



## ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE VÁLVULA ESFERA DO TIPO TRUNNION

DIEGO RIZZOTTO ROSSETTO, THOMAS GABRIEL ROSAURO CLARKE

Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Bento Gonçalves, 9500, CADETEC, Porto Alegre – RS Brasil

(Recibido 30 de noviembre de 2015, para publicación 15 de febrero de 2016)

**Resumen** – Válvulas industriais do tipo esfera trunnion são dispositivos mecânicos de bloqueio de fluxo amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás. Qualidade e confiabilidade das válvulas são elementos essenciais para a segurança e desempenho operacional. Os métodos clássicos utilizados para projetar e calcular componentes de válvulas muitas vezes leva a conclusões errôneas. O método dos elementos finitos (MEF) consiste em uma poderosa ferramenta para análise dos diversos fenômenos físicos em válvulas para aplicações industriais. O ensaio de protótipos com a utilização de strain gages tem como finalidade validar os resultados das simulações computacionais. Este artigo tem como objetivo avaliar o comportamento das tensões equivalentes entre os métodos dos elementos finitos e experimental com uso de strain gages em três condições de carregamentos de uma válvula de esfera do tipo trunnion. Para validação dos resultados adotou-se análise de variância, segundo modelo matemático de um experimento fatorial  $3 \times 2$  no delineamento de blocos ao acaso com nível de significância de 2,5%. Os resultados mostraram que não há diferença significativa das tensões atuantes nos componentes avaliados entre os métodos de análises adotados. Através do correto entendimento das variáveis envolvidas na análise de válvulas, é possível avaliar via método dos elementos finitos o comportamento da válvula durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto com precisão e eficiência.

**Palabras clave** – Elementos Finitos, Válvula de Esfera Trunnion, Análise Experimental.

### 1. INTRODUÇÃO

As válvulas industriais do tipo esfera trunnion são dispositivos mecânicos de bloqueio de fluxo amplamente utilizados nas instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo, assim como em outros segmentos industriais.

O baixo desempenho ou falha de válvulas em operação pode trazer graves consequências, tais como, perdas de produção, catástrofes ambientais e até mesmo perdas de vidas humanas, resultando com isso em severas consequências econômicas e judiciais. Qualidade e confiabilidade das válvulas são elementos essenciais para a segurança e desempenho operacional.

Segundo [7] (1993 *apud* [4], 2013) uma pesquisa realizada por diversas empresas indica que vazamento e emperramento são os dois problemas mais comuns em válvulas. Análises desta pesquisa demonstraram que cerca de 10% das quase 250.000 válvulas estudadas reportaram problemas significativos em serviço. As causas de falhas em equipamentos de petróleo podem ser classificadas como: 20% devido a defeitos de fabricação, 40% defeitos de projeto e 40% defeitos de informação [2] (1994 *apud* [4], 2013),.

Válvulas utilizadas nas instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo são produtos de fabricação complexa. Os métodos clássicos através de soluções exatas por meio de cálculos analíticos utilizados para projetar e calcular componentes de válvulas são limitados e muitas vezes são empíricos, levando em muitas situações a conclusões errôneas [6]. Apenas para sistemas de geometria simples, com condições de carregamento e apoio bem definidos, são obtidas soluções exatas para os problemas alvo de análise. No dia-a-dia das atividades de engenharia a maioria dos problemas são extremamente complexos para serem analisados somente pelas técnicas clássicas.

A falta de projetos estruturados de engenharia é um dos principais problemas enfrentado pelos fabricantes brasileiros de válvulas ao longo dos últimos anos. Os projetos estruturados de engenharia são frequen-

temente substituídos pela cópia, através de engenharia reversa, de produtos adquiridos de outros fabricantes [9].

Devido a grande variedade de problemas encontrados nos fornecedores brasileiros de válvulas, a partir de 2001 foi instituído um programa de garantia da qualidade com o objetivo de promover a melhoria do mercado brasileiro de válvulas industriais.

Nos últimos anos, foi desenvolvida a norma ABNT NBR15827 [1], que teve seu lançamento no ano de 2007. Esta norma estabeleceu critérios rigorosos para a certificação de fornecedores de válvulas, seu desenvolvimento foi apoiado pelos fabricantes brasileiros, pois entenderam que esta seria uma proteção do mercado contra fornecedores de baixa qualificação técnica. A norma exige que o projeto de válvulas comprove a realização de análise de tensões e deformações de componentes críticos por cálculos analíticos e/ou modelos de elementos finitos. Entretanto, o atendimento da norma na íntegra na grande maioria das vezes acaba sendo inviabilizada, tanto pelo custo envolvido no desenvolvimento quanto pela falta de conhecimento técnico disponível.

A realização da análise de tensões e deformações pelo método dos elementos finitos em componentes críticos de válvulas utilizadas nas instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo, é um dos principais problemas enfrentados atualmente pelos fabricantes brasileiros [9].

O método dos elementos finitos (MEF) consiste em uma poderosa ferramenta para análise dos diversos fenômenos físicos de válvulas para aplicações industriais, evitando desta forma, que erros sejam detectados durante o teste de fábrica ou na própria operação e que alterações de projeto ocorram por tentativa e erro. O uso correto do MEF durante as etapas iniciais do processo de desenvolvimento de produto permite a obtenção de soluções rápidas, seguras e econômicas.

Por desenvolvimento de projeto, entende-se um procedimento planejado com indicações concretas de condutas a serem observadas no desenvolvimento e no projeto de sistemas técnicos, que resultaram de conhecimentos na área da ciência do projeto e da experiência com diferentes aplicações [8].

Para atingir os níveis de exigência atual é necessário um conhecimento cada vez mais profundo sobre o comportamento do produto de acordo com a sua aplicação.

Segundo [5], no dia-a-dia das atividades de engenharia, os engenheiros e projetistas são colocados diante de problemas técnicos, alguns mais simples e outros mais complexos, tendo que resolvê-los de forma satisfatória. No desenvolvimento de cálculo estrutural, o sucesso não está apenas condicionado ao conhecimento de um aparato matemático muitas vezes complicado, mas à capacidade que o engenheiro apresenta de entender a natureza física que se propõe a resolver [5].

Segundo [3], modelo matemático é uma idealização na qual geometria, propriedades de materiais, condições de carregamento e/ou contorno são simplificadas baseadas na percepção do analista em entender quais aspectos são importantes ou não para obtenção dos resultados requeridos.

Elementos finitos é um método para solução numérica de problemas de campo. O modelo matemático é discretizado pela malha de elementos finitos, assim um campo contínuo é representado por pequenos segmentos, denominado elementos, que são conectados por um por um número finito de nós [3].

Segundo Biasil [13], mesmo as maiores fabricantes de válvulas industriais do Brasil possuem dificuldades 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. 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 final do produto, diminuindo assim a competitividade do produto frente aos concorrentes.

Segundo [19] (1994 *apud* [20], 2011), a ferramenta (FEA) é normalmente utilizada para análise de modos de falha, na avaliação do projeto após a sua concepção, para verificar se o que foi feito está de acordo com os padrões requeridos para tal situação, ou seja, um tipo de análise que não agrega nem um ganho ao produto. O autor sugere que a ferramenta (FEA) seja utilizada para a concepção de produtos de maneira correta na primeira vez e não para corrigir projetos que fracassaram.

O uso da ferramenta CAE no segmento produtor de válvulas evitaria que correções de problemas técnicos e revisões de projeto ocorram por improvisação, além de permitir o desenvolvimento de um produto de alta qualidade, desempenho e confiabilidade.

Para Montgomery [12], os métodos de desenvolvimento experimentais têm uma importância maior nas atividades de projetos de engenharia, tanto no desenvolvimento de novos produtos, como em melhorias

de produtos existentes. Algumas aplicações do desenvolvimento experimental incluem: avaliações e comparações de configurações de projetos básicos, avaliações de alternativas de materiais; seleção de parâmetros de projeto para que o produto opere adequadamente em uma grande variedade de condições de campo, ou seja, para que o produto seja robusto; determinação dos parâmetros-chaves no projeto do produto que impactam no desempenho do produto.

Projetos de experimentos é uma metodologia que contribui para o levantamento de informações referentes ao produto, através de ensaios planejados é possível identificar os fatores que influenciam o desempenho do produto e ajustá-lo de modo a obter melhor qualidade, confiabilidade e redução do custo final [11].

A utilização de projeto de experimentos (DOE) permite, a um custo relativamente baixo, identificar quais são os fatores que influenciam o produto ou processo que está sendo estudado e de que forma esse produto ou processo pode ser melhorado. Paralelamente permite avaliar se as características especificadas estão sendo atendidas [12]. Womack e Jones [14] apontam que o pensamento enxuto é uma forma de especificar valor, alinhar na melhor sequência as atividades, realizar estas atividades sem interrupção toda vez que alguém as solicita e realizá-las de forma cada vez mais eficiente, eficaz e efetiva.

Segundo [19] (1994 *apud* [20], 2011), os métodos de (DOE) proporcionam grande eficiência para experimentos físicos e sistemas técnicos, mas a eficiência é aplicada em modelos de elementos finitos. Ao combinar as metodologias análise por elementos finitos (FEA) com projeto de experimento (DOE), os engenheiros podem obter poderosas ferramentas de análise de projeto e engenharia da qualidade.

Segundo Wütemberg *et al.*, [15] a qualidade pode ser definida pelo seu preço, pela taxa de falhas, por características de uso e pela qualidade intrínseca percebida pelo cliente. A qualidade do produto é consequência direta do seu processo de desenvolvimento de produto (PDP), ou seja, dos processos, pessoas e tecnologias adotadas [16].

Para aumentar a agilidade no desenvolvimento de válvulas industriais, as empresas adotam uma série de ferramentas a fim de tornar mais eficiente esta etapa sem comprometer o desempenho do produto final. O desenvolvimento a partir da realização de cálculos analíticos, simulações computacionais e testes de protótipos são alguns exemplos de etapas adotadas pelas empresas para atender os padrões de qualidade exigidos atualmente.

A análise estrutural de válvulas, visa verificar o comportamento e a integridade estrutural de componentes do produto de acordo com os carregamentos que representam as diversas condições de operação.

O ensaio experimental de protótipos com a utilização de *strain gages* tem como finalidade validar os resultados das simulações computacionais. Este tipo de ensaio consiste em comparar os resultados da simulação numérica com os resultados experimentais, permitindo com isso o ajuste do modelo computacional a fim de obter maior precisão na simulação computacional.

No âmbito acadêmico praticamente não há relatos de desenvolvimento de pesquisa sobre o tema. Sendo que o conhecimento, desenvolvimento tecnológico e inovações geradas sobre o assunto válvulas se dá através das pesquisas desenvolvidas pelos próprios fabricantes e os resultados não são divulgados.

Este artigo tem como finalidade apresentar a importância do uso da técnica dos elementos finitos para avaliação do estado de tensões e deformações de válvulas de esfera do tipo trunnion durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento. Os resultados da simulação numérica através da técnica dos elementos finitos são comparados com os resultados obtidos por meio de análise experimental com uso de *strain gages* e os resultados são validados por intermédio da análise de variância, também são apresentados os fatores que influenciam os resultados entre o método numérico e experimental.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Característica da Válvula de Esfera do Tipo Trunnion

De acordo com Mathias [18], as válvulas com montagem trunnion superam os dois problemas mais comuns encontrados nas válvulas de esfera do tipo flutuante: o alto torque operacional e o desgaste do anel da sede a jusante. Enquanto nos modelos esfera flutuante e esfera integral a pressão a montante empurra a esfera contra o anel a jusante, no projeto trunnion, um eixo superior e outro inferior impedem esse

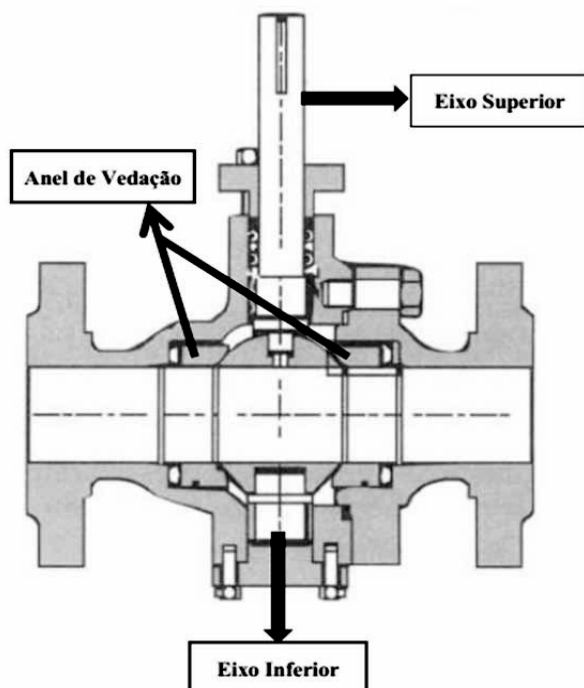


Fig. 1. Válvula de esfera do tipo trunnion.

Fonte: [Adaptado (Mathias, 2008)]

movimento, reduzindo a influência que a pressão do fluido exerce sobre o torque operacional da válvula e o desgaste do anel de vedação. Além do eixo superior, um eixo inferior também impede o deslocamento axial da esfera, suportando as cargas dinâmicas do fluido sobre esta, além de reduzir seu torque e o desgaste sobre os anéis de vedação e gaxetas.

A Fig. 1 ilustra um esboço da válvula de esfera do tipo trunnion.

A válvula de esfera do tipo trunnion pode apresentar diversas configurações de funcionalidade, tais como: duplo bloqueio (DBB), pistão simples efeito (SPE), pistão duplo efeito (DPE) e válvula com dupla barreira de vedação e alívio de pressão na cavidade (DIB).

## 2.2. Procedimento do Ensaio Numérico e Experimental

O estudo foi realizado em uma válvula de esfera do tipo trunnion de bitola 6", pressão interna de 1,96MPa, temperatura do ensaio de 25°C, corpo e tampa em aço ASTM A216 Gr. WCB.

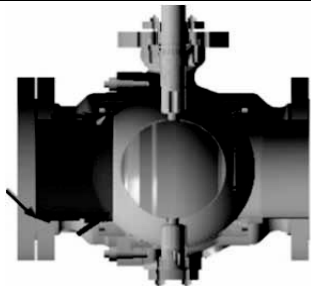
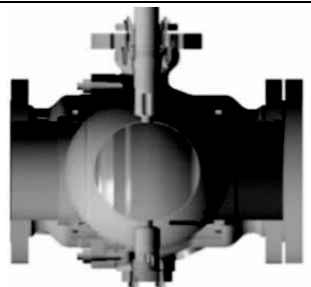
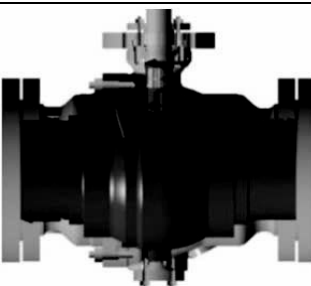
## 2.3. Propriedades Mecânicas e Físicas dos Materiais

As principais propriedades mecânicas e físicas adotadas nas simulações numéricas estão descritas na tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas e físicas do componente corpo e tampa da válvula.

PROPRIEDADE	SÍMBOLO	UNIDADE	MATERIAL	FONTE
			ASTM A216 Gr. WCB	
Módulo de Elasticidade	[E]	MPa	202210	[17]
Coefficiente de Poisson	[ν]	-	0,3	
Tensão de Escoamento	[S <sub>y</sub> ]	MPa	250	
Tensão de Ruptura	[S <sub>u</sub> ]	MPa	485	
Densidade	[D]	Kg/m <sup>3</sup>	7750	

Tabela 2. Condições de carregamento dos ensaios numéricos e experimentais.

Fator D – Condição de Carregamento		Pressão Interna [MPa]	
		Corpo	Tampa
Nível A – Válvula Fechada com Pressão Interna no Lado da Tampa		0,0	1,96
Nível B – Válvula Fechada com Pressão Interna no Lado do Corpo		1,96	0,0
Nível C – Válvula Aberta com Pressão Interna		1,96	1,96

Obs: Superfícies em vermelho correspondem às regiões da válvula submetida à pressão interna.

## 2.4. Condições de Carregamento

Na tabela 2, são ilustradas as principais condições de carregamentos adotadas nas simulações numéricas via elementos finitos e no ensaio experimental com uso de *strain gages*.

Os níveis de carregamento A e B representam a válvula na posição fechada na função pistão simples e-feito (SPE), sendo que na condição de carregamento A, a componente tampa está submetida à máxima pressão de trabalho e o componente corpo sem pressão. Na condição B, o corpo está submetido à máxima pressão e a tampa sem pressão, ou seja, ambas as condições (A e B) de operação na qual ocorre o maior diferencial de pressão entre a montante e jusante. O nível de carregamento C representa a válvula na posição aberta e ambos os componentes submetidos à máxima pressão de trabalho, ou seja, condição na qual não há diferencial de pressão entre a montante e a jusante.



Fig. 2. Malha gerada no conjunto da válvula.

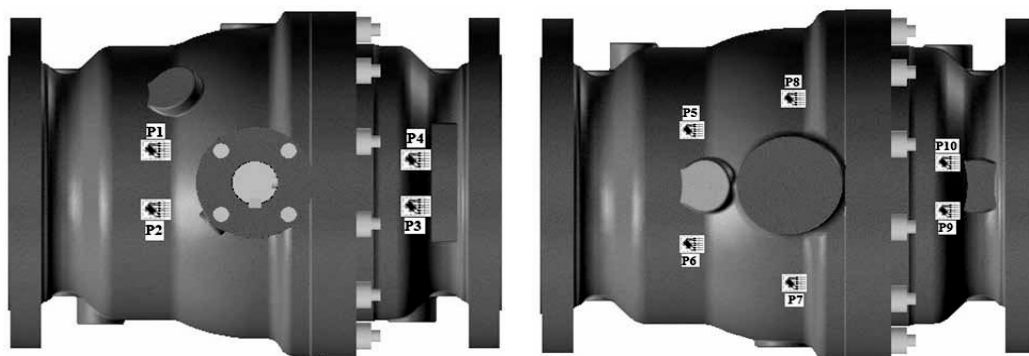


Fig. 3. Ponto de medição das deformações nos componente corpo e tampa da válvula.

## 2.5. Modelo de Elementos Finitos

As análises do estudo numérico são do tipo linear, tanto para condições de contato como em termos de propriedades mecânica dos materiais.

A malha gerada contém elementos tetraédricos e hexaédricos. Os elementos hexaédricos foram utilizados nos componentes cilíndricos (Ex. Porcas e Prisoneiros), ou seja, componentes que apresentam maior uniformidade geométrica. Elementos tetraédricos foram utilizados nos componentes de geometria mais complexa (Ex. Corpo e Tampa), ou seja, em componentes que apresentam muitas curvaturas e descontinuidades. Nos componentes de maior interesse da análise, bem como nas regiões de maior concentração de tensões foram realizados refinamentos na malha.

A Fig. 2, ilustra a malha gerada no conjunto.

## 2.6. Ensaio de extensometria

Para o ensaio de extensometria foram utilizados os seguintes equipamentos: bomba hidropneumática, sistema de aquisição de dados, software de aquisição de dados, torquímetro, *strain gage* do tipo roseta ( $0,45^\circ$  e  $90^\circ$ ). As deformações foram avaliadas em pontos aleatórios do corpo e tampa, sendo que no com-

ponente corpo as tensões foram analisadas em 6 pontos, enquanto que no componente tampa avaliou-se as tensões em 4 pontos.

A Fig. 3 apresenta os pontos onde foram colados os strain gages nos componentes corpo e tampa da válvula.

## 2.7. Critério de Análise

A extensometria é uma técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas. O *strain gage* é o transdutor utilizado para medir deformações.

Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) é uma tecnologia que utiliza o computador para dar suporte a engenharia de produto durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento do projeto de produto. Esta técnica permite que protótipos virtuais sejam avaliados dentro de certas condições de operação. O uso da tecnologia CAE com técnicas de elementos finitos permite avaliar o estado de tensões e deformações de componentes críticos de válvulas.

A análise comparativa dos resultados das simulações numéricas com os resultados experimentais foi realizada em termos de tensões e deformações equivalentes “von Misses”.

A Teoria de energia de distorção máxima ou critério de von Misses é usada para prever a tensão de falha de um material dúctil, conforme equação 1.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

## 2.8. Validação dos Resultados

Para avaliação dos resultados foi realizada análise de variância, segundo modelo matemático de um experimento fatorial 3x2 no delineamento de blocos ao acaso, caracterizada pela equação 2 [10].

$$Y_{ijk} = m + a_i + d_j + (ad)_{ij} + b_k + e_{ijk} \quad (2)$$

Onde:

$Y_{ijk}$  = observação no bloco  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) referente ao tratamento nível  $i$  do fator A com o nível  $j$  do fator D;

$m$  = média geral do experimento;

$a_i$  = é o efeito do nível  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) do fator A;

$d_j$  = é o efeito do nível  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) do fator D;

$(ad)_{ij}$  = é o efeito da interação do nível  $i$  do fator A com o nível  $j$  do fator D;

$b_k$  = é o efeito aleatório do bloco  $k$ ;

$e_{ijk}$  = é o efeito aleatório do erro experimental.

Os resultados foram avaliados em termos de tensões equivalentes de von Mises em seis pontos no componente corpo e quatro pontos no componente tampa com nível de significância de 2,5%. Foram avaliados dois níveis do fator A que são constituídos por dois métodos de análise de tensões; (i) análise pelo método dos elementos finitos e; (ii) análise experimental por meio de *strain gages*. Os três níveis do fator D correspondem às condições de carregamento da válvula.

## 3. RESULTADOS

Na tabela 3, são apresentados os resultados de tensões equivalentes de von Misses obtidos pelo método dos elementos finitos e experimental com uso de *strain gages* do componente corpo da válvula.

Através dos dados ilustrados na tabela 3, observou-se que para o componente corponas condições de carregamento A e C, os resultados em termos de tensões equivalentes obtidos pelo método dos elementos finitos foram em média 10,95% e 0,14%, respectivamente, menor do que os valores obtidos pelo método experimental. Na condição de carregamento B, os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos foi em média 3,97% maior do que os valores obtidos pelo método experimental.

O ponto 8, foi o ponto que apresentou a maior diferença percentual dos resultados entre os métodos analisados e o ponto 7 foi o que apresentou a menor diferença. Nos pontos 8 e 7 os resultados obtidos pelo

Tabela 3. Análise comparativa de tensões no componente corpo.

Condição de Carregamento	Método de Análise	Tensão Equivalente [MPa]					
		P1	P2	P5	P6	P7	P8
A	Elementos Finitos	8,90	9,07	7,02	7,03	17,90	18,80
	Experimental	9,17	8,18	8,00	11,53	17,74	24,49
B	Elementos Finitos	11,90	12,40	9,55	9,53	13,90	14,70
	Experimental	8,65	9,18	9,36	7,67	20,32	26,03
C	Elementos Finitos	19,00	19,00	17,50	17,50	34,60	35,20
	Experimental	19,22	15,30	21,85	20,15	30,71	36,48

Tabela 4. Análise da variância do componente corpo.

CV	GL	SQ	QM	Fc	F2,5%
Pontos de Verificação de Tensão	5	1165,479	233,10	27,538	3,129
Fator A – Métodos de Análise	1	11,708	11,708	1,383	5,686
Fator D – Condições de Carregamento	2	1028,753	514,38	60,768	4,291
Interação Fator Ax Fator D	2	4,457	2,23	0,263	4,291
Erro	25	211,616	8,46		
Total	35	2422,011			

OBS: CV:Causas de Variação; GL:Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; Fc: F calculado; F2,5% Limites unilaterais da distribuição F ao nível de 2,5% de probabilidade

Tabela 5. Análise comparativa de tensões no componente tampa.

Condição de Carregamento	Método de Análise	TENSÃO EQUIVALENTE [MPa]			
		P3	P4	P9	P10
A	Elementos Finitos	5,48	5,49	5,40	5,38
	Experimental	6,41	8,32	6,73	6,67
B	Elementos Finitos	5,48	3,82	3,74	3,72
	Experimental	6,10	6,30	4,29	4,50
C	Elementos Finitos	10,70	10,70	10,70	10,70
	Experimental	9,73	11,25	9,28	9,28

método dos elementos finitos foi em torno de 23,42% e 6,01%, respectivamente, menor do que os resultados obtidos pelo método experimental.

Na média geral do experimento, os resultados de tensões obtidos para o componente corpo pelo método dos elementos finitos, foram em torno de 2,37% menor do que os resultados obtidos pelo método experimental.

Na tabela 4, é ilustrado a análise de variância do ensaio para o componente corpo em nível de significância de 2,5% de erro.

Através dos resultados apresentados na tabela 4, verifica-se que as tensões nos seis pontos avaliados não são homogêneas, ou seja, há diferença significativa das tensões atuantes entre os pontos avaliados. Com relação aos métodos de análise de tensões (Fator A), verifica-se que não há diferença entre os métodos de análise de tensões adotados. Para as condições de carregamento (Fator D), verifica-se que há diferença significativa de tensões equivalentes para as diferentes condições de carregamento que o corpo da válvula pode ser submetido.

Na tabela 5, são apresentados os resultados de tensões equivalentes de von Mises obtidos pelo método dos elementos finitos e os valores obtidos pelo ensaio experimental com uso de *strain gages* para o componente tampa da válvula.

Através dos dados ilustrados na tabela 5, observou-se que para a componente tampa nas condições de carregamento A e B, os resultados em termos de tensões equivalentes obtidos pelo método dos elementos finitos foram em média 21,91% e 19,92%, respectivamente, menor do que os valores obtidos pelo método

Tabela 6. Análise da variância do componente tampa.

CV	GL	SQ	QM	Fc	F2,5%
Pontos de Verificação de Tensão	3	4,002	1,33	3,117	4,153
Fator A – Métodos de Análise	1	2,375	2,38	5,550	6,200
Fator D – Condições de Carregamento	2	131,935	65,97	154,140	4,765
Interação Fator A x Fator D	2	6,495	3,25	7,588	4,765
Erro	15	6,420	0,43		
Total	23	151,226			

OBS: CV:Causas de Variação; GL:Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; Fc; F calculado; F2,5% Limites unilaterais da distribuição F ao nível de 2,5% de probabilidade.

experimental. Na condição de carregamento C, os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos foi em média 8,92% maior do que os valores obtidos pelo método experimental.

O ponto 4, foi o ponto que apresentou a maior diferença percentual dos resultados entre os métodos analisados e o ponto 3 foi o que apresentou a menor diferença. Nos pontos 8 e 7 os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos foi em torno de 26,09% e 4,90%, respectivamente, menor do que os resultados obtidos pelo método experimental.

Na média geral do experimento, o resultado de tensões obtidas para o componente tampa pelo método dos elementos finitos, foram em torno de 10,97% menor do que os resultados obtidos pelo método experimental.

Na tabela 6, é ilustrado a análise de variância do ensaio para o componente tampa em nível de significância de 2,5% de erro.

Através dos resultados apresentados na tabela 6, verifica-se que as tensões nos quatro pontos avaliados são homogêneas, ou seja, não há diferença significativa das tensões atuantes entre os pontos avaliados. Com relação aos métodos de análise de tensões (Fator A), verifica-se que não há diferença entre os métodos de análise de tensões adotados. Para as condições de carregamento (Fator D), verifica-se que há diferença significativa em termos de tensões para as diferentes condições de carregamento que a tampa da válvula pode ser submetido.

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos resultados apresentados observou-se que para o componente corpo houve uma variação significativa de tensões equivalentes entre os pontos avaliados e que o componente tampa não apresentou uma diferença significativa em termos de tensões nos pontos de interesse do estudo. Essa diferença significativa de tensões equivalentes apresentadas pelo componente corpo se deve principalmente à variação geométrica e dimensional, presença de poros e impurezas, posição da colagem dos *straingages*, componente com uma configuração que apresenta maior transição de geometria e regiões com mais concentradores de tensões.

Para o fator A, métodos de análise, observou-se para ambos os componentes que não houve diferença significativa entre os métodos adotados, com isso entende-se que as considerações adotadas para elaboração do modelo de simulação via elementos finitos, tais como; simplificação de geometria, propriedades de materiais, condições de contorno e carregamento, e discretização de malha condizem com a resposta dada pelo modelo físico.

Para o fator D, condição de carregamento era esperada uma diferença significativa em termos de tensões equivalentes dos componentes nos diferentes níveis de carregamentos aplicados, isto se deve ao fato de que em um determinado nível um componente está submetido a uma magnitude de esforços maior do que o outro componente, devido às diversas possibilidades de funcionamento que a válvula pode ser submetida durante a sua vida útil.

## 5. CONCLUSÃO

O uso da tecnologia CAE pelo método dos elementos finitos se mostrou uma técnica adequada, precisa e eficiente para análise de válvulas de esfera do tipo trunnion durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento do produto, permitindo determinar as tensões e deformações resultantes em função da aplicação dos carregamentos específicos de cada operação.

O uso de forma racional e correta da tecnologia CAE através da técnica dos elementos finitos, mostra-se uma ferramenta extremamente útil para concepção de novos produtos durante as fases iniciais do processo de desenvolvimento de válvulas, reduzindo com isso o número de ensaios em protótipos físicos, o tempo de desenvolvimento e o custo final do produto.

As diferenças encontradas se devem principalmente à variação dimensional dos componentes, tensões internas que são geradas no processo de fabricação, presença de poros e impurezas dos componentes da válvula e que não são considerados no modelo de análise numérica, aplicação dos carregamentos, colagem dos strain gages, discretização da malha de elementos finitos.

Com relação à variação dimensional dos componentes como causadora de diferença entre resultados experimentais e numéricos se deve ao fato que as simulações numéricas são realizadas com os componentes nas dimensões nominais, entretanto, os componentes da válvula utilizada no ensaio experimental apresenta dimensões entre as margens de tolerância máxima e mínima do processo de manufatura.

No modelo numérico o material é considerado homogêneo isento de poros, impurezas e sem tensões residuais gerados pelo processo de fabricação, porém nos componentes reais da válvula há presença de impurezas, poros e tensões residuais e isso contribui para a existência dessa variação entre os resultados da análise numérica e experimental.

A colagem dos *strain gages*, por sua vez, pode ocasionar grandes diferenças entre os resultados experimentais e numéricos, visto que, o posicionamento destes elementos pode não coincidir exatamente com os pontos determinados no software de elementos finitos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15827: Válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo - Requisitos de projeto e ensaio de protótipo. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT (2014)
- [2] Cort, A., "Safety and Reliability Analysis of Subsea production Equipment: Current Practice and Future Potential", Subsea International Conference, 1994. *apud* EUTHYMÍOU
- [3] Cook, R.D., Malkus, D.S., Witt, R.J., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4ª Ed, EUA. Wiley India PvtLtd, (2002)
- [4] Euthymiou, E.J., Metodologia para modelagem da evolução da probabilidade de falha, decorrente da degradação funcional de válvulas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (2013)
- [5] Filho, A.A., *Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE* (4ª Edição ed.). São Paulo: Érica Ltda. (2006)
- [6] Manescu, T., Bocîi, L.V., Copaci, I., Bretotean, C.P., Estudio de las tensiones en válvulas biplanas tipo Mariposa, *Revista Facultad de Ingeniería*, 30, 125-129 (2003)
- [7] Ouchet, L., Reliability Modeling of Subsea Gate Valves, Tese de M.Sc., Cranfield Institute of Technology, Reino Unido (1993)
- [8] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H., Projeto na Engenharia – Fundamentos do desenvolvimento e eficaz dos produtos, métodos e aplicações. 6ª Edição, São Paulo, Edgard Blücher (2005)
- [9] Weiss, J.M.G., Lima, A.M.A., Avaliação da capacitação tecnológica para a produção de válvulas Industriais. 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro, 25 a 29 de Outubro de 2010
- [10] Montgomery, D.C., *Design and analysis of experiments*, Eighth edition. John Wiley & Sons, Inc. (2014)
- [11] Costa, M.L.O., Estudo do torque de acionamento e vida útil de um projeto de válvulas industriais. Dissertação de M.Sc., PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil (2009)
- [12] Montgomery, C.D., *Design and analysis of experiments*, 5<sup>th</sup>ed. New York, Willey (2001)

- [13] Biasibetti, F., Otimização de projetos de válvula utilizando os conceitos de projeto de experimentos. Dissertação de M.Sc., PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil (2013)
- [14] Womack, J.P., Jones, D.T., *A mentalidade enxuta nas empresas – elimine o desperdício e crie riqueza*, 5. Ed. Rio de Janeiro: Campus (1998)
- [15] Wütemberg, L.M., Lilliesköld, J., Ericsson, E., “Abstract Model of LPD: A Critical Review of the Lean Product Development Concept”, Proceedings Of Picmet '11: Technology Management In The Energy-Smart World (PICMET), 868-874 (2011)
- [16] Morgan, J., Liker, J., *The Toyota Product Development System - Integrating People, Process and Technology*. New York: Productivity Press (2006)
- [17] The American Society of Mechanical Engineers. *ASME Section II Part D: ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section II Part D: Properties (Metric): Materials*. Nova Iorque: ASME (2010)
- [18] Mathias, A.C., *Válvulas: Industriais, Segurança, Controle: Tipos, Seleção, Dimensionamento*, São Paulo, Artliber Editora (2008)
- [19] Rizzo, "Quality engineering with FEA and DOE". Mechanical Engineering- CIME, May, 1994. Disponível em: < <http://www.allbusiness.com/management/443907-1.html> >. Acesso em: 28 de agosto de 2014
- [20] Silva, F.J., Estudo para redução do número de simulações computacionais em projetos de válvulas. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica. Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Caxias do Sul, RS, Brasil (2011)

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE TRUNNION BALL VALVE

**Abstract** – Industrial valves trunnion ball type are mechanics devices flow blockage widely used in the oil and gas industry. Quality and reliability of the valves are essentials for safety and operational performance. The classic methods used to design and calculate valve components often lead to erroneous conclusions. The finite element method is a powerful tool for analysis of various physical phenomena in valves for industrial applications. The testing of prototype with use of strain gage is intended to validate the results of the computer simulations. This paper aims to evaluate the behavior of equivalent stress between the methods of finite elements and experimental with use of strain gages on three loading conditions of the type trunnion ball valve. For validation of the results was adopted analysis of variance, according to mathematical model of a 3x2 factorial experiment in a randomized block design with 2,5% significance level. The results showed no significant difference the stresses acting on the components evaluated between the methods of analysis adopted. Through the correct understanding of the variables: involved in the analysis of valves, is possible evaluate by finite element method the behavior of the valve during the initial phases of the product development process with accurately and efficiently.

**Keywords** – Finite Elements, Trunnion Ball Valve, Experimental Analysis.