

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Fernando Biasibetti**

**OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE VÁLVULA UTILIZANDO OS  
CONCEITOS DE PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Porto Alegre  
2013

**Fernando Biasibetti**

**Otimização de Projeto de Válvula Utilizando os Conceitos de Projeto de Experimentos**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração de Sistemas da Qualidade.

Orientador: José Luis Duarte Ribeiro

Porto Alegre  
2013

**Fernando Biasibetti**

**Otimização de Projeto de Válvula Utilizando os Conceitos de Projeto de Experimentos**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.  
Orientador PPGEP/UFRGS

---

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.  
Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Prof. Márcia Echeveste, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez, Dr. (DEMEC/UFRGS)

Prof. Giovana Savitri Pasa, Dr. (DEPROT/UFRGS)

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo da Vinci

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Volmar e Margit, minha irmã Helena e minha namorada Laura que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao professor e orientador José Luis Duarte Ribeiro por seu apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão desta dissertação.

Aos colegas de trabalho Luciano Valcarenghi, Fernando Minuscoli, Diego Rossetto, Leonardo Beck e Vinicius Deon que me apoiaram ao longo deste estudo, e ao colega Mauro Costa pelos ensinamentos e pelo incentivo na realização deste trabalho.

## RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo desenvolvido com o intuito de consolidar uma metodologia para a otimização de projeto de porta-sedes de uma válvula de esfera *trunnion*. Este trabalho está dividido em dois artigos. Primeiramente, é apresentado um estudo comparativo entre diferentes modelos de porta-sedes, realizado com o apoio do método dos elementos finitos (FEA). O porta-sede de melhor desempenho foi determinado utilizando a Função de Perda Quadrática Multivariada. O objetivo principal deste primeiro artigo é identificar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede, que possam garantir o desempenho funcional da válvula e correspondente atendimento dos requisitos de qualidade. O segundo artigo descreve uma aplicação da metodologia de Projeto de Experimentos (DOE), conduzida com o intuito de identificar a configuração geométrica da válvula que conduza a condição ótima de funcionamento, fornecendo, desta forma, subsídio para a área de Desenvolvimento de Produtos na elaboração de válvulas mais robustas. Uma das principais contribuições deste trabalho é a constatação que os quatro fatores controláveis incluídos no estudo exercem efeito significativos sobre as variáveis de resposta utilizadas (pressão de contato e força de reação). Excetuando-se o fator “pressão de operação da válvula”, que caracteriza a condição operação, mas não é um parâmetro de projeto, o fator que revelou efeito mais pronunciado sobre as variáveis resposta foi a “área da pista de vedação”.

Palavras chave: Qualidade, Função de Perda, Projeto de Experimentos, Elementos Finitos, Válvula de Esfera *Trunnion*

## **ABSTRACT**

This thesis presents a study conducted in order to consolidate a methodology for seat-retainer design optimization of a trunnion ball valve. This work is divided in two papers. Initially a comparative study between different seat-retainer models, developed with the support of the finite element analysis (FEA), is presented. The best performance seat-retainer was determined using the Multivariate Quadratic Loss Function. The main purpose of this first article is to identify the main parameters of the seat-retainer geometry, which could ensure the functional performance of the valve and corresponding quality requirements. The second paper describes an application of Design of Experiments (DOE) methodology, conducted in order to identify the geometric configuration of the valve that leads to the optimal operating condition, providing thereby, contribution to the Product Development area in designing more robust valves. The main contribution of this work is the finding that the four control factors included in the study exert significant effect on the response variables used (contact pressure and reaction force). Except for the factor "valve operating pressure" that characterizes the operation condition, but is not a design parameter, the factor that showed more pronounced effect on the response variables was the "seat sealing area".

**Keywords:** Quality, Loss Function, Design of Experiments, Finite Element Analysis, Trunnion Ball Valve

## LISTA DE SÍMBOLOS

DOE	Projeto de Experimentos
DP	Diferencial de Pressão
FEA	Análise por Elementos Finitos
IR	Importância Relativa
k	Importância da Variável de Resposta Y
LEI	Limite de especificação inferior
LES	Limite de especificação superior
PMT	Pressão Máxima de Trabalho
SQT	Soma quadrática total
T1	Valores Alvos na condição de baixa pressão
T2	Valores Alvos na condição de alta pressão
VA	Valor Alvo
VR	Variável Resposta
X1	Fator área da pista de vedação
X2	Fator área do diferencial de pressão
X3	Fator força das molas
X4	Fator pressão de operação
Y <sub>1</sub>	Pressão de contato em baixa pressão de operação
Y <sub>2</sub>	Força de reação em baixa pressão de operação
Y <sub>3</sub>	Pressão de contato em baixa alta de operação
Y <sub>4</sub>	Força de reação em alta pressão de operação
<i>y<sub>ijk</sub></i>	Valores individuais das variáveis de resposta

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Comentários Iniciais.....	11
1.2	Tema e Objetivos .....	11
1.3	Justificativa .....	12
1.4	Método .....	13
1.4.1	Caracterização do tipo de pesquisa.....	13
1.4.2	Método de trabalho .....	14
1.5	Delimitações do Trabalho .....	15
1.6	Estrutura do Trabalho.....	16
2	PRIMEIRO ARTIGO.....	17
2.1	Introdução .....	18
2.2	Referencial Teórico.....	20
2.2.1	Benchmarking.....	20
2.2.2	Válvulas de Esfera .....	21
2.2.3	Método dos Elementos Finitos .....	24
2.2.4	Função de Perda Multivariada .....	26
2.3	Metodologia .....	27
2.4	Resultados e discussão .....	29
2.4.1	Definição dos modelos de porta-sede a serem estudados .....	29
2.4.2	Levantamento das características geométricas do componente.....	29
2.4.3	Planejamento do estudo comparativo .....	30
2.4.4	Preparação das simulações de FEA .....	30
2.4.5	Realização do estudo no ambiente de FEA .....	31
2.4.6	Análise dos resultados .....	32
2.4.7	Validação dos resultados junto a especialistas .....	35
2.5	Conclusões .....	36

Referências Bibliográficas .....	36
3 SEGUNDO ARTIGO .....	39
3.1 Introdução .....	40
3.2 Referencial Teórico .....	42
3.2.1 Projeto de Experimentos .....	42
3.2.2 Projetos Fatoriais do tipo $2^k$ .....	42
3.2.3 Válvulas de Esfera .....	44
3.2.4 Método dos Elementos Finitos .....	46
3.3 Metodologia .....	48
3.4 Resultados e discussão .....	50
3.4.1 Definição das variáveis de resposta de interesse .....	50
3.4.2 Definição dos fatores controláveis e fatores de ruído .....	50
3.4.3 Planejamento do experimento .....	51
3.4.4 Preparação das simulações de FEA .....	52
3.4.5 Realização do experimento .....	52
3.4.6 Análise dos resultados .....	53
3.4.7 Validação dos resultados .....	58
3.5 Conclusões .....	59
Referências Bibliográficas .....	59
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61
4.1 Conclusões .....	61
4.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	62
REFERÊNCIAS .....	63

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Comentários Iniciais

No contexto de competitividade em que a indústria brasileira está inserida, torna-se essencial que os produtos atinjam os níveis de qualidade demandados pelo mercado. Para isto, os engenheiros de produto necessitam utilizar métodos eficazes para o desenvolvimento e otimização dos produtos.

A Qualidade pode ser avaliada considerando as perdas impostas à sociedade a partir do momento em que o produto é liberado para a venda. Seguindo essa linha de raciocínio, no momento em que o produto é colocado à disposição do consumidor, alterações nas suas características funcionais ou físicas podem afetar a sua qualidade e gerar prejuízos maiores às empresas do que o próprio custo de fabricação. Quanto menor for esta perda, mais desejável é o produto para a sociedade (TAGUCHI et al., 1990).

Phadked (1989) já afirmava que estas perdas ocorrem porque a qualidade do produto é vista por perspectivas diferentes por projetistas e consumidores. Os consumidores, muitas vezes, não observam as restrições de uso do produto (especificada pelos projetistas), mas demonstram insatisfação com as falhas ou a falta de segurança no momento do uso.

A utilização do planejamento de experimentos pode contribuir com o desenvolvimento industrial através da otimização das variáveis de interesse. Isso pode ser obtido identificando os fatores que influenciam as variáveis de interesse e, eventualmente, explorando suas interações e minimizando os efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou produto visando diminuir as perdas para a sociedade (BONDUELLE, 1994).

## 1.2 Tema e Objetivos

O tema desta dissertação é uma otimização de projeto de uma válvula de esfera *trunnion*. A otimização deste projeto envolve um comparativo entre geometrias de diferentes porta-sedes de válvulas industriais e são avaliados os seus desempenhos através do cálculo da Função de Perda Quadrática Multivariada. Esta dissertação também aborda o uso da metodologia de Projeto de Experimentos (DOE) e análises pelo método dos Elementos Finitos (FEA). A integração destas diferentes ferramentas permite desenvolver um trabalho mais completo, aproveitando as vantagens que cada metodologia possui no processo de desenvolvimento de novos produtos.

Esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para a otimização de projetos de válvulas industriais visando à obtenção de maior robustez do produto. Considerando o cenário da empresa fabricante de válvulas, onde este estudo foi desenvolvido, entre os objetivos secundários, podem ser citados:

- Dentre os diferentes projetos de porta-sedes avaliados, determinar qual geometria que melhor atende aos requisitos de qualidade;
- Determinar através do comparativo e discussões entre a equipe de Engenharia os valores alvo e os limites de especificação inferior e superior das variáveis de resposta;
- Verificar quais fatores controláveis possuem maior efeito sobre o desempenho da vedação da válvula.

### 1.3 Justificativa

A principal justificativa para o tema principal proposto se deve ao fato da metodologia de Projeto de Experimentos permitir o estudo simultâneo de múltiplos fatores, melhorando o desempenho dos produtos, considerando as variações inerentes que ocorrem em escala de manufatura. O uso consistente desta metodologia produz simultaneamente qualidade, confiabilidade e durabilidade superior, além de redução de custo e aumento do *know-how* tecnológico.

A aplicação de Projeto de Experimentos fornece muita informação e os resultados são confiáveis. Uma das vantagens do uso desta metodologia é que o efeito dos fatores não controláveis (erro experimental) é minimizado e quantificado. Outra vantagem é a redução, em geral considerável, do trabalho experimental (RIBEIRO; CATEN, 2011).

A justificativa prática para o tema proposto está apoiada na necessidade da empresa em fabricar produtos mais baratos e mais robustos. No processo de fabricação de alguns modelos de válvulas de esfera da empresa em estudo, existe um custo estimado em R\$ 21.000.000 anuais devido ao retrabalho que o produto sofre na linha de montagem e uma parcela deste retrabalho é devido à falta de robustez dos produtos em seus projetos. Através de um estudo experimental, pretende-se aumentar a robustez das válvulas otimizando parâmetros de projeto, tornando assim o produto menos suscetível a fatores que não podem ser devidamente controlados.

A justificativa acadêmica dos objetivos é que atualmente não existem muitos estudos publicados que utilizem os conceitos de Projeto de Experimentos na área de válvulas

industriais. Assim, uma das contribuições deste trabalho é fornecer subsídio como fonte de pesquisa para futuros estudos na área.

A justificativa profissional dos objetivos é que, mesmo considerando a ampla experiência que a empresa em estudo possui na fabricação de válvulas, ainda existe margem para a melhoria destes produtos, de forma que estes possam ser mais robustos às variações inerentes ao processo produtivo e às condições de operação e, simultaneamente, apresentem custo de fabricação menor.

## **1.4 Método**

O método de pesquisa é apresentado seguindo dois aspectos: caracterização do tipo de pesquisa e descrição do método de trabalho, onde são abordadas as etapas, técnicas e ferramentas utilizadas. Uma vez que o trabalho está organizado em dois artigos, cada artigo possui seu próprio método de pesquisa. Porém, cada artigo contempla algumas etapas da caracterização do tipo de pesquisa estabelecido para o conjunto desta dissertação.

### **1.4.1 Caracterização do tipo de pesquisa**

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 projeto de experimentos e análises de 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. Busca-se construir um modelo que indique o ajuste dos parâmetros de válvula que conduzam a um projeto de produto robusto. 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.

### 1.4.2 Método de trabalho

Os métodos de trabalho de ambos os artigos estão descritos separadamente de forma resumida neste capítulo. A seguir é descrito o método utilizado no desenvolvimento do trabalho apresentado no primeiro artigo, que aborda o comparativo entre diferentes modelos de porta-sede:

- (i) Definição dos modelos de porta-sede a serem estudados no *benchmarking*: Foram considerados três modelos de porta-sedes neste trabalho.
- (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;
- (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 14.1*. Tanto os modelos de CAD como a preparação das simulações foram realizadas em um computador da área de engenharia;
- (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;
- (vii) Validação dos resultados obtidos junto a especialistas: Os resultados devem ser validados através de uma reunião com especialistas da indústria de válvulas industriais.

A seguir é descrito o método utilizado no trabalho que caracteriza o segundo artigo apresentado nesta dissertação, que trata de uma otimização de projeto de porta-sede via FEA e Projeto de Experimentos:

- (i) Definição das variáveis de resposta de interesse: Os aspectos do produto que podem ser medidos e que permitem quantificar as demandas de qualidade foram definidos através de discussão entre a equipe de Engenharia da empresa em questão durante a realização de um estudo comparativo de porta-sedes que antecede este presente artigo;
- (ii) Definição dos fatores controláveis e fatores de ruído: A definição de tais fatores foi realizada pela equipe de Engenharia;
- (iii)Planejamento do experimento: O estudo deve contemplar os parâmetros de produto e fatores de ruído relevantes e os respectivos intervalos de variação;
- (iv)Preparação das simulações de FEA: Além da preparação dos modelos de CAD que foram elaborados variando seus parâmetros geométricos, foram colhidas informações sobre alguns atributos das válvulas que são necessários para a realização das análises;
- (v) Realização do experimento no ambiente de FEA: A elaboração dos modelos de CAD foi realizada através do software Inventor 2010 e as simulações foram realizadas no Ansys 14.1. Tanto os modelos de CAD como a preparação das simulações foram realizadas em um computador da área de engenharia;
- (vi)Análise dos resultados: Os seguintes resultados foram considerados: 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.

## **1.5 Delimitações do Trabalho**

Mesmo sendo importante no processo de desenvolvimento de novos produtos, no presente trabalho não foram fabricados protótipos, pois esta ação poderia inviabilizar a análise deste produto devido ao elevado tempo e custo que demandariam os testes. Assim, o estudo foi feito utilizando o método de Elementos Finitos, que tem apresentado bons resultados nos estudos de válvulas industriais.

Também não é o foco do trabalho fabricar uma válvula utilizando os parâmetros obtidos através dos experimentos, visto que não haveria tempo hábil para que esta ação pudesse ser realizada. O foco do trabalho é estabelecer parâmetros para garantir que o projeto da válvula resulte na fabricação de um produto robusto.

Outra delimitação relevante, é que não serão consideradas em detalhe as limitações presentes no processo de fabricação da válvula em questão.

O estudo contempla apenas a otimização da válvula de esfera *trunnion* bitola 8” (DN 200) classe de pressão 600, podendo futuramente fomentar estudos realizados com outras válvulas similares.

Os detalhes da metodologia de análise do desempenho do produto (FEA – *Finite Element Analysis*) serão abordados de maneira superficial, pois não é o foco deste estudo.

## **1.6 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está organizado em quatro capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema. Este capítulo também apresenta os objetivos, o método de trabalho, a estrutura e as limitações do estudo.

O segundo capítulo apresenta um artigo contendo um estudo que descreve um comparativo entre modelos de porta-sedes de válvulas de esfera *trunnion*. Neste comparativo serão apresentadas as maiores diferenças construtivas dos componentes contemplando análises pelo método dos Elementos Finitos para verificar a funcionalidade dos mesmos. Este estudo irá fornecer subsídio para uma posterior otimização dos projetos de válvulas *trunnion* da empresa em questão.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo que compõe esta dissertação. Neste artigo, é apresentada a configuração geométrica da válvula considerando a condição ótima de funcionamento, fornecendo desta forma, subsídio para a área de Desenvolvimento de Produtos na elaboração de válvulas mais robustas, que sigam os parâmetros obtidos através deste estudo.

O quarto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido, esclarecendo as limitações da pesquisa. Neste capítulo também são propostas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

## 2 PRIMEIRO ARTIGO

### ESTUDO COMPARATIVO DE PORTA-SEDES DE VÁLVULAS INDUSTRIAIS VISANDO À OTIMIZAÇÃO DE PROJETO

Fernando Biasibetti ([fernando.biasibetti@gmail.com](mailto:fernando.biasibetti@gmail.com))

José Luis Duarte Ribeiro ([ribeiro@producao.ufrgs.br](mailto:ribeiro@producao.ufrgs.br))

**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.

**Abstract:** This paper presents a comparative study of seat-retainers of trunnion ball valves of different manufacturers. The study was conducted aiming optimization of the design methodologies using Finite Element Analysis (FEA) and Multivariate Quadratic Loss Function. The main objective of this article is to identify the main parameters of the geometry of a seat-retainer that ensure quality and functional performance of the corresponding valve. This study could be used as a support for execution on the optimization projects trunnion ball valves in the company in question. The study revealed that, among the seat-retainer models evaluated, the assembly that resulted the lesser loss, considering the results of Multivariate Quadratic Loss Function, is the A model of valve. This valve is closer to the optimal performance of sealing between the seat and the ball, considering the specification limits adopted.

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

## 2.1 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 *marketshare* (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 *marketshare* 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. O porta-sede é um componente responsável em obter a vedação da válvula de esfera *trunnion*. 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.

## 2.2 Referencial Teórico

### 2.2.1 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.

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).

### **2.2.2 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 ser 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  $0^\circ$  a  $90^\circ$  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 de esfera mancalizada (tipo *trunnion*) estão equipadas com duas sedes autoativantes, 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 bidirecional. Na Figura 1 é ilustrada uma válvula de esfera *trunnion* em uma vista em corte.

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).

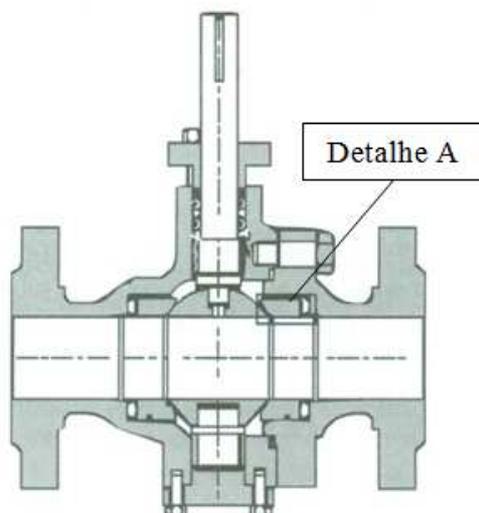


Figura 1 – Válvula de esfera do tipo *trunnion* (MATHIAS, 2008)

Nas válvulas de pressões maiores os porta-sedes, que são componentes metálicos responsáveis por reter a sede, 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).

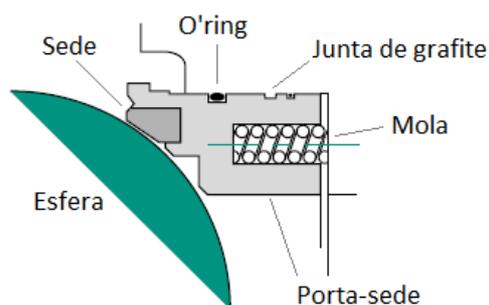


Figura 2 – Detalhe A: Sistema de vedação para válvulas do tipo *trunnion*

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).

### 2.2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos 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.

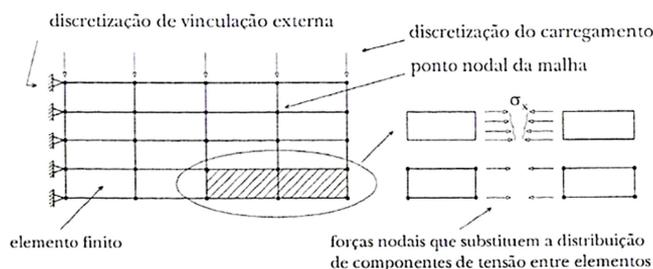


Figura 3 – Discretização dos elementos (SORIANO, 2003)

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.

$$P(D) = P^{ext} \quad \text{Equação 1}$$

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:

$$K(D) = \frac{\partial P(D)}{\partial D} \quad \text{Equação 2}$$

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

## 2.2.4 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.

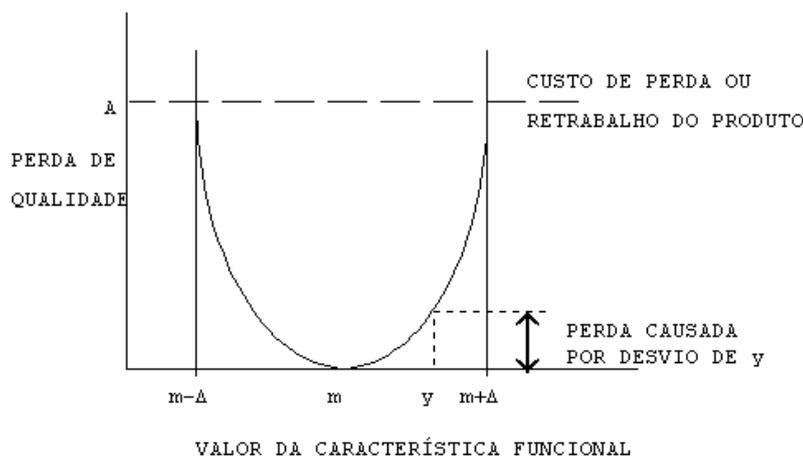


Figura 4 – Gráfico da função de perda (RIBEIRO E CATEN, 2011)

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 impõem 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:

a) 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;

b) 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.

### 2.3 Metodologia

O presente artigo foi realizado em uma empresa fabricante de válvulas de esfera *trunnion* no mercado nacional. A empresa de capital 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 14.1*. 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.

## 2.4 Resultados e discussão

### 2.4.1 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” (DN 200) 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.

### 2.4.2 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.

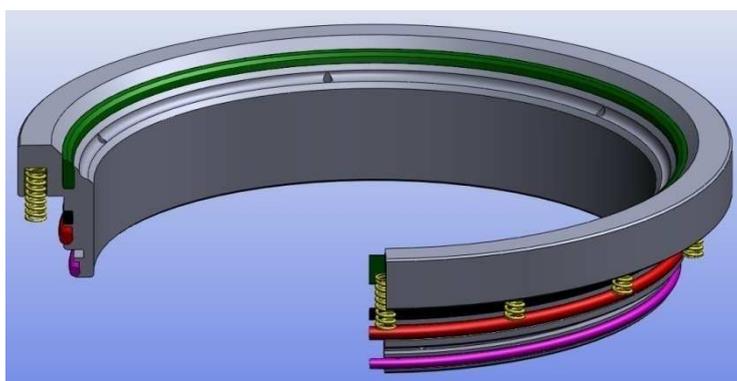


Figura 5 – Exemplo de modelo em CAD 3D utilizado no estudo

### 2.4.3 Planejamento do estudo comparativo

As seguintes características geométricas foram parametrizadas neste comparativo:

- Área da pista de vedação;
- Área do efeito de pistão [ $((\text{Diâmetro externo do o'ring})^2 - (\text{Diâmetro interno da pista de vedação})^2) * \pi / 4$ ];
- 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.

### 2.4.4 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.

### 2.4.5 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 0,6 MPa 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 11,23 MPa.

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 Ra, 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  $0,2\mu\text{m}$ ;

- (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.

#### 2.4.6 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.

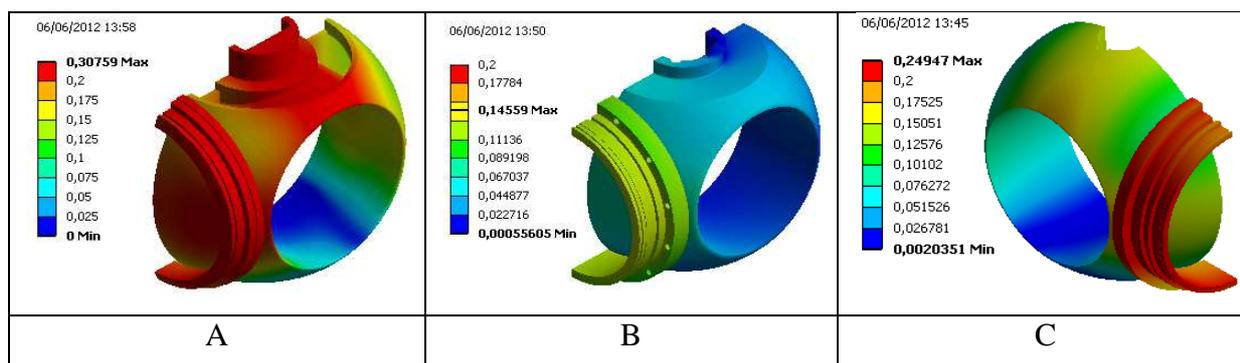


Figura 6 – Deformação total nos conjuntos porta-sede/esfera em mm

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 0,6 MPa, reproduzindo assim o teste de baixa pressão que é realizado nas válvulas após a montagem do conjunto.

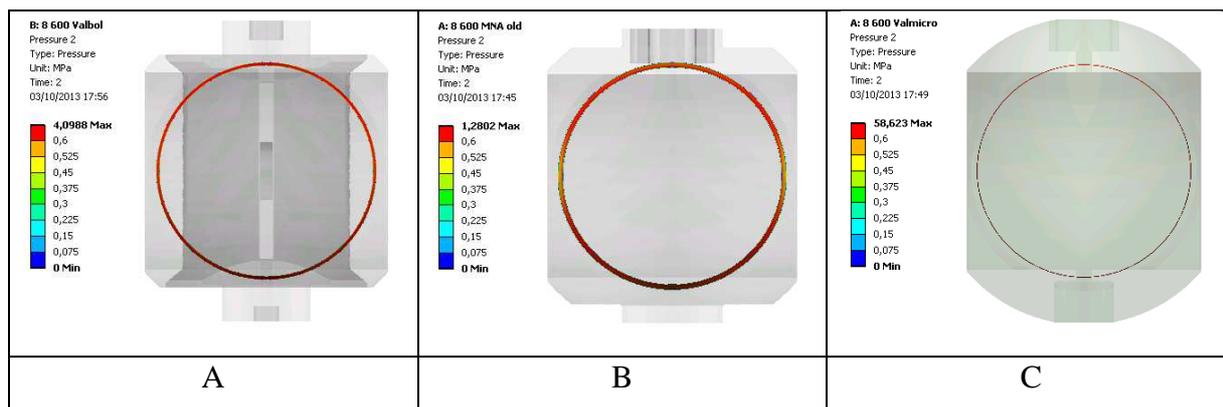


Figura 7 – Pressão de contato na condição de teste de baixa pressão

Através dos resultados da Figura 7 é possível identificar através da cor amarela na pista de vedação 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.

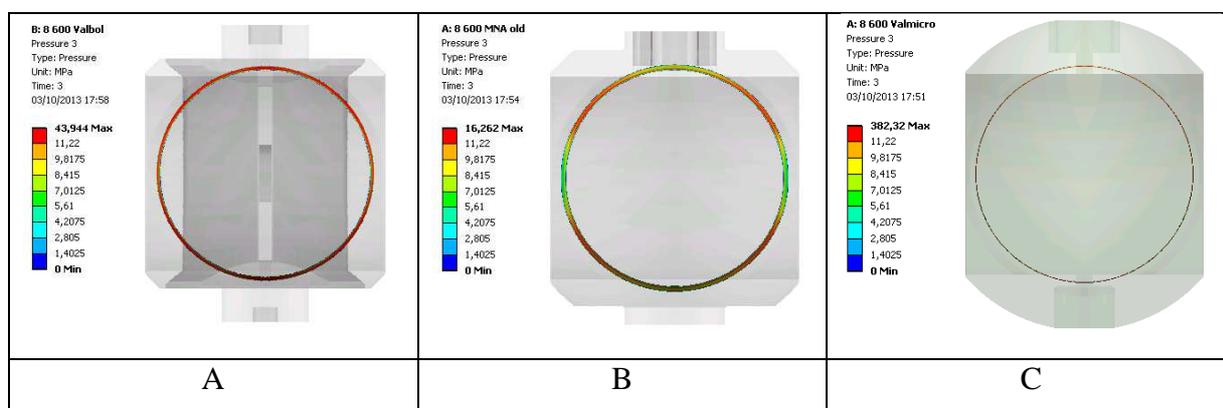


Figura 8 – Pressão de contato na condição de teste de vedação

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 conforme ilustrado pela cor verde. 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.

$$\text{Se } Y_1 \text{ for menor que o alvo} \quad [(Y_1 - \text{Alvo}_1)/(\text{Alvo}_1 - \text{LEI}_1)]^2 \quad \text{Equação 3}$$

$$\text{Se } Y_1 \text{ for maior que o alvo} \quad [(Y_1 - \text{Alvo}_1)/(\text{Alvo}_1 - \text{LES}_1)]^2 \quad \text{Equação 4}$$

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

$$\text{Perda} = k_2 \cdot \frac{(Y_2 - A_2)^2}{SIE_2^2} \quad \text{Equação 5}$$

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. Os valores foram retirados ao longo da região de contato entre a sede e esfera. Em seguida são descritos os resultados de forma resumida da função de perda quadrática multivariada para cada válvula analisada.

$$Perda_A = \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_1 - 1,8}{1,8 - 151} \right)^2 \right] + 15 \cdot 1 \cdot \frac{(26890 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_3 - 16,83}{16,83 - 151} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 6}$$

$$+ 15 \cdot 1 \cdot \frac{(467460 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 4,4$$

$$Perda_B = \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_1 - 1,8}{1,8 - 0,78} \right)^2 \right] + 15 \cdot 1 \cdot \frac{(27000 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_3 - 16,83}{16,83 - 14,59} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 7}$$

$$+ 15 \cdot 1 \cdot \frac{(448440 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 101,8$$

$$Perda_C = \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_1 - 1,8}{1,8 - 151} \right)^2 \right] + 15 \cdot 1 \cdot \frac{(34420 - 30000)^2}{(35000 - 25000)^2} + \sum_1^{15} \left[ \left( \frac{Y_3 - 16,83}{16,83 - 151} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 8}$$

$$+ 15 \cdot 1 \cdot \frac{(463140 - 450000)^2}{(470000 - 430000)^2} = 40,7$$

O primeiro termo das equações acima é referente à perda gerada pelos quinze pontos de pressão de contato ( $Y_1$ ) considerando uma condição de operação de baixa pressão. O segundo termo é a perda gerada pela força de reação na mesma condição de baixa pressão. O terceiro termo é referente à perda gerada pelos quinze pontos de pressão de contato ( $Y_3$ ) considerando uma condição de operação de alta pressão, já o quarto termo das equações é a perda gerada pela força de reação na mesma condição de alta pressão.

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. Consequentemente 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.

#### 2.4.7 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 16 anos de experiência trabalhando com válvulas industriais, o Gerente de Engenharia e o Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento que possuem 8 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.

## 2.5 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" (DN 200) 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 *trunnion* na empresa em questão através da metodologia de Projeto Robusto que será abordada na sequência 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](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](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.

### 3 SEGUNDO ARTIGO

#### OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE VÁLVULA DE ESFERA TRUNNION UTILIZANDO FEA E PROJETO DE EXPERIMENTOS

Fernando Biasibetti ([fernando.biasibetti@gmail.com](mailto:fernando.biasibetti@gmail.com))

José Luis Duarte Ribeiro ([ribeiro@producao.ufrgs.br](mailto:ribeiro@producao.ufrgs.br))

**Resumo:** Este artigo apresenta uma metodologia de otimização de projeto de uma válvula de esfera *trunnion* utilizando os conceitos de Projeto de Experimentos (DOE) utilizando análises por Elementos Finitos (FEA) como ferramenta para a realização dos experimentos. O principal objetivo deste artigo é estudar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam o desempenho funcional da válvula. O intuito é identificar a configuração geométrica da válvula que conduza a condição ótima de funcionamento, fornecendo, desta forma, subsídio para a área de Desenvolvimento de Produtos na elaboração de válvulas mais robustas. A principal contribuição deste trabalho é que os quatro fatores controláveis incluídos no estudo se mostraram significativos em função das variáveis de resposta utilizadas. Observou-se que desconsiderando o fator referente à pressão de operação da válvula que não é um parâmetro de projeto (Fator X4), o fator que se mostrou mais significativo foi o fator da área da pista de vedação (Fator X1).

**Abstract:** This paper presents a methodology for design optimization of a trunnion ball valve using the concepts of Design of Experiments (DOE) using Finite Element Analysis (FEA) as a tool for the experiments. The main objective of this paper is to study the main parameters of the geometry of a seat-retainer to ensure the functional performance of the valve. The aim is to identify the geometric configuration of the valve that leads to the optimal operating condition, providing consequently support for the Product Development area in developing more robust valves. The main contribution of this paper is that the four controllable factors included in the study showed significant depending on the response variables used. Disregarding the factor relating to the operating pressure of the valve that is not a design parameter (Factor X4), the factor that proved to be the most significant was the sealing area (Factor X1).

**Palavras chave:** Qualidade, Projeto de Experimentos, Elementos Finitos, Válvula de Esfera *Trunnion*.

### 3.1 Introdução

A importância da qualidade em qualquer ramo de atividade não deve ser vista como um simples diferencial, mas sim como uma das formas de se manter competitivo, buscando novas maneiras de melhorias na cadeia produtiva, a satisfação do cliente e, conseqüentemente, um aumento no lucro da organização. Diante de um mundo globalizado, onde as barreiras socioeconômicas estão diminuindo, os clientes buscam produtos e serviços com qualidade superior, e as empresas têm que se adequar a este cenário eliminando atividades que não agregam valor, oferecendo produtos com a qualidade esperada e preço reduzido (SILVA et al., 2006).

Neste contexto de competitividade que as empresas estão inseridas, a qualidade é um elemento importante, sendo conceituada como conformidade com as especificações (CROSBY, 1979) ou, de forma mais completa, como a melhoria da conformidade com as especificações por meio da redução da incerteza e variabilidade (DEMING, 1986).

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 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 metodologia de Projeto de Experimentos é utilizada na otimização de um sistema. Entende-se por sistema, qualquer produto, processo ou serviço. Um sistema é avaliado por indicadores de desempenho, ou seja, características de qualidade resultantes da operação do mesmo. Por exemplo, as características de qualidade avaliadas em um sistema podem ser produtividade, custos, características dimensionais, entre outras. Em um sistema, existem parâmetros que podem ser alterados durante sua execução. Por exemplo, em um produto pode-se alterar o tipo de material e suas características dimensionais. A alteração destes

parâmetros pode afetar as características de qualidade resultantes do sistema (RIBEIRO E TEN CATEN, 2011).

Este artigo aborda válvulas industriais, mais especificamente, válvulas de esfera *trunnion*. Observa-se que, mesmo as maiores fabricantes de válvulas industriais do Brasil possuem dificuldade em garantir a qualidade do produto desde a área de projeto, sem que haja retrabalhos no processo de fabricação. Devido à complexidade de projetar e fabricar uma válvula de esfera *trunnion*, é normal que ocorram alguns desvios no processo de fabricação. Se o projeto da válvula não for 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 a descrição anterior, o principal objetivo deste artigo é estudar os principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam o desempenho funcional da válvula. O porta-sede é um componente responsável em obter a vedação da válvula de esfera *trunnion*. O intuito é identificar a configuração geométrica da válvula que conduza a condição ótima de funcionamento, fornecendo, desta forma, subsídio para a área de Desenvolvimento de Produtos na elaboração de válvulas mais robustas. Este artigo é embasado em uma investigação anterior que foi realizada em uma válvula de esfera *trunnion* bitola 8" (DN 200) classe de pressão 600 com o intuito de identificar os principais parâmetros que influenciam no funcionamento dos porta-sedes através de um estudo comparativo.

A metodologia de projeto de experimentos utilizada no trabalho apresentado neste artigo é importante, porque está apoiada 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 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.

## **3.2 Referencial Teórico**

### **3.2.1 Projeto de Experimentos**

Nos processos de fabricação industriais, geralmente existem vários fatores e níveis de ajuste que influenciam as características de qualidade dos produtos. Assim, um problema comum encontrado pelas empresas ao realizar experimentos é a necessidade de estudar, simultaneamente, o efeito desses fatores que podem ser ajustados a diferentes níveis. Neste caso, observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso pode tornar os experimentos industriais difíceis de serem realizados, porque os custos e tempo de execução são elevados (GALDÁMEZ, 2002).

Segundo Ribeiro e ten Caten (2011), a metodologia conhecida como Projeto de Experimentos (DOE) é apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a sequência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador. A eficiência de experimentos projetados é superior em termos de informação a qualquer outra sequência não estruturada de ensaios.

Segundo Montgomery (2001), um experimento pode ser visto como uma série de testes, nos quais mudanças propostas são aplicadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, para então se observar e identificar as mudanças ocorridas nas variáveis de saída.

Alguns termos são comumente utilizados em Projeto de Experimentos. O fator é definido como uma variável experimental controlável, cuja alteração influencia a variável de resposta. Cada fator deve assumir alguns valores, definidos como níveis. As mudanças decorridas na média dos valores da variável de resposta correspondem aos efeitos. Além dos efeitos causados pelos fatores, podem-se determinar os efeitos gerados pelas interações dos fatores. Estas interações correspondem a efeitos combinados, onde o efeito de um certo fator depende dos níveis de outros fatores (MASON ET AL., 2003).

### **3.2.2 Projetos Fatoriais do tipo $2^k$**

São projetos que envolvem K fatores, cada um deles a apenas dois níveis: alto ou baixo. Os níveis podem ser discretos ou contínuos. Exemplos de fatores a níveis discretos seriam máquinas, operadores e turnos, e exemplos de fatores a níveis contínuos seriam

pressão, temperatura e velocidade de avanço. Esse projeto é chamado  $2^k$  porque para rodá-lo (uma repetição completa) são necessárias:  $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  observações. Dentre as vantagens deste tipo de projeto é possível destacar que são simples de serem analisados, especialmente úteis no estágio inicial da pesquisa, quando há muitos fatores a serem investigados e onde outros projetos seriam inviáveis (RIBEIRO E TEN CATEN, 2011).

O efeito de um fator é definido como a mudança que se verifica na resposta quando o nível desse fator é alterado. Assim:

$$A = [(ab + a) - (b + (1))] / (2k-1 \times n)$$

$$B = [(ab + b) - (a + (1))] / (2k-1 \times n)$$

Equação 9

$$AB = [(ab + (1)) - (a + b)] / (2k-1 \times n)$$

As letras minúsculas (1), a, b, ab representam o total de “n” repetições obtido para o correspondente tratamento. Segundo Galdámez (2002), recomenda-se que, para se concluir sobre os efeitos principais e de interação dos fatores, é necessário aplicar técnicas de análise de variância. Inicialmente é necessário calcular as somas quadradas. A soma quadrada total é calculada usando a fórmula a seguir.

$$SQT = \sum y_{ijk}^2 - \frac{TG^2}{N}$$

Equação 10

Onde  $y_{ijk}$  são os valores individuais da variável de resposta,  $TG$  é a soma de todos esses valores e  $N$  é o número total de valores medidos. Em seguida, a  $SQT$  é decomposta nas diversas parcelas de variabilidade, ou seja, efeito dos fatores principais, interações e termo de erro. O efeito dos fatores principais refere-se ao efeito direto que cada fator exerce (ou não) sobre a resposta. Por exemplo, os resultados, ou seja, os valores da variável de resposta podem (ou não) depender do fator Máquinas. As interações referem-se a um efeito cruzado que um fator pode exercer sobre o outro. Por exemplo, o efeito da Velocidade de Avanço poderia depender da Máquina. Na Máquina 1, aumentar a Velocidade de Avanço não provocaria nenhum efeito na Resposta; mas na Máquina 2, um aumento na Velocidade de Avanço poderia produzir um aumento nos defeitos superficiais. Quando existe uma situação desse tipo, dizemos que há uma interação entre os fatores (RIBEIRO E TEN CATEN, 2011).

### 3.2.3 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 ser 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  $0^\circ$  a  $90^\circ$  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 de acionamento 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 bidirecional. Na Figura 1 é ilustrada uma válvula de esfera *trunnion* em uma vista em corte.

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).

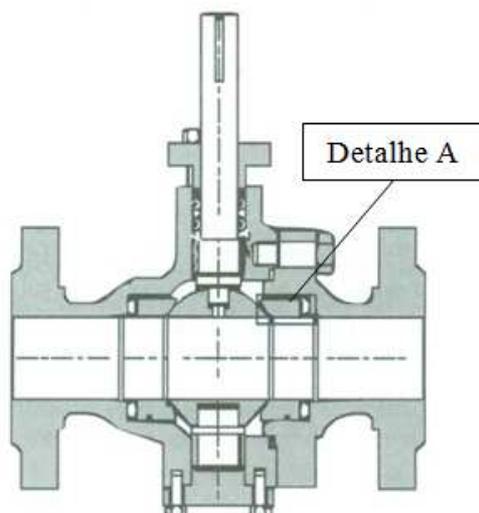


Figura 9 – Válvula de esfera do tipo *trunnion* (MATHIAS, 2008)

Nas válvulas de pressões maiores os porta-sedes, que são componentes metálicos responsáveis por reter a sede, 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).

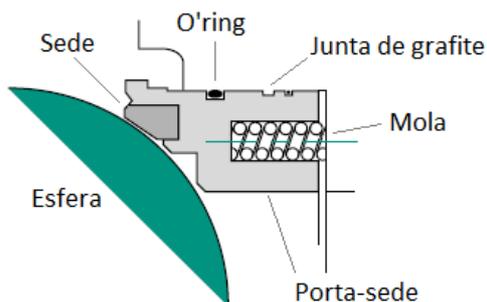


Figura 10 – Detalhe A: Sistema de vedação para válvulas do tipo *trunnion*

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).

### 3.2.4 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos 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.

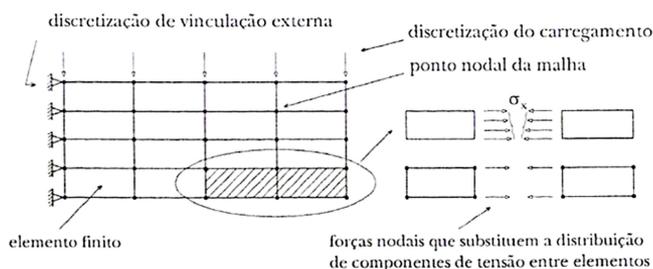


Figura 11 – Discretização dos elementos (SORIANO, 2003)

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.

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

Equação 11

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:

$$K(D) = \frac{\partial P(D)}{\partial D} \quad \text{Equação 12}$$

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

### 3.3 Metodologia

O presente estudo foi realizado em uma empresa fabricante de válvulas de esfera *trunnion* no mercado nacional. A empresa, de capital 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 juntamente com a metodologia de projeto de experimentos que revelem como os principais parâmetros do porta-sede da válvula devem ser ajustados para buscar uma configuração 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 projeto de experimentos e análises de 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. Busca-se construir um modelo que indique o ajuste dos parâmetros de válvula que conduzam a um projeto de produto robusto. 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 deste artigo será feito a partir de sete etapas:

- (i) Definição das variáveis de resposta de interesse: Os aspectos do produto que podem ser medidos e que permitem quantificar as demandas de qualidade foram definidos através de discussão entre a equipe de Engenharia da empresa em questão durante a realização de um estudo comparativo de porta-sedes que antecede este presente artigo;
- (ii) Definição dos fatores controláveis e fatores de ruído: A definição de tais fatores foi realizada pela equipe de Engenharia. Os fatores controláveis são os parâmetros do produto que foram escolhidos para serem estudados a vários níveis no experimento. Os fatores de ruído (não controláveis) são as variáveis que não podem ser controladas pela equipe técnica e são responsáveis pela variabilidade;
- (iii) Planejamento do experimento: O estudo deve contemplar os parâmetros de produto e fatores de ruído relevantes e os respectivos intervalos de variação. Na fase de planejamento final deve ser realizada a matriz experimental, definir a ordem dos ensaios de acordo com a facilidade no ajuste dos fatores e definir os procedimentos da simulação;
- (iv) Preparação das simulações de FEA: Além da preparação dos modelos de CAD que foram elaborados variando seus parâmetros geométricos, foram colhidas informações sobre alguns atributos das válvulas que são necessários para a realização das análises;
- (v) Realização do experimento 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. Os fatores controláveis foram variados tanto em questões geométricas do porta-sede, como em questões relativas às especificações de operação da válvulas;
- (vi) Análise dos resultados: Os seguintes resultados foram considerados: 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. Como parte importante do estudo, deve ser encontrado o ajuste ótimo dos parâmetros do produto, de forma a assegurar uma válvula robusta;

- (vii) Validação dos resultados obtidos junto a especialistas: Os resultados devem ser validados através de uma reunião com especialistas da indústria de válvulas industriais.

### **3.4 Resultados e discussão**

#### **3.4.1 Definição das variáveis de resposta de interesse**

As variáveis de resposta relevantes para este estudo foram definidas através de discussão entre a equipe de Engenharia da empresa durante a realização de um estudo comparativo de porta-sedes realizado anteriormente. Dentre os diversos atributos do produto que poderiam apresentar os resultados mais interessantes considerando as limitações do experimento, foram escolhidos a pressão de contato entre a sede e a esfera e a força de reação dos munhões da esfera. A primeira variável de resposta visa identificar um atributo importantíssimo para o produto em questão (se a válvula obterá vedação) e a segunda variável permite equilibrar o estudo, de forma que a condição ótima de vedação não acabe resultando em um torque de acionamento mais elevado que o valor nominal.

#### **3.4.2 Definição dos fatores controláveis e fatores de ruído**

Os fatores controláveis e os fatores de ruído foram definidos em reunião com a equipe de Engenharia. Os seguintes fatores foram classificados como controláveis: área da pista de vedação, pressão do fluido, área sujeita ao diferencial de pressão, diâmetro médio da pista de vedação, existência de raio ou chanfro na sede, espessura do porta-sede, comprimento do porta-sede, força das molas, folga entre o porta-sede e o corpo, razão entre diâmetros da esfera e rugosidade da esfera. A seguir, a equipe de engenharia identificou os fatores de ruído: esfericidade da esfera, defeito de fabricação do o'ring, posicionamento do porta-sede na esfera, rugosidade da sede, falhas nos materiais e temperatura.

Com o intuito de viabilizar o experimento, foram escolhidos quatro fatores controláveis que mais influenciam nos atributos de qualidade do produto. Esta escolha foi realizada através de uma matriz de priorização, onde cada fator foi pontuado conforme a facilidade no ajuste e a intensidade na relação com cada variável de resposta. Decorrente deste estudo, os seguintes fatores foram selecionados para a realização do experimento: X1: área da

pista de vedação, X2: área sujeita ao diferencial de pressão, X3: força das molas e X4: pressão do fluido.

### 3.4.3 Planejamento do experimento

Na etapa de planejamento foram contemplados os parâmetros do produto relevantes, bem como os fatores de ruído foram mantidos a níveis sem variação na simulação computacional.

A metodologia do projeto de experimentos empregada é a  $2^4$ , resultando desta maneira em 16 experimentos com os quatro fatores controláveis variando a dois níveis. Na Tabela 2 é descrita a matriz experimental utilizada, onde X1 é a área da pista de vedação, X2 é a área sujeita ao diferencial de pressão, X3 é a força das molas e X4 a pressão de operação da válvula.

Tabela 2 – Matriz experimental com os níveis codificados

	Níveis codificados				
	Mínimo	1965,7	3650	1500	0,6
	Máximo	2765,7	4650	2500	11,22
Rodada	X1	X2	X3	X4	
1	-1	-1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	1	
3	-1	-1	1	-1	
4	-1	-1	1	1	
5	-1	1	-1	-1	
6	-1	1	-1	1	
7	-1	1	1	-1	
8	-1	1	1	1	
9	1	-1	-1	-1	
10	1	-1	-1	1	
11	1	-1	1	-1	
12	1	-1	1	1	
13	1	1	-1	-1	
14	1	1	-1	1	
15	1	1	1	-1	
16	1	1	1	1	

A matriz experimental foi definida conforme a ordem de rodadas que aparece na Tabela 1, pois essa ordem facilita a construção dos cenários de simulação computacional.

### 3.4.4 Preparação das simulações de FEA

Os modelos de CAD dos componentes da simulação foram modelados no software Inventor 2010 de forma a reproduzir as variações dos fatores controláveis X1 e X2 (área da pista de vedação e área sujeita ao diferencial de pressão). Na Figura 12 é ilustrado um exemplo de modelo de CAD de todo conjunto que foi utilizado nas simulações.



Figura 12 – Modelo de CAD utilizado em uma das simulações

O material utilizado tanto na esfera como no porta-sede é o ASTM A217 Gr. CA15 e o material da sede foi considerado como TECAPEEK PVX. Na interface da sede com a esfera, foi utilizado um contato não-linear com um coeficiente de atrito de 0,15 e foi necessário um refinamento da malha nesta região de contato.

### 3.4.5 Realização do experimento

Os 16 ensaios exigiram 4 simulações, cruzando os fatores X1: área da pista de vedação e X2: área sujeita ao diferencial de pressão. Os fatores controláveis X3 e X4 (força das molas e pressão do fluido) foram variados nos parâmetros das simulações realizadas no software Ansys 14.1.

A metodologia de simulação adotada visa reproduzir, através de simulações, as condições em que a válvula é testada após a sua fabricação. No intuito de simplificar este estudo, algumas variáveis foram mantidas fixas, pois poderiam 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  $0,2\mu\text{m}$ ;
- (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 ( $22^{\circ}\text{C}$ ), pois não há o interesse em se investigar a influência da mesma neste estudo.

### **3.4.6 Análise dos resultados**

Os resultados dos experimentos foram coletados do software e foram tabelados conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados dos experimentos

	Pressão	Força (N)
	(MPa)	
	Y1	Y2
1	12,63	27976
2	43,09	469620
3	(19,51)	29994
4	49,59	471820
5	13,74	28566
6	<b>59,22</b>	(480700)
7	21,56	(30584)
8	60,32	482680
9	<b>8,88</b>	<b>27656</b>
10	(29,17)	<b>463600</b>
11	13,35	29674
12	30,39	465620
13	9,72	28262
14	34,13	474960
15	13,82	30280
16	34,61	477060

De acordo com estes resultados, é possível verificar uma característica das variáveis de resposta. Os valores em negrito seriam os resultados que mais favoreceriam o funcionamento da válvula, enquanto que os resultados em parêntesis possuem o efeito oposto. Os valores alvo para os respectivos resultados estão descrito na Tabela 6.

Os resultados obtidos no estudo de simulação estão ilustrados nas Figuras 13 e 14.

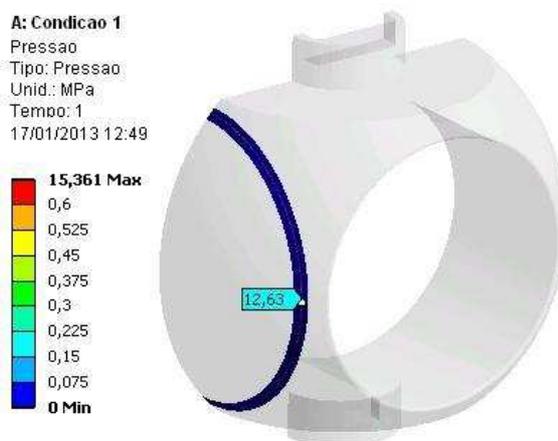


Figura 13 – Pressão de contato (Y1) no experimento 1

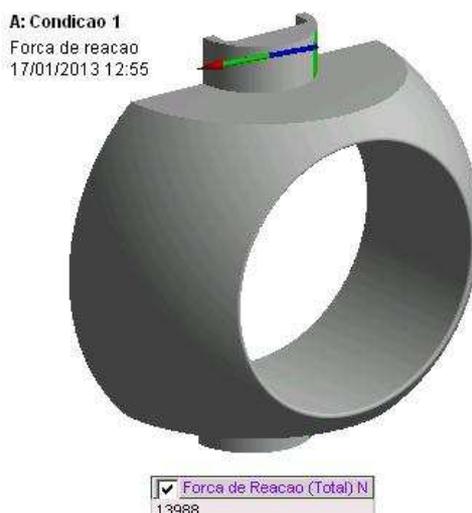


Figura 14 – Força de reação nos munhões (Y2) no experimento 1

Para a pressão de contato foi considerado o valor na região com a menor pressão de contato do conjunto que é localizada na borda da passagem da esfera. Nesta região é caracterizada como a mais suscetível para a ocorrência do vazamento da válvula. A força de reação foi extraída da restrição localizada nos munhões da esfera. Este valor deve ser multiplicado por dois devido à condição de simetria que foi utilizada na simulação.

Nas Tabelas 4 e 5 são descritos os modelos utilizados para as variáveis de resposta Y1 e Y2. Através da regressão múltipla comprovou-se que, para as duas variáveis de resposta, todos os quatro fatores controláveis são significativos. As interações entre os fatores X1X4 (área da pista de vedação e pressão do fluido) e X2X4 (área sujeita ao  $\Delta P$  e pressão do fluido) também são significativas.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da variável Y1 (pressão de contato)

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	10	4446,6	444,7	103,9	0,0
Resíduo	5	21,4	4,3		
Total	15	4468,0			

	<i>Erro</i>			
	<i>Coefficientes</i>	<i>padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	28,36	0,52	54,82	0,00000
X1	-6,60	0,52	-12,76	0,00005
X2	2,53	0,52	4,89	0,00450
X3	2,04	0,52	3,94	0,01101
X4	14,21	0,52	27,46	0,00000
X1X2	-1,22	0,52	-2,36	0,06478
X1X3	-0,75	0,52	-1,45	0,20583
X1X4	-3,89	0,52	-7,52	0,00066
X2X3	-0,35	0,52	-0,67	0,53082
X2X4	1,97	0,52	3,81	0,01245
X3X4	-0,87	0,52	-1,69	0,15

Tabela 5 – Resumo dos resultados da variável Y2 (força de reação)

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	10	7,89E+11	7,89E+10	7105040	3,08E-17
Resíduo	5	55549	11109,8		
Total	15	7,89E+11			

	<i>Erro</i>			
	<i>Coefficientes</i>	<i>padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	251.191	26,35076	9532,581	0,00000
X1	-1.552	26,35076	-58,8882	0,00000
X2	2.946	26,35076	111,7899	0,00000
X3	1.023	26,35076	38,8319	0,00000
X4	222.067	26,35076	8427,338	0,00000
X1X2	56	26,35076	2,115689	0,08799
X1X3	-4	26,35076	-0,14231	0,89239
X1X4	-1.396	26,35076	-52,9681	0,00000
X2X3	-9	26,35076	-0,33206	0,75331
X2X4	2.647	26,35076	100,443	0,00000
X3X4	14	26,35076	0,540781	0,61

Considerando os fatores e intervalos investigados, os resultados das variáveis de resposta mostraram comportamento aproximadamente linear em relação à variação dos fatores. Na Figura 15 está ilustrado esse comportamento.

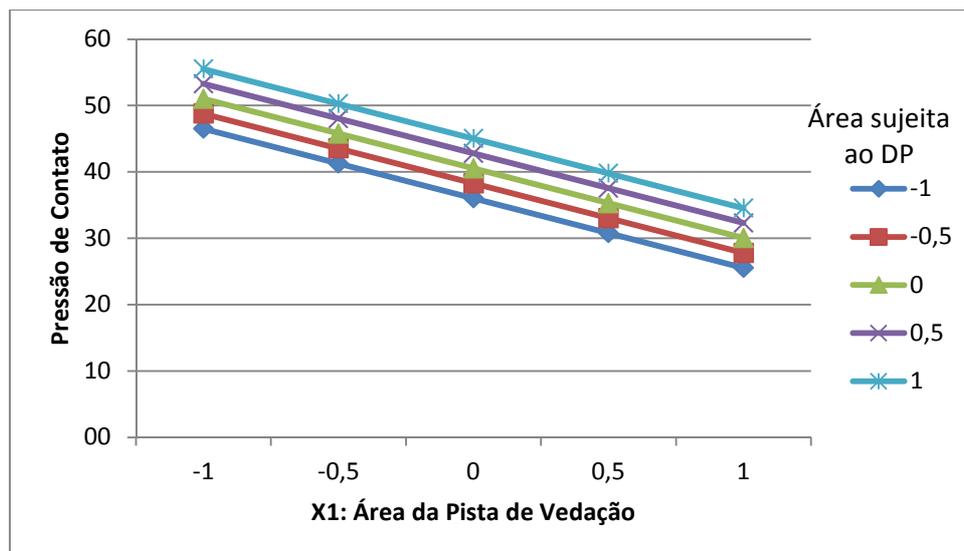


Figura 15 – Pressão de contato em função da variação de X1 e X2

Como um dos objetivos do estudo é encontrar a condição ótima de geometria de portase, a avaliação deste ponto ótimo deve ser feita considerando a variação do fator X4 em dois níveis, pois desta forma será determinada a configuração ideal para este componente da válvula considerando duas condições de operação importantes: baixa pressão (0,6 MPa) e alta pressão (11,22 MPa). Para se chegar a esta condição foram atribuídos valores para os alvos (T1 e T2) e para os limites superiores (LSE) e inferiores de especificação (LIE) para cada nível de X4. Estes valores foram atribuídos com base nos parâmetros de projeto utilizados na empresa em questão.

Utilizando a ferramenta do Solver do Excel, buscou-se obter a menor perda em função dos limites de especificação variando-se as células X1, X2 e X3. Para as variáveis de resposta, 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.

$$\text{Se } Y \text{ for menor que o alvo} \quad \text{Perda} = [(Y_1 - T_1)/(T_1 - LEI_1)]^2 \quad \text{Equação 13}$$

$$\text{Se } Y \text{ for maior que o alvo} \quad \text{Perda} = [(Y_1 - T_1)/(T_1 - LES_1)]^2 \quad \text{Equação 14}$$

A Tabela 6 descreve o procedimento empregado para buscar a condição ótima.

Tabela 6 – Determinação da condição ótima de porta-sede para as duas condições de X4

X1	-1,00	X1	-1,00
X2	-1,00	X2	-1,00
X3	-1,00	X3	-1,00
X4	-1	X4	1
Y1	14,3	Y1	46,5
Y2	27.958	Y2	469.589
T1	6	T1	60
T2	423.000	T2	423.000
LIE	2	LIE	22
LSE	470.000	LSE	470.000
Perda1	0	Perda1	0,13
Perda2	0	Perda2	0,98
PerdaTotal	0	PerdaTotal	1,11

Com o objetivo de atingir a menor perda na função, é possível afirmar que a condição que apresentou os melhores resultados nos dois níveis de X4 é obtida ajustando os demais fatores controláveis nos níveis inferiores dos intervalos investigados.

### 3.4.7 Validação dos resultados

A metodologia e os resultados deste estudo foram validados através de reuniões com especialistas das empresas de válvulas industriais. Participaram desta etapa o Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento que possui 16 anos de experiência trabalhando com válvulas industriais, o Gerente de Engenharia e o Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento que possuem 8 anos de experiência no ramo.

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 validada de forma qualitativa pelos especialistas consultados.

### 3.5 Conclusões

Através deste estudo foi possível identificar os principais parâmetros do projeto de um porta-sede, que possuem influência significativa no desempenho da válvula associado ao atendimento dos requisitos de qualidade. Os quatro fatores controláveis incluídos no estudo revelaram efeitos significativos sobre as variáveis de resposta utilizadas. Sem considerar a pressão de operação da válvula (Fator X4), que não é um parâmetro de projeto, o fator que se mostrou mais significativo foi a área da pista de vedação (Fator X1).

Portanto, para futuros desenvolvimentos realizados em válvulas de esfera *trunnion*, a maneira mais eficaz de obter a pressão de contato entre a sede e a esfera no patamar desejado, seria variando primeiramente a área deste contato (X1), em seguida a área sujeita ao diferencial de pressão (X2) e por fim a força das molas (X3).

O estudo descrito neste artigo limitou-se a realizar um experimento fatorial  $2^4$  onde os parâmetros geométricos dos componentes que fazem parte deste estudo foram variados para estudar seu efeito sobre o desempenho da válvula. Além de identificar a significância dos fatores, foi possível obter a condição ótima de desempenho do componente. Considerando todo o intervalo de variação de X4, a condição ótima é obtida ajustando os demais fatores controláveis nos níveis inferiores dos intervalos pesquisados.

### 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.

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.

GARVIN, David. **Competing on the eight dimensions of quality**. Harvard Business Review, 1987.

MASON, R.L.; GUNST, R.F.; HESS, J.L. **Statistical Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons Publication, 2003.

MATHIAS, A. C. **Válvulas: Industriais, Segurança e Controle: Tipos, Seleção e Dimensionamento**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5th edition, John Wiley & Sons Inc., 2001.

RIBEIRO, J. L.; CATEN, C. S. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2011. (Apostila)

SILVA, P. R. et al. A importância da qualidade dos produtos para manter a competitividade das organizações. **Revista Científica Eletrônica de Administração**. Garça – SP, ano VI, n. 10, jun. 2006.

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.

GALDÁMEZ, Edwin V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). USP, São Carlos, 2002.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1 Conclusões

Através do estudo reportado nesta dissertação foi possível desenvolver uma metodologia para a otimização de projetos de válvulas industriais visando à obtenção de maior robustez do produto. Este trabalho proporcionou a identificação dos principais parâmetros da geometria de um porta-sede que garantam o desempenho funcional da válvula, atendendo os respectivos requisitos de qualidade. O estudo descrito no primeiro artigo foi delimitado em comparar três modelos de porta-sedes de válvulas *trunnion* bitola 8" (DN 200) classe de pressão 600, utilizando os resultados das análises realizadas pelo método dos elementos finitos e utilizando a função da perda quadrática.

Através deste trabalho também foi possível identificar os principais parâmetros do projeto de um porta-sede, que possuem influência significativa no desempenho da válvula associado ao atendimento dos requisitos de qualidade. Os quatro fatores controláveis incluídos no estudo revelaram efeitos significativos sobre as variáveis de resposta utilizadas. Sem considerar a pressão de operação da válvula (Fator X4), que caracteriza uma condição operacional e não é um parâmetro de projeto, o fator que se mostrou efeito mais pronunciado foi a área da pista de vedação (Fator X1).

Portanto, para futuros desenvolvimentos realizados em válvulas de esfera *trunnion*, a maneira mais eficaz de obter a pressão de contato entre a sede e a esfera no patamar desejado, seria variando primeiramente a área deste contato (X1), em seguida a área sujeita ao diferencial de pressão (X2) e por fim a força das molas (X3).

O estudo descrito no segundo artigo limitou-se a realizar um experimento fatorial  $2^4$  onde os parâmetros geométricos dos componentes que fazem parte deste estudo foram variados para estudar seu efeito sobre o desempenho da válvula. Além de identificar a significância dos fatores, foi possível obter a condição ótima de desempenho do componente. Considerando todo o intervalo de variação de X4, a condição ótima é obtida ajustando os demais fatores controláveis nos níveis inferiores dos intervalos pesquisados: menor área de contato, menor área sujeita ao diferencial de pressão, menor força nas molas.

## 4.2 Sugestões para trabalhos futuros

No processo de desenvolvimento de produto, com o intuito de validar o projeto do produto, é importante a construção de protótipos. É através dos testes realizados nele, que podem ser detectados itens que ainda podem ser aprimorados no produto antes que o mesmo seja lançado no mercado. No presente trabalho não foram fabricados protótipos, pois esta ação poderia inviabilizar a análise deste produto devido ao elevado tempo e custo que demandariam os testes. Portanto recomenda-se que os testes em protótipos constituam a sequência natural do estudo apresentado nesta dissertação.

Recomenda-se também a realização de testes de vedação nestas válvulas com a utilização de filmes entre a sede e a esfera, para que a pressão de contato entre os dois componentes possa ser fisicamente medida, verificando de forma prática e metodologia proposta.

Com o objetivo de assegurar que os futuros projetos de válvulas de esfera *trunnion* da empresa estejam de acordo com os resultados encontrados no presente trabalho, seria necessária a construção de uma planilha padrão de dimensionamento de porta-sedes. O desenvolvimento desta planilha deve considerar válvulas de várias bitolas, classes de pressão e diferentes materiais de sede. Para certificar que os resultados de dimensionamento da planilha estão coerentes, devem ser expandidas as análises de Elementos Finitos seguindo a metodologia adotada nesta dissertação.

## **REFERÊNCIAS**

**BONDUELLE, A. Caractérisation du panneau de particules surfasse mélaminé par son aptitude a l'usinabilité.** Tese de Doutorado, 205 p., Universidade de Nancy. Nancy, 1994.

**PHADKED, M. S. Quality engineering using robust design.** New Jersey: Prentice Hall/AT & T Bell Laboratories, 1989.

**RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. Notas de aula da disciplina de Projeto de Experimentos.** Porto Alegre: UFRGS, 2011.

**TAGUCHI, G.; ELSAYED, A. E.; HSIANG, T. C. Engenharia da qualidade em sistemas de produção.** São Paulo: McGraw-Hill, 1990.