

Estudo comparativo de porta-sedes de válvulas industriais visando à otimização de projeto

Fernando Biasibetti (PPGEP/UFRGS)
José Luis Duarte Ribeiro (PPGEP/UFRGS)
Mauro Luís Oliveira Costa (UCS)

Resumo

Este artigo apresenta um estudo comparativo de porta-sedes de válvulas de esfera trunnion de diferentes fabricantes. O estudo foi realizado visando à otimização de projeto utilizando as metodologias de Elementos Finitos (FEA) e Função de Perda Quadrática Multivariada. O objetivo principal deste artigo é identificar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam os requisitos da qualidade e correspondente desempenho funcional da válvula. Este estudo serve como subsídio para a realização da otimização dos projetos de válvulas de esfera trunnion na empresa em questão. O trabalho realizado revelou que, dentre os modelos de porta-sedes avaliados, o conjunto que apresentou a menor perda, tendo em vista os resultados da Função de Perda Quadrática Multivariada, é o modelo da válvula A. Esta válvula se encontra mais próxima do desempenho ótimo de vedação entre a sede e a esfera, considerando os limites de especificação adotados.

Palavras chave: Qualidade, Função de Perda, Elementos Finitos, Válvula de Esfera Trunnion.

1 Introdução

As economias sul-americanas tiveram um crescimento veloz nos últimos anos, mas sua expansão enfrenta uma desaceleração por causa do impacto da crise global. Existe uma preocupação geral da indústria brasileira e do governo do país em criar um cenário que favoreça a competitividade das empresas nacionais frente ao grande volume de importações depredatórias (EXAME, 2011). Segundo o IPEA (2011), desde 2005, o Brasil perde *market share* (participação do país nas exportações mundiais) em todos os produtos, exceto em commodities primárias e “outros” (item que inclui petróleo). Naquele ano, o país era responsável por 0,94% dos produtos de média intensidade tecnológica exportados mundialmente; em 2009, a participação caiu para 0,74%. No mesmo período, no entanto, o *market share* dos produtos de alta intensidade tecnológica se manteve praticamente estável (foi de 0,50% em 2005 para 0,49% em 2009).

No cenário de desindustrialização que o país está inserido, a competitividade é um item essencial para a sobrevivência das empresas brasileiras. Neste contexto, a qualidade é um elemento importante, e mesmo com a popularidade do uso deste termo, não existe um consenso unânime sobre a sua definição. De acordo com Crosby (1979), a qualidade significa a conformação das especificações. Segundo Deming (1986), a qualidade é a melhoria da conformação a especificações por meio da redução da incerteza e variabilidade.

Conforme Garvin (1987), a área da qualidade pode ser dividida em oito itens. O primeiro é a performance, que é a medida de desempenho do produto frente as suas principais funções. O segundo são as funcionalidades do produto, que são o conjunto de funções secundárias que complementam a oferta do produto. O terceiro é a fiabilidade, que é a probabilidade do produto deixar de funcionar de forma adequada num determinado período de tempo. O quarto item é a conformidade, medida do nível de adequação do produto às suas especificações. O quinto é a durabilidade, que nada mais é do que a medida do tempo de vida do produto em termos técnicos ou até ao momento em que a reparação deixa de ser eficiente do ponto de vista econômico. O sexto item é o serviço, que inclui a rapidez, a cortesia, a competência e a facilidade em reparar o produto. O sétimo é a aparência, referindo-se à estética ou apelo sensorial do produto; e o último item é a imagem, que se refere a uma percepção subjetiva de qualidade associada à marca do produto.

A identificação dos maiores modelos de excelência tanto para produtos, serviços como para projetos, e adequação dos mesmos à realidade de cada empresa, possibilita a adoção de uma prática de melhoria contínua. O *benchmarking* indica a direção a ser seguida, e consiste neste processo de busca das melhores práticas e evolução contínua (SILVA et al., 2002).

Contudo, mesmo as maiores fabricantes de válvulas industriais do Brasil possuem dificuldade em garantir a qualidade do produto já na área de projeto, sem que haja retrabalhos no processo de fabricação dos produtos.

Devido à complexidade de projetar e fabricar uma válvula de esfera *trunnion*, é comum que ocorram alguns desvios no processo de fabricação. Se o projeto da válvula não estiver robusto, as chances de o produto ser reprovado nos testes aumentam, podendo gerar retrabalho que acaba onerando o custo de fabricação das válvulas, diminuindo assim a competitividade do produto frente ao preço oferecido pelos concorrentes.

Considerando o exposto, o objetivo principal deste artigo é identificar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam o desempenho funcional da válvula, ou seja, que atendam aos requisitos de qualidade. Este estudo serve como subsídio para a realização da otimização dos projetos de válvulas de esfera *trunnion* na empresa em questão.

O *benchmarking* realizado nos porta-sedes é importante, porque está apoiado na necessidade da empresa fabricar produtos mais baratos e resistentes a diferentes condições operacionais. No processo de fabricação de alguns modelos de válvulas de esfera *trunnion* da empresa em estudo, existe um custo que pode ser considerado como elevado devido ao retrabalho que o produto sofre na linha de montagem. Através deste estudo, pretende-se conhecer os aspectos geométricos que garantam a funcionalidade do produto para posteriormente em outro artigo, empregar outra ferramenta para aumentar a robustez das válvulas otimizando parâmetros de projeto, tornando o produto menos suscetível a fatores que não podem ser devidamente controlados.

No que se refere à estrutura deste artigo, após esta introdução, o referencial teórico é apresentado, onde são discutidas as principais ideias e resultados de outros autores que pesquisaram sobre o tema, seguido da apresentação dos procedimentos metodológicos utilizados na realização deste trabalho. O artigo segue com a apresentação dos resultados e a discussão dos mesmos, descrevendo o estudo propriamente dito e seus achados. Finalizando, são apresentadas as conclusões que foram obtidas através deste estudo.

2 Referencial Teórico

2.1 Benchmarking

O *benchmarking* é definido como a busca pelas melhores práticas nas indústrias que levarão ao desempenho superior (CAMP, 1989). O termo *benchmarking* surgiu no final da década de 70 quando a Xerox discutia sobre a lacuna que havia detectado com relação a seus concorrentes. Durante a década de 80, este conceito foi difundido ao redor do mundo, surgindo então vários modelos para o processo de *benchmarking*. Na década de 90, o seu uso se consolidou largamente, principalmente em organizações norte-americanas e europeias (MELO et al., 2000).

Segundo Pereira et al. (2008), na Petrobras, o objetivo da utilização da prática de aprendizagem *benchmarking* é obter e sustentar vantagens competitivas pelo domínio das melhores práticas do ramo de negócio em que a empresa está inserida e pela adaptação de melhores práticas de outros ramos de negócio, buscando a melhoria contínua em seus processos, produtos e tecnologias por meio da comparação com referenciais externos de excelência.

Dentre as diversas abordagens de *benchmarking*, a mais completa é aquela que descreve este processo como sendo uma avaliação contínua das operações correntes na respectiva unidade de negócios, comparação com as práticas vigentes naquelas empresas consideradas como detentoras dos melhores processos e consequente aplicação do conhecimento assimilado através de tal estudo para o delineamento de planos, visando atingir o nível de excelência praticado por estas empresas consideradas como líderes. Segundo Silva et al. (1997), o processo de *benchmarking* é composto das seguintes fases:

- Planejamento: Consiste na definição da concorrência, na identificação das categorias de informação a serem pesquisadas e da metodologia mais adequada para sua coleta;
- Análise: Auxílio no entendimento dos pontos fortes da concorrência e na avaliação do seu desempenho em relação a seus pontos fortes;
- Integração: Utilização dos dados coletados para a definição de metas, visando ganhar ou manter a superioridade no mercado e para incorporar tais metas no processo de planejamento da organização;
- Ação: Fase em que as estratégias e os planos de ação estabelecidos com o processo de *benchmarking* são implementados e periodicamente avaliados, afinal as práticas externas estão mudando constantemente;
- Amadurecimento: Determinação do momento em que é atingida a posição de liderança e avaliação da relevância do processo de Benchmarking realizado – o quanto o processo de *benchmarking* se tornou essencial e um elemento contínuo no gerenciamento dos negócios da organização.

2.1.1 Tipos de Benchmarking

De acordo com Melo et al. (2000), embora o processo básico seja o mesmo, existem alguns tipos de *benchmarking*, diferenciados pelo “alvo” ou “objeto” da atividade de *benchmarking*. São basicamente três tipos: (i) Interno: Realizado dentro da própria organização, entre suas várias unidades ou departamentos. É mais um processo de conhecimento das práticas internas; (ii) Competitivo: Realizado pela comparação com empresas que são competidoras diretas da organização. É muito útil para posicionar o desempenho frente à concorrência; e (iii) Funcional: Realizado através da identificação das melhores práticas em qualquer tipo de organização que estabeleceu uma reputação de excelência na área específica sujeita ao benchmarking.

O sucesso de um projeto de *benchmarking* depende do envolvimento da alta gerência, que deve fornecer o suporte e os recursos necessários para sua implementação e seu desenvolvimento. O *benchmarking* envolve uma mudança cultural na organização, que deve reconhecer que pode aprender com terceiros, apoiada em informações sobre o objeto a ser estudado, fator este que pode ser dificultado quando se realiza o *benchmarking* competitivo (ELMUTI & KATHAWALA, 1997).

2.2 Válvulas de Esfera

De acordo com Smith e Zappe (2004), válvulas são componentes de um sistema de condução do fluido ou de pressão que regulam tanto o fluido como a pressão do fluido. Esta tarefa pode envolver a parada e o início do fluxo, controle da vazão, desvio do fluxo, prevenção da volta do fluxo, controle de pressão ou alívio de pressão.

As válvulas de esfera são geralmente classificadas como de bloqueio de fluxo, sendo assim utilizadas para iniciar ou interromper o fluxo durante o processo. As válvulas de bloqueio são muito utilizadas onde o fluido deve der desviado de uma área onde a manutenção está sendo realizada ou onde trabalhadores devem ser protegidos de potenciais riscos à segurança (SKOUSEN, 2004).

Segundo Mathias (2008), as válvulas de esfera possuem um movimento rotativo, nas quais o obturador é uma esfera que descreve um movimento rotacional de 0° a 90° em relação ao sentido de escoamento do fluxo na tubulação, para abrir ou fechar. É o tipo mais utilizado na indústria. Esta válvula possui esse nome devido ao seu obturador ser uma esfera vazada em que o fluido passa quando ela está totalmente aberta e alinhada com a tubulação. Na posição fechada, o furo da esfera fica perpendicular ao sentido de escoamento do fluxo, bloqueando a sua passagem.

Quando um bloqueio ou uma abertura rápida é requerido, e o fluido de processo assim permitir, o uso de uma válvula de esfera é a melhor opção. Para aplicações com pressões e temperaturas elevadas, e não suportadas por sedes resilientes, as válvulas de esfera podem ser construídas com sedes metálicas (MATHIAS, 2008).

A vedação é obtida entre o contato da esfera com as sedes, uma de cada lado da esfera. A superfície de vedação das sedes em contato com a esfera pode ter o mesmo raio que ela ou pode ser em ângulo. A vantagem da superfície em raio é que, por ser o raio da superfície de vedação da sede igual ao da esfera, o desgaste natural é reduzido, e o valor de torque inicial permanece por mais tempo. Outra vantagem é que a centralização da esfera com a sede é maior, e isto aumenta a vida útil da vedação, pois reduz o desgaste operacional. As forças estáticas exercidas pela pressão do fluido sobre a pista de vedação são transmitidas à sede de forma centralizada. A desvantagem da sede em raio é que, por ter área de contato maior, possui também um torque operacional maior. Quando a superfície da sede é em ângulo, uma área de contato menor reduz o torque e melhora a vedação, diminuindo a possibilidade de acúmulo de produtos na superfície da sede. Uma superfície de vedação em ângulo exige uma pressão diferencial menor para que uma vedação estanque seja obtida. As desvantagens deste projeto é que o desgaste é mais acentuado e existe a tendência do desgaste aumentar a pista de contato, mudando-a em ângulo para o mesmo raio da esfera (MATHIAS, 2008).

As válvulas esfera mancalizada (tipo *trunnion*) estão equipadas com duas sedes auto-ativantes, cada uma pode vedar à montante da válvula e ambas podem vedar se forem pressurizadas em ambos os lados acima da cavidade da válvula. Portanto, a válvula é completamente bi-direcional (TORMENE BRASIL AMERICANA, 2006).

As válvulas com montagem *trunnion* superam dois problemas mais comuns encontrados nas válvulas com esfera do tipo flutuante ou integral, que é o alto torque operacional e o desgaste da sede a jusante. Enquanto nos modelos esfera flutuante e integral a pressão a montante empurra a esfera contra a sede a jusante, no projeto *trunnion* um eixo superior e outro inferior restringem este movimento, diminuindo a influência que a pressão do fluido exerce sobre o torque operacional da válvula ou o desgaste da sede (MATHIAS, 2008).

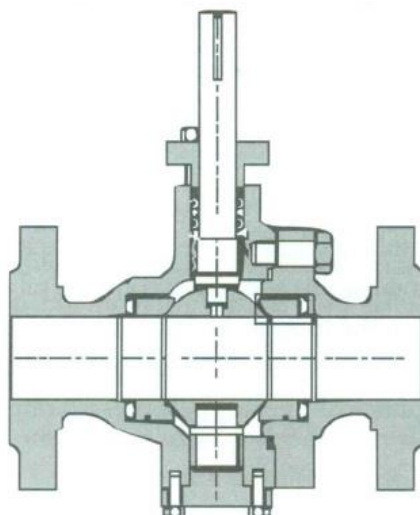


Figura 1 – Válvula de esfera do tipo *trunnion* (MATHIAS, 2008)

Nas válvulas de pressões maiores, os porta-sedes possuem molas na face oposta à sua superfície de vedação. A força destas molas, somada à gerada pela pressão de entrada, empurra o porta-sede a montante contra a esfera, proporcionando a vedação no lado montante. A principal função destas molas é de garantir uma pressão de contato inicial entre a sede a esfera, de modo que quando a válvula é submetida a um fluido ou gás em baixa pressão, sua vedação seja eficiente (MATHIAS, 2008).

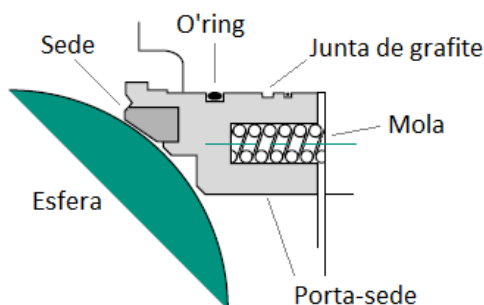


Figura 2 – Sistema de vedação para válvulas do tipo *trunnion*

Ambas as sedes se movimentam independentes uma da outra, pois é a própria pressão do fluido que as empurra contra a esfera para efetuar a vedação de acordo com o sentido de escoamento do fluxo. Deste modo, o porta-sede a montante tem ação flutuante. As sedes deste tipo construtivo necessitam ter *o' rings* em seu diâmetro externo para proporcionar vedação por detrás destas. Porém, neste caso, eles é que limitam a pressão e a temperatura para a válvula operar. Normalmente, são montados em suportes denominados porta-sedes e não diretamente no corpo, como ocorre com outros projetos. Assim, o movimento proporcionado pelas molas ocorre nos porta-sedes e não apenas nas sedes (MATHIAS, 2008).

2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico de análise utilizado na solução aproximada de problemas de engenharia. De acordo com Assan (1999), o método dos elementos finitos comumente utilizado é baseado no método de Rayleigh-Ritz e prevê a divisão do domínio de integração, contínuo, em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, tornando o modelo contínuo em discreto. A esta divisão do domínio se dá o nome de rede de elementos finitos. A malha deste reticulado pode ser aumentada ou diminuída variando o tamanho dos elementos. Os pontos de intersecção das linhas desta rede são chamados de nós. A Figura 3 mostra um exemplo de discretização.

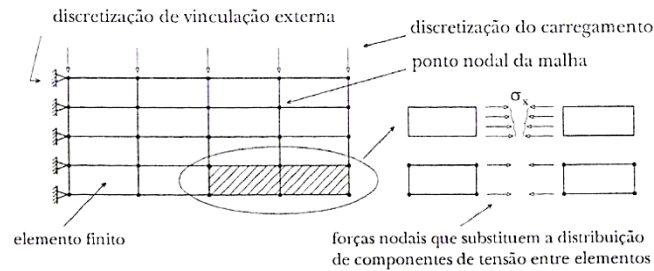


Figura 3 – Discretização dos elementos (SORIANO, 2003)

Segundo Cook et al. (2002), para resolver um problema utilizando este método, são necessárias as seguintes etapas:

- Classificação do Problema: Primeiramente o analista deve entender a natureza do problema;
- Modelo Matemático: Esta etapa envolve decidir quais são as características importantes para a análise, de forma que detalhes desnecessários possam ser omitidos e decidir qual a formulação matemática a ser adotada;
- Análise Preliminar: Antes de partir para a análise definitiva, é necessária a realização de uma análise prévia para que sejam obtidos resultados preliminares de forma que se garanta que o modelo construído seja compatível com a natureza da análise;
- Análise por Elementos Finitos: Esta fase pode ser dividida em outras três fases:
 - Pré-processamento: Etapa em que é realizada a preparação da geometria, inseridas as propriedades dos materiais, definições de contatos e malha, aplicação das condições de contorno e dos carregamentos;
 - Análise Numérica: O software gera as matrizes que descrevem o comportamento de cada elemento e resolvem as equações para determinar os valores de cada nó;
 - Pós-processamento: Os resultados da análise numérica são ilustrados através de gráficos e ilustrações;
- Analisar os Resultados: Primeiramente são realizadas algumas conferências para verificar se os resultados da análise são confiáveis e representam o modelo em sua aplicação real. Feito isso, é possível avaliar os resultados gerados pela análise.

Para resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que deve ser considerada é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o método dos elementos finitos é formulado e aplicado depende, em arte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Em seguida é abordado o tipo de análise utilizado neste trabalho.

De acordo com ARANHA e SOUZA (2004), na análise estática não-linear, não existe a proporcionalidade entre forças e deslocamentos, de tal forma que a equação de equilíbrio deve ser escrita conforme a fórmula a seguir.

$$P(D) = P^{ext}$$

Onde $P(D)$ representa o vetor das forças internas resistentes da estrutura, as quais são dependentes dos deslocamentos nodais. Este vetor é montado a partir das contribuições dos vetores de forças internas de cada elemento da estrutura. O problema representado pela equação acima consiste em um sistema de equações não-lineares, as quais podem ser resolvidas utilizando-se o método de *Newton-Raphson*. Para isto, se faz necessária a determinação da matriz Jacobiana do problema:

$$K(D) = \frac{\partial P(D)}{\partial D}$$

A qual consiste na matriz de rigidez da estrutura, sendo dependente dos deslocamentos D .

2.4 Função de Perda Multivariada

Segundo Caten e Ribeiro (1996), o critério mais adequado para se identificar o ajuste ótimo global é a Função de Perda Quadrática Multivariada. A performance de um produto/processo deteriora-se gradualmente quando as

variáveis de resposta desviam-se do seu valor ideal ou quando há variabilidade em torno dele. Há um consenso na literatura de que a perda incorrida ao consumidor devido à má qualidade é, em muitos casos, aproximadamente proporcional ao quadrado do desvio do alvo. Esse modelo de comportamento é capturado pela Função de Perda Quadrática, cuja versão univariada foi proposta por Taguchi.

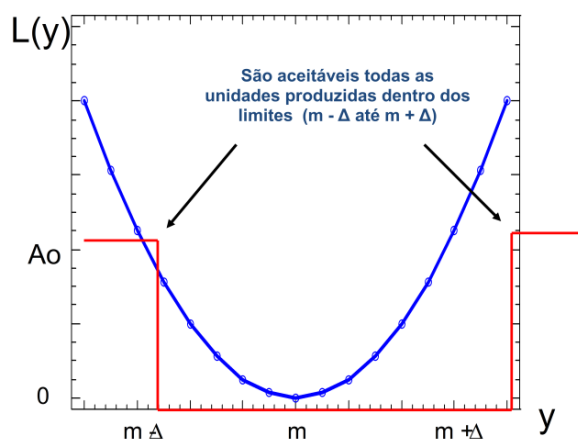


Figura 4 – Gráfico da função de perda (RIBEIRO E CATEN, 2011)

Na maioria dos estudos experimentais, existe mais de uma variável de resposta de interesse, exigindo o uso de algum procedimento multivariado na busca do ajuste ótimo dos fatores controláveis. O procedimento que será mostrado a seguir baseia-se na utilização da Função de Perda Multivariada como função objetivo a ser otimizada. Trata-se de um procedimento bastante genérico que fornece resultados consistentes na maioria das aplicações práticas. A função de perda é empregada para quantificar a perda que um produto impõe à sociedade pela falta de qualidade. Em muitos casos, essa perda resulta aproximadamente proporcional ao quadrado do desvio da meta estabelecida para uma certa característica de qualidade (RIBEIRO E TEN CATEN, 2011).

Na otimização, é preciso atribuir pesos a cada VR. Esses pesos têm duas funções:

- normalizar os valores que representam os desvios do alvo, obtidos nas unidades de grandeza da característica de qualidade, para que os desvios de todas as VR possam ser diretamente comparáveis;
- considerar a importância relativa (IR_j) de cada VR.

Para todas as variáveis de resposta Y_j , deve-se conhecer de antemão o seu valor alvo, os limites de especificação e a importância relativa (IR_j). Existem três tipos variáveis de resposta: nominal-é-melhor, maior-é-melhor e menor-é-melhor.

3 Metodologia

O presente artigo foi realizado em uma empresa fabricante de válvulas de esfera *trunion* no mercado nacional. A empresa, de capital 100% nacional, procura ampliar sua fatia de participação no mercado produzindo válvulas de esfera de pequeno, médio e grande porte para mercados exigentes, como as indústrias do petróleo e gás, petroquímicas e de papel e celulose. Visando aumentar a qualidade e reduzir o custo de fabricação dos produtos, a empresa precisa elaborar um método de dimensionamento das válvulas que garanta robustez. Desta forma, será possível avaliar e otimizar o produto ainda na fase de projeto detalhado. Para isto, será necessária a elaboração de modelos para análises por elementos finitos que revelem a melhor configuração de porta-sede que garanta a funcionalidade da válvula.

Do ponto de vista da natureza da pesquisa, o presente trabalho é classificado como Pesquisa Aplicada, pois o estudo é orientado para a geração de conhecimentos dirigidos à solução de um problema específico, no caso o projeto robusto de válvulas. Quanto à abordagem o trabalho pode ser classificado como Pesquisa Quantitativa, pois há ênfase nas análises numéricas, incluindo análises comparativas através do método dos elementos finitos. Sob o ponto de vista dos objetivos, a pesquisa é Explicativa devido ao foco na identificação dos fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Em relação aos procedimentos, a pesquisa pode ser enquadrada tanto como Experimental como um Estudo de Caso, pois serão definidas experimentalmente, via FEA, as

variáveis que são capazes de influenciar o desempenho do produto e envolve também um estudo aprofundado do componente em questão.

O desenvolvimento do estudo foi feito a partir de sete etapas:

- (i) Definição dos modelos de porta-sede a serem estudados no *benchmarking*: Foram considerados três modelos de porta-sedes neste trabalho. Os componentes correspondem a modelos de válvulas que representam uma parte considerável do faturamento das empresas analisadas;
- (ii) Levantamento das características geométricas do componente: Os modelos de CAD foram fornecidos pelas empresas e sofreram algumas simplificações para a realização das análises por elementos finitos;
- (iii) Planejamento do estudo comparativo contemplando os parâmetros de produto relevantes: O objetivo desta etapa foi de levantar as características geométricas a serem consideradas neste comparativo. Estes atributos foram levantados através de um *brainstorm* realizado com os engenheiros da empresa com a finalidade de identificar os fatores que podem ser controlados que mais influenciam no desempenho da válvula. Os fatores de ruído que não podem ser controlados também foram levantados nesta reunião;
- (iv) Preparação das simulações de FEA para a análise do produto em estudo: Além da preparação dos modelos de CAD, foram colhidas informações sobre alguns atributos das válvulas que são necessários para a realização das análises;
- (v) Realização do estudo no ambiente de FEA: A elaboração dos modelos de CAD foi realizada através do software *Inventor 2010* e as simulações foram realizadas no *Ansys 14*. Tanto os modelos de CAD como a preparação das simulações foram realizadas em um computador da área de engenharia. O *solver* das análises foi realizado através de um servidor acessado remotamente;
- (vi) Análise dos resultados e indicação das principais diferenças dos parâmetros que ocorrem em cada produto, de forma que seja possível fornecer informações essenciais para uma futura otimização do porta-sede utilizando os conceitos de Engenharia Robusta: Os seguintes resultados foram considerados para a elaboração de futuros estudos: Deformação total na esfera, deformação total no porta-sede, pressão de contato na pista de vedação e força de reação na pista de vedação. Estes resultados foram escolhidos por serem bons indicadores de desempenho da válvula;
- (vii) Validação dos resultados obtidos junto a especialistas: Os resultados devem ser validados através de uma reunião com especialistas da indústria de válvulas industriais.

4 Resultados e discussão

4.1 Definição dos modelos de porta-sede a serem estudados

Os componentes que foram utilizados no presente estudo fazem parte de válvulas de esfera *trunnion* de bitola 8” classe 600 de diferentes empresas. Este modelo de válvula foi escolhido porque, além de representar uma parte considerável do faturamento das empresas analisadas, foi identificada uma oportunidade de melhoria no produto, tanto em relação à qualidade quanto ao custo de fabricação do equipamento. Vale observar que, para resguardar informações que a empresa considera confidencial, alguns dados foram deliberadamente alterados.

4.2 Levantamento das características geométricas do componente

Os modelos de CAD dos conjuntos porta-sede, sede e esfera foram fornecidos pelas empresas e sofreram algumas simplificações para a realização das análises por elementos finitos. Tais simplificações correspondem à remoção dos chanfros do porta-sede e esfera, criação de linhas de divisão no modelo denominadas *split*, substituição das molas e o-rings por condições de contorno que representem suas funções e criação de uma condição de meia simetria do conjunto. Todas estas simplificações não alteram de maneira relevante o resultado das simulações, mas são fundamentais para reduzir o refinamento da malha e o tempo de processamento das análises de elementos finitos. Na Figura 5 é ilustrado um exemplo de porta-sede similar aos utilizados no estudo.

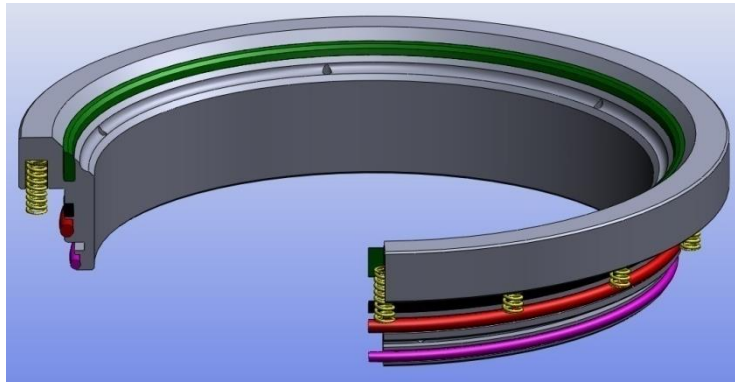


Figura 5 – Exemplo de modelo em CAD 3D utilizado no estudo

4.3 Planejamento do estudo comparativo

As seguintes características geométricas foram parametrizadas neste comparativo:

- Área da pista de vedação;
- Área do efeito de pistão $[(\text{Diâmetro externo do o'ring} - \text{Diâmetro interno da pista de vedação}) * \pi / 4]$;
- Diâmetro médio da pista de vedação;
- Existência de raio na sede;
- Espessura do porta-sede;
- Comprimento do porta-sede;
- Força das molas;
- Ângulo da sede;
- Folga entre porta-sede e corpo/tampa;
- Razão entre diâmetro externo e interno da esfera.

Estas características geométricas são responsáveis pela garantia de que a válvula será capaz de vedar o gás ou fluido. O presente estudo compreende o levantamento destas características em três modelos diferentes de porta-sedes e a comparação dos resultados obtidos, de maneira a identificar quais são as principais características que influenciam no funcionamento da válvula. Como este estudo é comparativo, foi utilizada a função de perda multivariada para verificar qual dos três modelos de porta-sede possui a menor perda, ou seja, que possui o menor desvio em relação aos valores alvos das variáveis resposta de interesse.

4.4 Preparação das simulações de FEA

Para viabilizar o estudo, além da preparação dos modelos de CAD, foram colhidas informações sobre alguns atributos das válvulas que são necessários para a realização das análises para que elas possam reproduzir as condições de operação da válvula. Estas informações são a força de reação devido ao aperto das molas e os materiais que compõem os componentes analisados. Para este estudo priorizou-se utilizar a mesma configuração de material em todos os conjuntos de porta-sede, com o intuito de diminuir o número de variáveis que possam interferir no desempenho da válvula.

4.5 Realização do estudo no ambiente de FEA

Para cada porta-sede, foram realizadas três análises considerando as condições de operação da válvula. A primeira contempla apenas a aplicação da força das molas, a segunda possui a força das molas adicionada a uma pressão de 6 bar para reproduzir o teste de baixa pressão realizado com gás. A terceira análise é similar à segunda, porém com a pressão de teste de vedação, que corresponde a 1,1 vezes a PMT (Pressão Máxima de Trabalho), que neste caso está estabelecida em 112,31 bar.

Esta metodologia foi adotada para reproduzir, através de simulações, as condições em que a válvula é testada após a sua fabricação. No intuito de simplificar este estudo, algumas variáveis tiveram de ser mantidas fixas, pois podem influenciar os resultados dos testes. São elas:

- (i) Esfericidade da esfera: Para que ocorra a vedação entre a sede a esfera, este último componente deve possuir um erro de esfericidade admissível, pois se o erro for muito grande, a sede não consegue copiar a deformação da esfera, porém se tornaria muito oneroso fabricar uma esfera com um erro de esfericidade mínimo. No presente estudo o erro de esfericidade foi considerado como 0, ou seja, a esfera é geometricamente isenta de falhas;

- (ii) Defeito de fabricação do o'ring: Este componente não pode apresentar fissuras e falhas durante a sua montagem no conjunto, pois se isto ocorrer pode comprometer na formação do efeito de pistão do porta-sede, a simulação foi conduzida considerando a situação usual, que corresponde a o'ring sem defeito;
- (iii) Posicionamento do porta-sede: Para garantir que a sede não apresente deformações plásticas ao longo da vida útil da válvula, o conjunto não pode apresentar grande variação na posição do porta-sede em relação à esfera. Na simulação o porta-sede se encontra alinhado concentricamente com o corpo/tampa da válvula, sem considerar qualquer desvio em seu posicionamento;
- (iv) Rugosidade da sede/esfera: Este quesito influencia diretamente no valor de torque de acionamento da válvula, porém na medida em que a válvula é acionada durante a operação, ocorre um desgaste na sede e se o acabamento das superfícies da interface de vedação não estiver bom, pode haver um desgaste prematuro da sede, modificando assim a geometria inicial deste componente podendo desta forma comprometer a vedação da válvula. Neste caso, a rugosidade foi estabelecida em 0,2 μm ;
- (v) Falhas nos materiais: Neste estudo foi considerado que os materiais dos componentes são isentos de imperfeições em sua estrutura, sendo assim isentos de qualquer porosidade que pode em casos extremos implicar no vazamento do equipamento;
- (vi) Temperatura: A temperatura foi considerada como ambiente (22° C), pois não há o interesse em se investigar a influência da mesma neste estudo.

4.6 Análise dos resultados

Nas figuras a seguir, estão ilustrados os resultados obtidos nas análises por elementos finitos. As válvulas dos diferentes fabricantes foram denominadas por letras (A, B e C). Na Figura 6 são ilustrados os resultados de deformação total aplicando o carregamento de 1,1xPMT (Pressão Máxima de Trabalho) e a força de reação das molas, de maneira a reproduzir as condições do teste de vedação que é realizado nas válvulas logo após a montagem do conjunto.

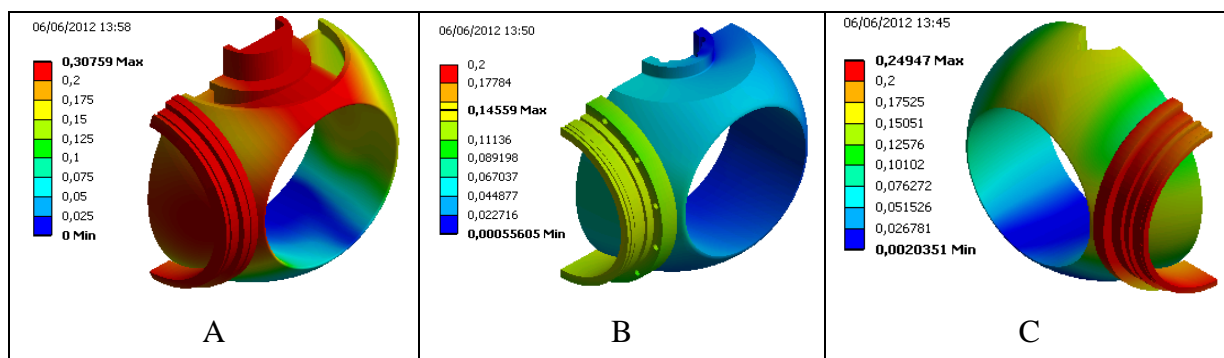


Figura 6 – Deformação total nos conjuntos porta-sede/esfera em mm

Os resultados da Figura 6 possibilitam identificar quanto os componentes se deformam ao se aplicar o carregamento. Neste comparativo, esses resultados são considerados somente para realizar uma validação qualitativa do modelo de elementos finitos empregado, visto a impossibilidade de realizar a validação da metodologia utilizando extensômetros.

Na Figura 7 se encontram os resultados em termos de pressão de contato da sede em relação à esfera. Estes resultados representam a aplicação da força das molas e pressão em 6 bar, reproduzindo assim o teste de baixa pressão que é realizado nas válvulas após a montagem do conjunto.

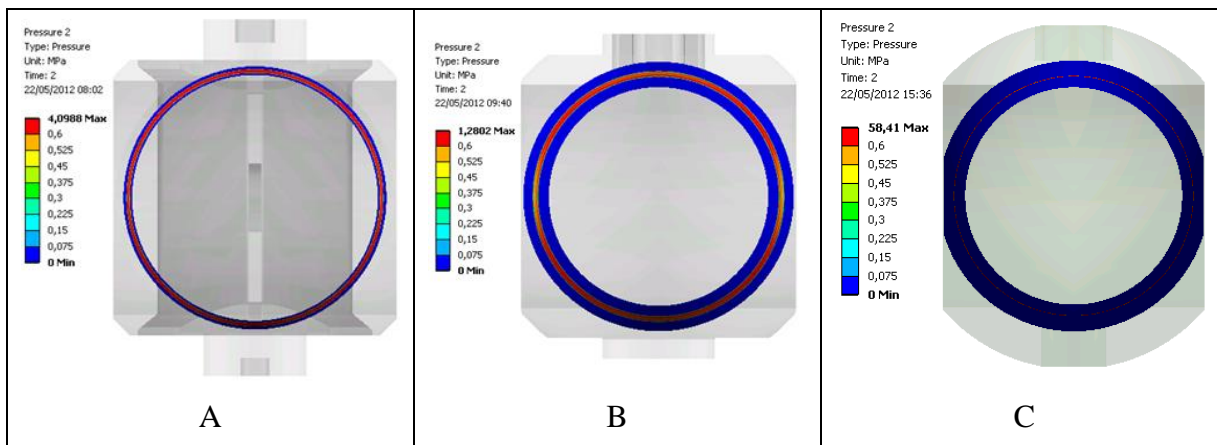


Figura 7 – Pressão de contato na condição de teste de baixa pressão

Através dos resultados da Figura 7 é possível identificar que a válvula B não apresentou pressão de contato suficiente para garantir a vedação nas regiões laterais da pista de vedação. A válvula C apresentou uma área de vedação muito pequena, resultando em uma pressão de contato elevada, enquanto a válvula A apresentou bons resultados.

Na Figura 8 são ilustrados os resultados de pressão de contato da sede em relação à esfera. Os resultados representam a aplicação da força das molas e pressão de 1,1xPMT.

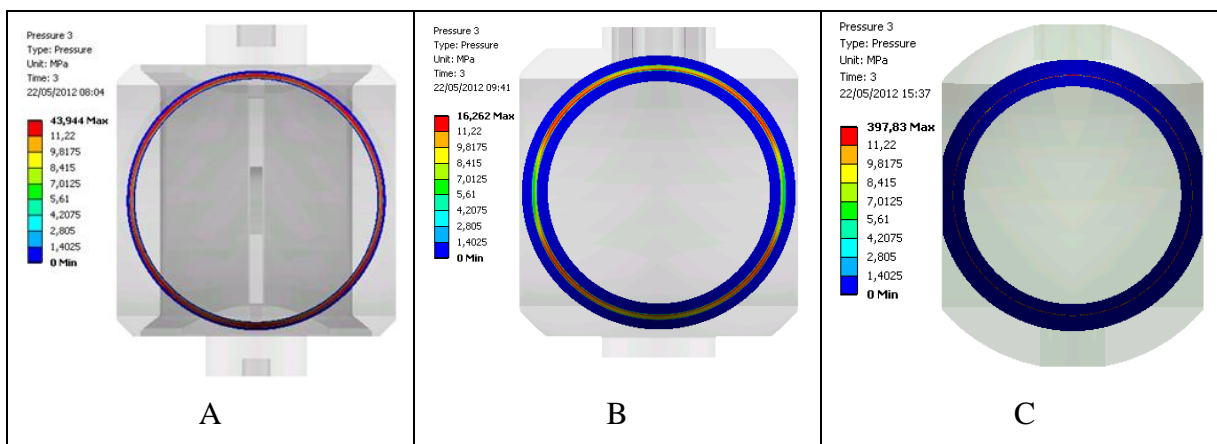


Figura 8 – Pressão de contato na condição de teste de vedação

De acordo com os resultados da condição ilustrada na Figura 8, o modelo B novamente apresentou regiões em que a pressão de contato entre a sede e a esfera não garantiriam a vedação da válvula. Já no modelo C, a pressão de contato é muito elevada, o que garantiria a vedação, porém poderia gerar deformações permanentes na sede. Novamente a válvula A apresentou melhores resultados.

Para poder comparar analiticamente os três modelos estudados, foi utilizada a função da perda quadrática multivariada. Utilizando este método é possível determinar qual dos modelos de porta-sede apresenta a menor perda, ou seja, apresenta o menor desvio das variáveis de resposta em relação a seus respectivos alvos. Para a variável de resposta Pressão de Contato (Y_1), foi utilizada a função de perda assimétrica onde é verificado se o valor da função (y) é maior ou menor que o alvo, empregando em seguida os limites correspondentes.

Se for menor que o alvo $Perda = k_1 [(Y_1 - Alvo_1)/(Alvo_1 - LEI_1)]^2$

Se for maior que o alvo $Perda = k_1 [(Y_1 - Alvo_1)/(Alvo_1 - LES_1)]^2$

Para a variável de resposta Força de Reação (Y_2), foi utilizada a função de perda quadrática simétrica, conforme descrição a seguir.

$$Perda = k_2 \cdot \frac{(Y_2 - A_2)^2}{SIE_2^2}$$

Onde k_2 refere-se à importância relativa da variável resposta Y_2 , A_2 é o valor alvo para Y_2 (para variáveis de resposta do tipo maior é melhor ou menor é melhor, quando o valor de supera o alvo, atribui-se zero para o correspondente desvio do alvo) e SIE_2 é a semi-amplitude da especificação de Y_2 . Na Tabela 1 são descritas as variáveis de resposta.

Tabela 1 – Variáveis de resposta e importâncias relativas

Variável de Resposta (VR)	Valor Alvo (A)	Limite de especificação superior (LES)	Limite de especificação inferior (LEI)	Condição de carregamento
$Y_1 =$ Pressão de contato	1,8 MPa	151 MPa	0,78 MPa	Força das molas + 0,6 MPa de pressão
$Y_2 =$ Força de reação	30000 N	35000 N	25000 N	
$Y_3 =$ Pressão de contato	16,83 MPa	151 MPa	14,59 MPa	Força das molas + 11,22 MPa de pressão
$Y_4 =$ Força de reação	450000 N	470000 N	430000 N	

Para cada condição de carregamento foram coletados resultados em 15 pontos diferentes para a variável Pressão de Contato. Em seguida são descritos os resultados de forma resumida da função de perda quadrática multivariada para cada válvula analisada.

$$Perda_A = \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{1i} - 1,8}{1,8 - 151} \right)^2 \right] + 15 \frac{(26890 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{3i} - 16,83}{16,83 - 151} \right)^2 \right] + 15 \frac{(467460 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 4,4$$

$$Perda_B = \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{1i} - 1,8}{1,8 - 0,78} \right)^2 \right] + 15 \frac{(27000 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{3i} - 16,83}{16,83 - 14,59} \right)^2 \right] + 15 \frac{(448440 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 101,8$$

$$Perda_C = \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{1i} - 1,8}{1,8 - 151} \right)^2 \right] + 15 \frac{(34420 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[\left(\frac{Y_{3i} - 16,83}{16,83 - 151} \right)^2 \right] + 15 \frac{(463140 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 40,7$$

Dentre os modelos de porta-sedes analisados, o conjunto que apresentou a menor perda conforme o método da função da perda quadrática multivariada é o modelo A. Conseqüentemente esta válvula se encontra mais próxima de ter um desempenho ótimo de vedação entre a sede e a esfera e deve ser selecionada para desenvolvimentos futuros.

4.7 Validação dos resultados junto a especialistas

A metodologia e os resultados deste estudo foram validados através de *brainstormings*, reuniões e apresentações com especialistas das empresas de válvulas industriais. Participaram desta etapa o Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento que possui 15 anos de experiência trabalhando com válvulas industriais, o Gerente de Engenharia e o Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento que possuem 7 anos de experiência no ramo.

Como descrito anteriormente, devido à delimitação deste problema não foi realizada uma validação do modelo de elementos finitos utilizado para o comparativo através de extensometria, porém a metodologia de análise já vem sendo utilizada na área de Pesquisa e Desenvolvimento e possui um histórico apresentando bons resultados, sendo inclusive validada de forma qualitativa pelo Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento.

Os resultados ilustrados nas Figuras 7 e 8 foram o foco deste processo de validação por se tratarem de importantes evidências do funcionamento da vedação do conjunto sede/esfera da válvula. De acordo com os profissionais consultados, os resultados se mostraram condizentes com as características que cada porta-sede possui, especialmente no que diz respeito ao diferencial de pressão entre o o'ring externo do porta-sede e o ponto de vedação da sede e na área de contato formada sobre a esfera.

5 Conclusões

Através deste artigo foi possível identificar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam o desempenho funcional da válvula, ou seja, que atendam aos requisitos de qualidade. O estudo descrito neste artigo foi delimitado em comparar três modelos de porta-sedes de válvulas trunnion bitola 8" classe de pressão 600, utilizando os resultados das análises realizadas pelo método dos elementos finitos e utilizando a função da perda quadrática.

Os parâmetros geométricos dos componentes que fazem parte deste estudo não foram variados para estudar seu efeito sobre o desempenho da válvula. Portanto, este estudo teve a finalidade de servir como subsídio para a realização da otimização dos projetos de válvulas de esfera *trunion* na empresa em questão através da metodologia de Projeto Robusto que será abordada na seqüência deste trabalho, onde serão justamente variados os principais parâmetros que influenciam no funcionamento da válvula.

Dentre os modelos de porta-sedes avaliados, o conjunto que apresentou a menor perda conforme o método da função da perda quadrática multivariada é o modelo da válvula A. Esta válvula se encontra mais próxima de ter um desempenho ótimo de vedação entre a sede e a esfera de acordo com os limites de especificação adotados.

Referências Bibliográficas

- ARANHA, G. Y. R.; SOUZA, R. M. Elemento finito de barra para análise geométrica não-linear estática e dinâmica através da formulação co-rotacional. Mendoza, Argentina: XXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural, Universidad Nacional de Cuyo, 2004.
- ASSAN, Aloísio E. Método dos Elementos Finitos: primeiros passos. Campinas: Editora da UNICAMP, 1999.
- CAMP, R. C. Benchmarking: The search for the industry best practice that lead to superior performance. Milwaukee: ASQC Quality Press, 1989.
- CATEN, C. S.; RIBEIRO, J. L. Etapas na Otimização Experimental de Produtos e Processos: Discussão e Estudo de Caso. Revista Produção, Belo Horizonte, vol. 6, n. 1, p. 45-64, 1996.
- COOK, R. D. et al. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, 2002.
- CROSBY, Phillip. Quality is free: The art of Making Quality Certain. New York: Mentor, 1979.
- DEMING, William E. Qualidade: A revolução da administração. Rio de Janeiro: Marques-Saraiva, 1986.
- ELMUTI, D.; KATHAWALA, Y. An Overview of Benchmarking Process: a Tool for Continuous Improvement and Competitive Advantage, Benchmarking for Quality Management & Technology. vol.4, no.4, 1997.
- EXAME.COM. Contra crise, Mercosul aumenta proteção da indústria, 2011. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/mundo/noticias/contra-crise-mercosul-aumenta-protecao-da-industria?page=2&slug_name=contra-crise-mercosul-aumenta-protecao-da-industria>. Acesso em 20 de dezembro, 2011.
- GARVIN, David. Competing on the eight dimensions of quality. Harvard Business Review, 1987.
- IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). Exportações - O avanço das commodities, 2011. Disponível em: <http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2513:catid=28&Itemid=23>. Acesso em 20 de dezembro, 2011.
- MATHIAS, A. C. Válvulas: Industriais, Segurança e Controle: Tipos, Seleção e Dimensionamento. São Paulo: Artliber Editora, 2008.
- MELO, A. M.; CARPINETTI, L. C. R.; SILVA, W. T. S. Utilização de Benchmarking por Empresas Brasileiras. São Paulo: ENEGEP, 2000.
- PEREIRA, H. J., DONDONI, P. C., DETONI, T. L. Gestão do conhecimento e prevenção a acidentes ambientais: estudo sobre as práticas de aprendizagem organizacional em empresa do setor de petróleo. Produto&Produção, Porto Alegre, vol. 9, n. 1, p. 14-40, fev. 2008.
- RIBEIRO, J. L.; CATEN, C. S. Projeto de Experimentos. Porto Alegre, 2011. (Apostila)
- SILVA, C. E. et al. O Benchmarking no Desenvolvimento de Novos Produtos. Curitiba: ENEGEP, 2002.
- SILVA, C. T.; FRIZZO, M.; GODOY, L. P. O Benchmarking e a Gestão Comparativa do Programa Gaúcho de Qualidade e Produtividade. Santa Maria: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UFSM, 1997.
- SKOUSEN, P. L. Valve Handbook. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2004.
- SMITH, P.; ZAPPE, R. W. Valve Selection Handbook. Oxford: Elsevier, 2004.
- SORIANO, Humberto L. Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas. São Paulo: Editora Edusp, 2003.

TAGUCHI, Genichi. Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes. Tóquio: Asian Productivity Organization, 1986.

TORMENE BRASIL AMERICANA. Catálogo de Válvulas de Esfera, 2006. Disponível em: <<http://www.tormenebrasil.com.br>>. Acesso em 2 de março, 2012.