única. Em contrapartida, o modelo que emprega mais de um objeto representa maior complexidade, devido a presença de contatos, maior número de elementos em sua discretização e custo computacional superior.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Andritz Hydro Inepar, à Escola de Engenharia de São Carlos - EESC USP pela disponibilização da infraestrutura computacional e utilização do software e à PUC-RIO pela organização desta edição do CILAMCE.

## REFERÊNCIAS

Ansys, 2013. Manual do usuário. *Swanson Analysis System*.

Bathe, K-J., 1982. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall

Greco, M., 2004. *Análise de Problemas de contato/ impacto em estruturas de comportamento não linear pelo método de elementos finitos*. Tese doutorado, Universidade de São Paulo.

Lirani, J., 1998 *Introdução ao método de elementos finitos*. Apostila Laboratório CAD/CAE Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Macintyre, A. J., 1983. *Máquinas motrizes hidráulicas*. Guanabara Dois. Rio de Janeiro