

ANÁLISE DO CONTATO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS RUGOSAS APLICADA A
VÁLVULAS DE ESFERA DE BLOQUEIO

Mauricio Oliveira Brandão

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

Prof. Renata Antoun Simão, DSc.

Prof. Renato Machado Cotta, Ph.D.

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL.

JUNHO DE 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

BRANDÃO, MAURICIO OLIVEIRA

Análise do Contato de Superfícies
Metálicas Rugosas Aplicada a Válvulas de
Esfera de Bloqueio [Rio de Janeiro] 2007

XIV, 78 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Oceânica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Vedação
2. Compactação de Superfícies
3. Válvulas de Esfera

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

“Subi um dia a mais alta montanha que a Terra tem, e nada mais de lá vi, que o amor de minha mãe.”

Dedico este trabalho à minha família. Minha mãe Eliete, minha irmã Lilian, minha tia Sylvia e ao meu saudoso pai Fernando Mauro que, onde quer que esteja, acompanha meu crescimento pessoal e profissional.

“May the force be with you”

(Obi-Wan Kenobi)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à minha família pelo apoio e paciência com meu temperamento impaciente diante das preocupações profissionais.

Ao Programa de Engenharia Oceânica e ao meu orientador, professor Theodoro, que me acolheu para o desenvolvimento de um trabalho sem nem mesmo me conhecer. Obrigado pela insistência nos momentos de dispersão do objetivo.

Aos professores Ilson, Renata e Cotta que aceitaram meu convite para a banca. Agradecimento especial à professora Renata do PEMM na medição com o AFM.

Aos meus amigos Pedro, por me incentivar a mudar meu tema para algo que fosse condizente com minha atividade profissional, Huei pela amizade e por me ajudar com os desenhos das superfícies, Marcel, Paulo e Pivari pelos ensinamentos no método dos elementos finitos, à Bianca por me ensinar a base para trabalhar com o ABAQUS.

Aos meus amigos da FMC, especialmente ao Sérgio Ricardo, Luis Serpa, Alan Labes por comentarem meus resultados e pela ajuda na busca de uma solução para o meu problema. Ao José Edson pelo apoio no trabalho realizado.

Ao Mauricio Barbosa, Sergio Dantas e Paulo Couto por permitirem que eu dedicasse parte de meu tempo ao curso de Mestrado.

Aos meus amigos Bruno Cardozo, Leonardo Testi e Rogger Pereira pelo companheirismo e incentivo à conclusão do Mestrado.

Ao Fabio, Gabriel, Leandro, Fabiano e Anderson, meus amigos e parceiros na minha banda de rock, pela compreensão da dedicação deficiente por conta deste curso. Nossa banda sempre foi minha “válvula de escape” – sem vazamentos, é claro.

Ao Programa de Engenharia Mecânica pela minha formação de engenharia e ao CNPq pela bolsa concedida enquanto aluno integral.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DO CONTATO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS RUGOSAS APLICADA A VÁLVULAS DE ESFERA DE BLOQUEIO

Mauricio Oliveira Brandão

Junho/2007

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Naval e Oceânica

Este trabalho desenvolve uma avaliação da compactação de superfícies rugosas com a motivação da compreensão do mecanismo de vedação metálica aplicado a válvulas de esfera de bloqueio, especialmente as submarinas. O trabalho é dividido em duas partes. Na primeira avalia-se e mede-se a superfície rugosa pelo microscópio de força atômica (AFM) e propõe-se um ajuste numérico para representação dessa superfície. Utilizando o método dos elementos finitos (FEM) analisa-se a superfície definindo a força necessária para a sua compactação. A segunda parte deste trabalho é um estudo de caso onde, após conhecido o valor da carga compressiva necessária à compactação da superfície, analisa-se o contato da região entre sede-esfera evidenciando a diferença entre sede com vedação combinada e vedação metal-metal. Conclui-se o trabalho indicando a carga necessária à compressão para cada caso e com algumas recomendações de processos de fabricação que podem favorecer a vedação metal-metal em válvulas de esfera de bloqueio.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ROUGH METALLIC SURFACES CONTACT ANALYSIS APPLIED TO SHUT-
DOWN BALL VALVE

Mauricio Oliveira Brandão

June/2007

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Naval and Oceanic Engineering

This work presents an assessment of rough metallic surfaces contact motivated by the comprehension of the metallic sealing mechanism applied to shut down ball valves, specially the subsea ones. The work is divided in two parts. In the first part the rough surface is measured and evaluated by using an atomic force microscope (AFM). Also a numeric fit is proposed for the rough surface representation. Using the finite elements method (FEM) the surface is analyzed and it is defined the load needed to complete deformation of the surface roughness. The second part of this work is a case study where, after the compressive load value is known, a comparison between the combined sealing seat and a metal-to-metal sealing seat is performed. The work is concluded informing the necessary compressive load for full compression of the contact surface and suggesting some manufacturing procedures for increasing the chance of success a metal-to-metal seal between seat and ball of shut-down ball valves.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1.....	6
PRINCÍPIOS, TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS VEDAÇÕES	6
1.1 DEFINIÇÃO DE VEDAÇÃO	6
1.2 TIPOS DE VEDAÇÃO.....	7
1.2.1 <i>Vedação dinâmica</i>	7
1.2.2 <i>Vedação estática</i>	8
1.3 TIPOS DE SELOS	9
1.3.1 <i>O-rings</i>	9
1.3.2 <i>Gaxetas U e V</i>	11
1.3.3 <i>Vedações metálicas</i>	11
1.4 ASPECTOS NECESSÁRIOS À VEDAÇÃO	13
1.4.1 <i>Acabamento superficial</i>	13
CAPÍTULO 2.....	14
MODELO DE SUPERFÍCIE RUGOSA	14
2.1 ACABAMENTO SUPERFICIAL	14
2.1.1 <i>Modelo da Superfície</i>	15
2.1.2 <i>Microscópio AFM</i>	16
2.2 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE.....	20
2.2.1 <i>Modelo Fractal da Superfície</i>	20
2.2.2 <i>Superfície real medida no AFM</i>	21
2.2.3 <i>Corpo de prova</i>	21

2.2.4	<i>Representação da Superfície Rugosa Real</i>	22
2.3	AJUSTE DA SUPERFÍCIE.....	23
2.3.1	<i>Ajuste por Fourier</i>	23
2.3.2	<i>Ajuste Polinomial</i>	25
2.3.3	<i>Comparação dos ajustes</i>	26
CAPÍTULO 3.....		33
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....		33
3.1	MODELO DE MATERIAL	33
3.1.1	<i>Regime Linear Elástico</i>	33
3.1.2	<i>Regime Plástico</i>	34
3.1.3	<i>Caracterização do material</i>	34
3.2	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	37
3.3	DEFINIÇÃO DO CONTATO.....	39
3.4	DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	40
3.5	DEFINIÇÃO DA MALHA E DOS ELEMENTOS	41
3.6	DEFINIÇÃO DOS PASSOS DE CARGA E DA ANÁLISE	45
3.7	AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO.....	46
3.7.1	<i>Definição da Carga Perimetral</i>	46
3.7.2	<i>Resultado da Compactação Superficial</i>	47
3.7.3	<i>Teste de sensibilidade de Malha</i>	51
CAPÍTULO 4.....		55
ESTUDO DE CASO : VEDAÇÃO METAL-METAL ENTRE SEDE E ESFERA		
DE VÁLVULAS DE ESFERA DE BLOQUEIO		55
4.1	PRINCÍPIO DE UMA VÁLVULA ESFERA	55

4.2	COMPONENTES DE UMA VÁLVULA DE ESFERA	56
4.2.1	<i>Gaxetamento da Haste</i>	56
4.2.2	<i>Retentor do Gaxetamento</i>	56
4.2.3	<i>Bonnet</i>	56
4.2.4	<i>Estojo de fixação do Bonnet</i>	57
4.2.5	<i>Adaptador</i>	57
4.2.6	<i>Sede</i>	57
4.2.7	<i>Haste</i>	58
4.2.8	<i>Esfera</i>	58
4.2.9	<i>Corpo</i>	59
4.2.10	<i>Outros Componentes</i>	59
4.3	ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONTATO SEDE - ESFERA.....	60
4.3.1	<i>Condições da Análise</i>	60
4.3.2	<i>Pré-Carga</i>	61
4.3.3	<i>Baixa e Alta Pressão</i>	61
4.3.4	<i>Modelo de elementos finitos</i>	63
4.3.5	<i>Resultados – Sede com alojamento para o-ring</i>	65
CAPÍTULO 5.....		72
CONCLUSÕES.....		72
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	72
5.2	REPRESENTAÇÃO DE SUPERFÍCIE	72
5.3	FORÇA DE COMPACTAÇÃO.....	73
5.4	ANÁLISE DA VÁLVULA DE ESFERA – ESTUDO DE CASO	74
5.5	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS.....		77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura i – Arranjo Submarino – Modelo Brasileiro [9].....	2
Figura 1-1 – Tipos de gaxeta referência Parker.....	7
Figura 1-2 – Conjunto de gaxetas “V”.	8
Figura 1-3 – Anel metálico tipo BX.	9
Figura 1-4 – O-ring em funcionamento.	10
Figura 1-5 – O-ring após dano por descompressão explosiva.....	11
Figura 1-6 – Gaxeta U com direção preferencial de vedação. A pressão tende a abrir os lábios e aumentar a carga de contato.	11
Figura 1-7 – Conexão NPT. A vedação é feita nos filletes da rosca cônica.....	12
Figura 1-8 – Conexão JIC. A rosca apenas exerce pressão da região lisa cônica que é responsável pela vedação.....	12
Figura 2-1 – Superfície rugosa típica.	15
Figura 2-2 – Microscópio AFM – PEMM/COPPE/UFRJ.....	19
Figura 2-3 – Microscópio AFM – PEMM/COPPE/UFRJ.....	19
Figura 2-4 – Chapa de aço AISI 8630 mod. III 75K de 3mm de espessura com acabamento 8 RMS utilizada na visualização no AFM.	21
Figura 2-5 – Superfície rugosa de uma chapa de aço AISI 8630 modII com acabamento 8 RMS obtido por lapidação.....	22
Figura 2-6 – Superfície considerada para o modelo 2D da superfície – razão 1x1. O detalhe mostra as “n” linhas consideradas interligando os pontos obtidos no AFM.	23
Figura 2-7 – Distribuição obtida para a superfície real (Caminho 1).....	27
Figura 2-8 – Ajuste Polinomial de ordem 9 – (Caminho 1).....	27
Figura 2-9 – Ajuste Por Fourier, 8 termos – (Caminho 1)	28

Figura 2-10 – Ajuste polinomial e Fourier – (Caminho 1).....	28
Figura 2-11 – Distribuição obtida para a superfície real (Caminho 1).....	29
Figura 2-12 – Ajuste Polinomial de ordem 9 (Caminho 2).....	29
Figura 2-13 – Ajuste Por Fourier, 8 termos (Caminho 2)	30
Figura 2-14 – Ajuste polinomial e Fourier (Caminho 2).....	30
Figura 2-15 – Pontos para Caminho 1 e Caminho 2.....	32
Figura 3-1 – Pontos obtidos a partir de ensaio de tração uniaxial.	35
Figura 3-2 – Regressão linear para determinação do módulo de elasticidade.....	36
Figura 3-3 – Comparação entre o modelo multilinear e a curva real do material.	37
Figura 3-4 – Geometria utilizada para Caminho 1.	38
Figura 3-5 – Geometria utilizada para Caminho 2.	38
Figura 3-6 – Superfícies em contato definidas.	39
Figura 3-7 – Condições de contorno consideradas.....	40
Figura 3-8 – Malha para os dois algoritmos, <i>medial axis</i> e <i>advancing front</i>	42
Figura 3-9 – Malha utilizada no modelo - Caminho 1.	44
Figura 3-10 – Malha utilizada no modelo - Caminho 1 - detalhe.....	45
Figura 3-11 – Sequência de compactação. O contorno apresentado é para tensões de von Mises. Interferência em mm - Caminho 1.	47
Figura 3-12 – Resultado da força compressiva entre as duas superfícies -Caminho1 ...	48
Figura 3-13 – Carga perimetral <i>versus</i> interferência - Caminho 1.....	49
Figura 3-14 – Sequência de compactação. O contorno apresentado é para tensões de von Mises. Interferência em mm - Caminho 2.	49
Figura 3-15 – Resultado da força compressiva entre as duas superfícies - Caminho 2.	50
Figura 3-16 – Carga perimetral <i>versus</i> interferência – Caminho 2.	50
Figura 3-17 – Comparação dos resultados para os dois caminhos.....	51

Figura 3-18 – Linhas que interliga os pontos da medição no AFM e suas divisões para discretização inicial e refinada.	52
Figura 3-19 – Malha normal – 1 elemento por linha da superfície.	52
Figura 3-20 – Malha refinada – 2 elementos por linha da superfície.	53
Figura 3-21 – Comparação da carga vertical para as duas discretizações.	53
Figura 3-22 – Comparação do Trabalho externo para as duas discretizações.	54
Figura 4-1 – Montagem de uma válvula esfera de bloqueio (topy entry)	55
Figura 4-2 – Sede de uma válvula de esfera- região pressurizada e setor onde a pressão atua ajudando a vedação.	57
Figura 4-3 – Esfera de uma válvula de esfera	58
Figura 4-4 – Modelo de atuador a)hidráulico com retorno por mola e b)manual.	59
Figura 4-5 – Esquema de contato entre sede e esfera utilizado para modelo de elementos finitos com os diâmetros de vedação.	62
Figura 4-6 – Dimensões principais e modelo das partes em contato do modelo de elementos finitos de sede com alojamento para o-ring.	62
Figura 4-7 – Dimensões principais e modelo das partes em contato do modelo de elementos finitos de sede sem alojamento para o-ring	63
Figura 4-8 – Discretização aplicada nas partes analisadas. Sede e esfera.	65
Figura 4-9 – Detalhe da discretização aplicada à região de contato entre sede e esfera.	65
Figura 4-10 – Força compressiva nas direções 1 e 2 para sede com alojamento para o-ring.	66
Figura 4-11 – Força perimetral para sede com alojamento para o-ring.	66
Figura 4-12 – Força compresiva nas direções 1 e 2 para sede sem alojamento para o-ring.	67
Figura 4-13 – Força perimetral para sede sem alojamento para o-ring.	67

Figura 4-14 – Comparação entre as duas cargas perimerais para os dois tipos de sede.	68
Figura 4-15 – Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede sem alojamento para o-ring.....	68
Figura 4-16 – Detalhe da região mais solicitada. Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede sem alojamento para o-ring.....	69
Figura 4-17 – Pressão (psi) de contato entre sede e esfera para sede sem alojamento para o-ring.	69
Figura 4-18 – Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede com alojamento para o-ring.....	70
Figura 4-19 – Detalhe da região mais solicitada. Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede com alojamento para o-ring.	70
Figura 4-20 – Pressão de contato (psi) entre sede e esfera para sede com alojamento para o-ring.....	71
Figura 5-1 – Direção atual e recomendada de lapidação entre sede e esfera.	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 - Erros obtidos a partir das aproximações (milímetros)	31
Tabela 3-1 - Características do material modelado – AISI 8630 mod. II – 75K.....	37
Tabela 3-2 - Parâmetros do deslocamento prescrito nos modelos.....	41
Tabela 3-3 - Parâmetros para solução numérica utilizados	46
Tabela 3-4 - Resultados da força perimetral máxima para compactação	51
Tabela 3-5 - Comparação do Trabalho Externo	54
Tabela 4-1 – Características do modelo de elementos finitos desenvolvido para a válvula	64
Tabela 4-2 – Resultados do modelo de elementos finitos para as válvulas.....	71

INTRODUÇÃO

A corrida pelo petróleo verificada no início do Século XXI é fruto da alta do petróleo, que bate recorde histórico até então, atingindo a marca de 78,63USD em 07 de Agosto de 2006 [1]. Essa corrida justifica investimentos cada vez mais volumosos na exploração submarina, onde se calcula que atualmente com a inserção de tecnologias desenvolvidas, especialmente nas duas últimas décadas, o custo de produção seja de 15USD o barril [1].

O crescimento da exploração submarina, praticada nos últimos 30 anos, transforma o leito submarino em um verdadeiro emaranhado de linhas de transporte e equipamentos. Algumas dessas linhas e as mais extensas são chamadas de linhas de exportação. Essas linhas têm função de transportar a produção submarina, de óleo ou gás, até uma refinaria terrestre ou mesmo até uma plataforma de rebombeio ou apenas para concentrar a produção de um campo. Essas linhas possuem quilômetros de extensão e vários pontos de acesso, seja para manutenção ou mesmo para derivações.

Existem equipamentos submarinos dedicados à interligação dos sistemas submarinos. Esses equipamentos são chamados de *Tie-In*. Entre eles merecem destaque os de segurança *ESDV* (*Emergency Shut Down Valve*), os de derivação simples *ILT* (*In-Line-Tee*), os de derivação múltipla *PLEM* (*Pipeline End Manifold*) e os de terminação de linhas *PLET* (*Pipeline End Termination*). Normalmente esses equipamentos possuem válvulas de bloqueio. O arranjo submarino é definido pela logística da produção que é permitida graças à existência dessas válvulas em pontos estratégicos de cada linha.

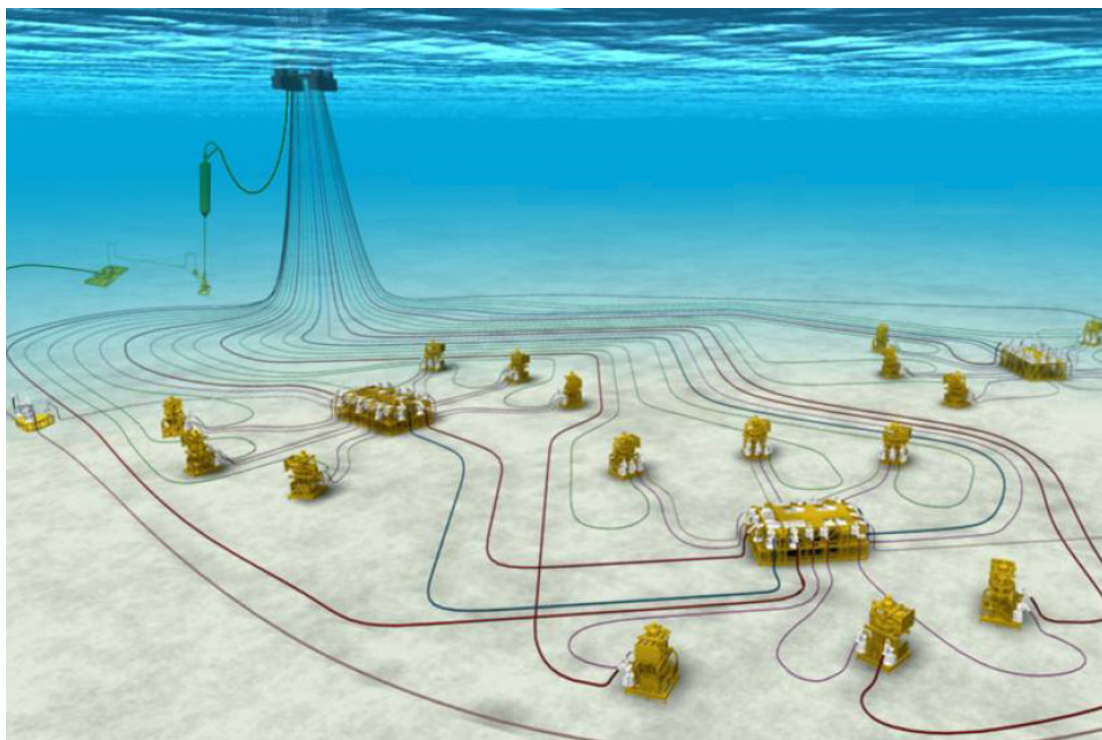


Figura i – Arranjo Submarino – Modelo Brasileiro [9]

Essas válvulas são de alta responsabilidade, pois sua falha pode implicar em acidentes com as embarcações na superfície, contaminação do ambiente marinho e perda de produtividade.

As válvulas de bloqueio mais utilizadas nos equipamentos de *Tie-In* são as válvulas de esfera. Essa escolha diz respeito à relação de tamanho entre as linhas e as válvulas. As linhas de exportação são geralmente grandes, maiores ou iguais a 8". A válvula de esfera é a que oferece melhor relação volume ocupado/passagem, sendo então preferida no lugar das válvulas de gaveta, sendo estas últimas mais comuns em árvores de natal e manifolds.

As válvulas de esfera são equipamentos de um quarto de volta com passagem por seção reta e vedação por meio de um setor circular entre um elemento esférico e sedes cilíndricas [2]. As válvulas de esfera apresentam vantagens em relação aos outros tipos de válvulas. As principais são:

- Operação mais simples
- Podem manter e regular fluxos com grandes volumes, pressões e temperatura.
- Permitem o reparo da válvula sem retirar o corpo da linha (*top entry valve*).
- Baixa relação volume ocupado/diâmetro da linha.

A vedação nas válvulas de esfera pode ser de três tipos: elastomérica, metal-metal e combinada.

Vedar nada mais é que ocupar os espaços pelos quais o fluido que se deseja confinar poderia passar. A vedação mais tradicional e usual é a chamada elastomérica, onde o elemento de vedação é um polímero que tem a propriedade de absorver grandes deformações ocupando os eventuais espaços vazios fruto das imperfeições das superfícies em contato.

Outro tipo de vedação é a metal-metal, onde dois metais estão em contato. Neste caso o nível de deformações observado é bem menor que no caso dos selos elastoméricos uma vez que o módulo de elasticidade dos metais utilizados é bem superior ao do polímero. A região do contato metal-metal nas válvulas de esfera ocorre entre a sede e esfera. Como o nível de deformações é menor que no caso do selo elastomérico, os desvios de fabricação devem possuir níveis bem menores.

O terceiro tipo de vedação é a combinada que, como o nome já diz, combina o elastômero e o metal-metal. O objetivo desta combinação é garantir a vedação em baixa pressão, região dominada pelo elastômero e passar para o domínio metal-metal conforme o aumento da pressão.

O objetivo desta dissertação é determinar como fatores de projeto e fabricação da válvula influenciam em sua característica de vedação, principalmente na região entre sede e esfera. Essa região é particularmente interessante, pois é ela a principal e primeira barreira que impede o vazamento do fluido de produção.

O principal fator para garantir a vedação é a força de contato radial, normalmente chamada apenas de força de contato. Esta será definida no trabalho e seu intuito é verificar se a pressão de trabalho é adequada para a compactação das imperfeições das superfícies de vedação de tal forma a impedir que o fluido escoe por entre os vazios. A compactação diz respeito ao esmagamento dos picos formados nas peças pelo seu processo de fabricação.

Para a avaliação dessa característica foi criado um modelo elastoplástico local para calibrar o valor de força de contato necessária para a compactação. Uma vez medida a força gerada nessa compactação e conhecido o comprimento considerado na análise, o valor da força por unidade de comprimento necessária para a compactação foi definido.

Para aplicar o parâmetro definido na análise local foi utilizado um modelo axissimétrico da região sede esfera para verificar a pressão de contato de acordo com fatores de projeto da válvula, como por exemplo, pré-carga, pressão de trabalho e tipo de sede. Foram consideradas sedes com vedação combinada e vedação metal-metal. O estudo de caso foi aplicado ao nominal de 8”, mas o procedimento pode ser repetido para qualquer outro nominal.

Para a verificação do perfil da superfície em contato entre sede e esfera utilizou-se um microscópio denominado AFM (*Atomic Force Microscope*) que permitiu uma leitura precisa e eficiente do “relevo” da peça. Os pontos gerados foram utilizados para representar a superfície que foi avaliada em sua resistência à compactação.

O método para avaliação dos modelos foi o dos elementos finitos através do pacote comercial ABAQUS. Foram utilizados modelos planos e axisimétricos com contato, todos sólidos deformáveis.

Os resultados foram comparados com projetos já existentes de válvulas para verificação do projeto e recomendações de métodos para maior garantia de vedação.

CAPÍTULO 1

PRINCÍPIOS, TIPOS E CARACTERÍSTICAS DAS VEDAÇÕES

Este capítulo define o objeto de estudo deste texto e explica os principais tipos e mecanismos de vedação aplicado na indústria.

1.1 Definição de vedação

Uma vedação pode ser definida como um impedimento mecânico ao fluxo de massa através de uma região denominada fronteira, definida pela região de contato entre duas superfícies. Para obter a vedação é necessário ocupar o espaço livre entre as duas superfícies em contato de forma que não exista caminho para o escoamento. Esse impedimento mecânico pode ser feito com a inserção de um selo entre as duas superfícies que se deseja vedar ou mesmo compactando uma superfície contra a outra.

Na maior parte dos casos a vedação está associada à grandes deformações. Isso porque a área de vedação, seja ela da própria peça ou do selo, se deforma com objetivo de uniformizar as imperfeições e diferenças de perfil das partes em contato.

Os selos podem ser metálicos, elastoméricos ou compósitos. Para o caso onde o selo é macio em relação a superfície da peça, este se deforma adaptando-se e acomodando o relevo da superfície que ele veda. Já quando o selo é mais rígido, como no caso de selos metálicos, este se deforma em conjunto com a própria superfície que se deseja vedar.

Quando se deseja obter a vedação sem utilização de selo optando pela compactação das duas superfícies a vedação é mais complexa. Tal complexidade se verifica por se tratar de uma vedação associada à forças mais altas de compactação. Isso ocorre porque um selo, mesmo metálico, é geralmente mais macio que as superfícies

que ele veda, justamente para assegurar a deformação onde este se adapta ao relevo de cada superfície.

1.2 Tipos de vedação

Uma vedação pode ser classificada de várias maneiras. A primeira delas é quanto ao movimento das superfícies em contato. Se essas superfícies apresentam movimento relativo, este tipo de vedação é chamado de vedação dinâmica. Já se as superfícies não apresentam esse tipo de movimentação o tipo de vedação entre elas é denominado estática.

1.2.1 Vedação dinâmica

Uma vedação dinâmica deve garantir o impedimento mecânico ao fluxo quando as superfícies de vedação apresentam movimento relativo. Esse movimento relativo concede ao selo um desgaste bastante elevado. O selo deve ser dimensionado para vedar com segurança porém sem apresentar uma carga compressiva muito elevada, pois isso aumentaria as tensões cisalhantes durante o movimento relativo de suas superfícies diminuindo sua vida útil.

O tipo de selo mais utilizado com esse propósito é o elastomérico por meio de o-rings ou gaxetas U e V. Um exemplo de gaxetas V pode ser visto na Figura 1.1. Entre as aplicações de vedação dinâmica destacam-se as turbomáquinas.

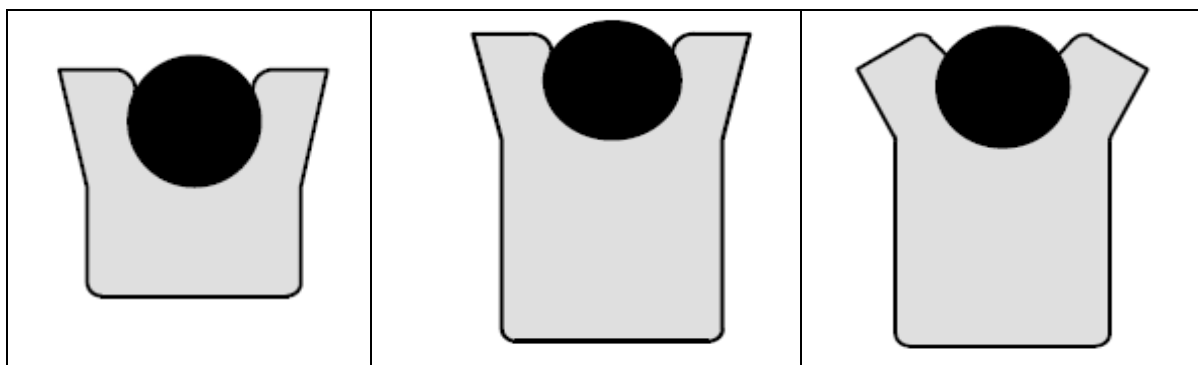


Figura 1-1 – Tipos de gaxeta referência Parker.

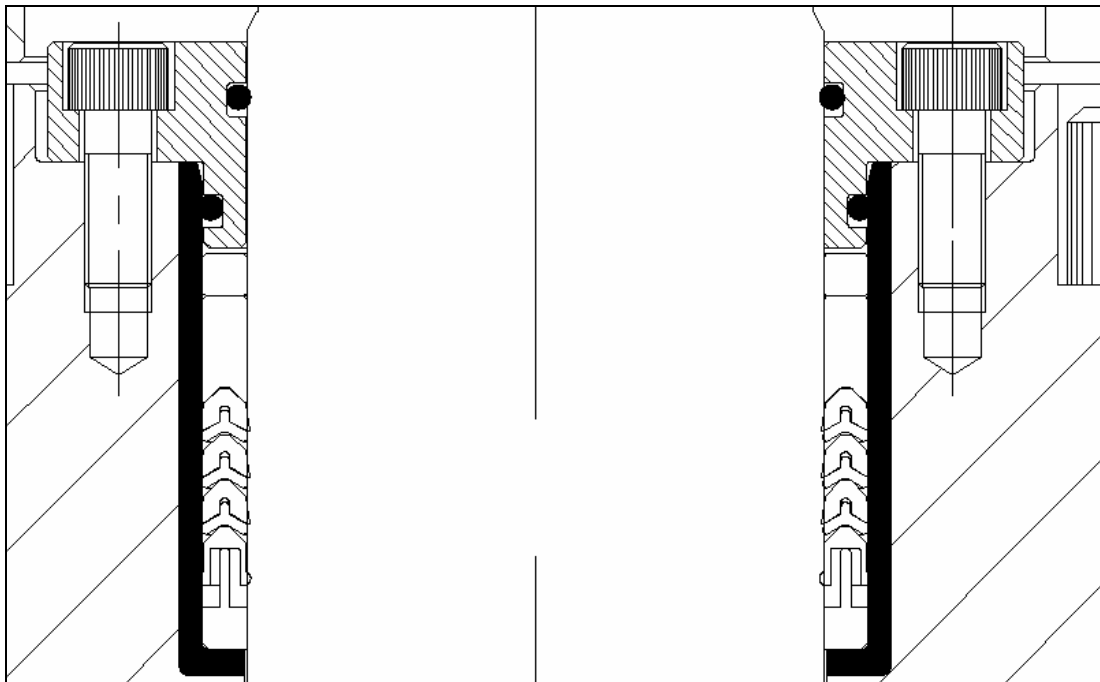


Figura 1-2 – Conjunto de gaxetas “V”.

1.2.2 Vedação estática

Uma vedação estática deve garantir o impedimento mecânico ao fluxo quando as superfícies de vedação não apresentam movimento relativo. Nesse caso não há requisito de resistência ao cisalhamento uma vez que a única carga aplicada no selo ou entre as superfícies em vedação é a compressiva. Os tipos de selos mais utilizados com esse propósito são os elastoméricos e os metálicos por meio de o-rings ou anéis metálicos respectivamente. Um exemplo de vedação estática pode ser encontrado nos vasos de pressão.

Um exemplo de anel metálico pode ser visto nos flanges API onde destaca-se o anel BX, largamente utilizado na indústria do Petróleo. Um selo BX é visto na Figura 1.3.

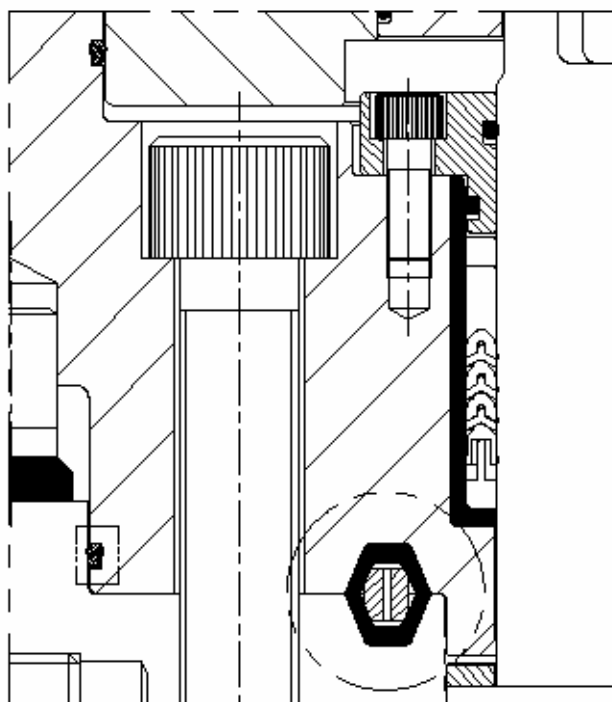


Figura 1-3 – Anel metálico tipo BX.

1.3 Tipos de selos

1.3.1 O-rings

Um o-ring é constituído a partir de um toróide de material elastomérico. Sua seção circular quando em contato com superfícies planas apresenta contato inicial de uma linha. Com a compressão, o o-ring se deforma se transformando em uma elipse. Durante esse esmagamento, o selo se acomoda nas superfícies adjacentes ocupando o espaço por onde antes o fluxo poderia passar. Esse esmagamento e a sua acomodação à pressão podem ser vistas na Figura 1.4

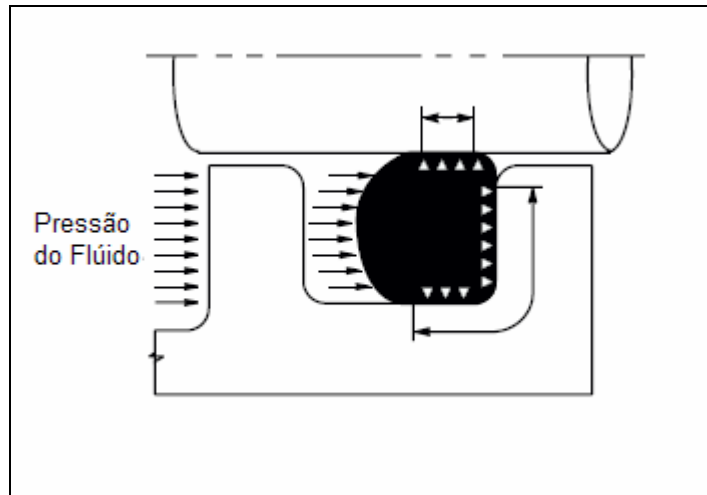


Figura 1-4 – O-ring em funcionamento.

Um o-ring pode sofrer extrusão de seu alojamento caso este seja submetido à uma pressão diferencial bastante elevada. Para evitar esse efeito, é muito comum combinar com o o-ring um anel anti-extrusão. O anel anti-extrusão deve ser de material mais rígido que o o-ring para servir de apoio e aparar o o-ring evitando que esse extrude através da folga entre as peças que ele veda.

Quando o-rings são aplicados para vedação de gás este deve ser selecionado de composto especial para evitar o fenômeno de explosão por decompressão. Esse fenômeno ocorre pois alguns materiais mais macios de o-ring acumulam em sua periferia, porém internamente ao selo, uma parcela do gás que ele está vedando por conta da alta pressão. O gás é forçado para dentro do material do selo, porém não é suficiente para atravessá-lo, justamente por conta da compressão do selo nas superfícies em que ele está compactado. Quando a pressão é subitamente retirada, o volume do gás entranhado no selo aumenta consideravelmente, gerando o dano do o-ring. Selos para trabalhar com altas pressões de gás devem ser fabricados em materiais que resistam à esse fenômeno. Na figura 1.5 o dano ao o-ring fruto dessa decompressão pode ser visto.

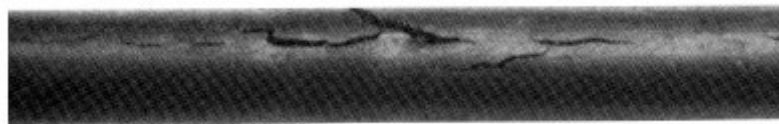


Figura 1-5 – O-ring após dano por descompressão explosiva.

1.3.2 Gaxetas U e V

As gaxetas possuem direção preferencial de vedação. A pressão de contato de seus lábios é aumentada conforme o aumento de pressão. As gaxetas utilizam um anel, que pode ser metálico no centro de seus lábios para sua energização inicial. Na Figura 1.6 a direção preferencial de vedação e os lábios posicionados são mostrados.

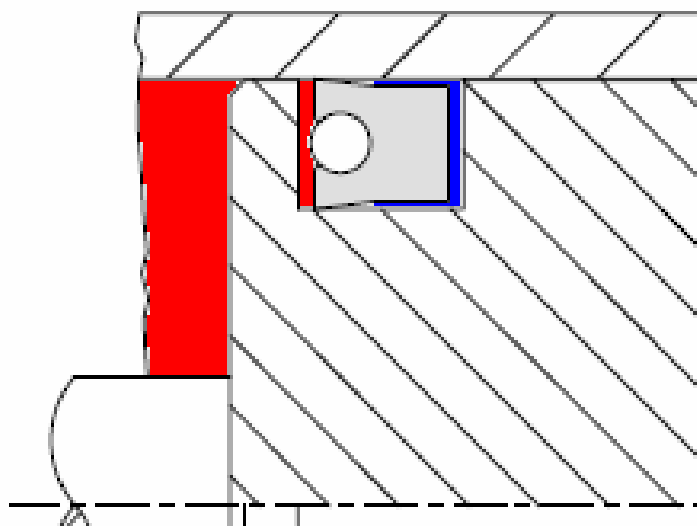


Figura 1-6 – Gaxeta U com direção preferencial de vedação. A pressão tende a abrir os lábios e aumetar a caraga de contato.

1.3.3 Vedações metálicas

As vedações metálicas são caracterizadas por necessitarem de uma pré-carga elevada para gerar a interferência necessária à vedação se comparada à um selo elastomérico. Outra característica é a necessidade de acabamento superficial melhor do que o necessário em vedações elastoméricas. As vedações metálicas são bem aplicadas

por meio de anéis metálicos e por conexões hidráulicas. Dentre as conexões mais usuais destacam-se a NPT e a JIC, amplamente utilizadas na indústria do Petróleo.

A NPT é um tipo de conexão onde a vedação é obtida na rosca. A rosca NPT possui conicidade que faz com que a pré-carga aplicada seja transformada em compressão das superfícies dos filetes.

A conexão JIC (SAE 37°) é baseada no contato de faces, também cônicas, mas sem haver vedação na rosca. Esta assume apenas função de fornecer pré-carga para a compactação das superfícies. Um exemplo de conexão NPT pode ser visto na Figura 1.7 e uma conexão JIC na Figura 1.8.

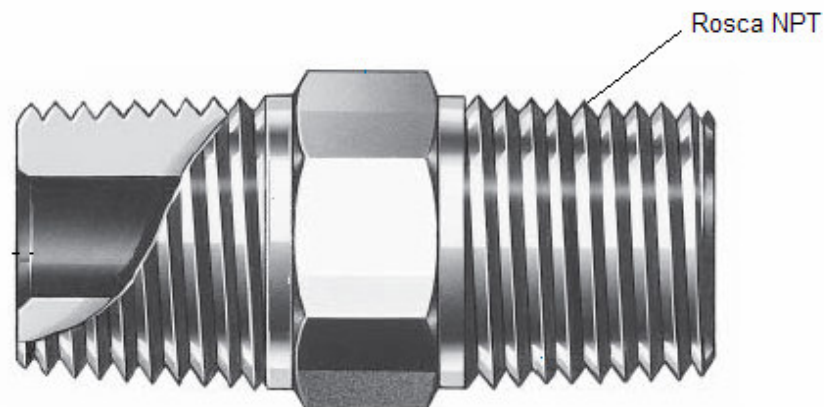


Figura 1-7 – Conexão NPT. A vedação é feita nos filletes da rosca cônica.

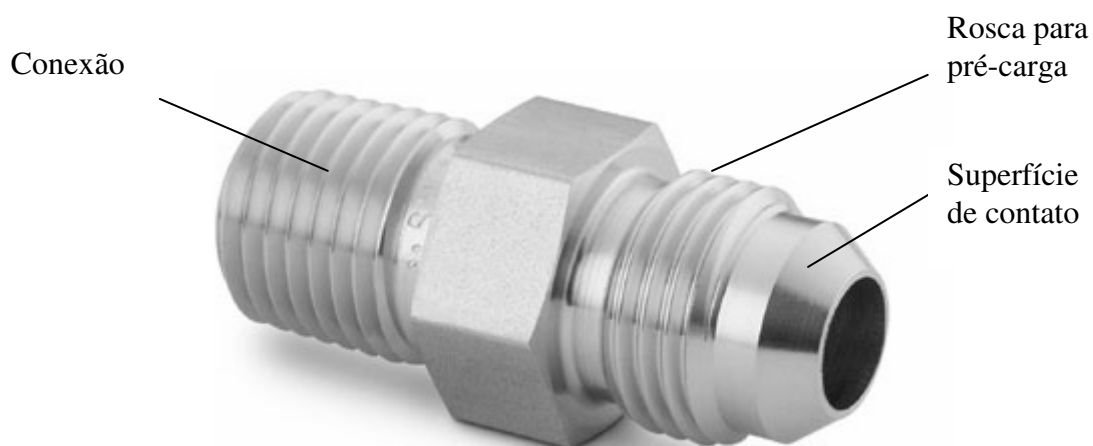


Figura 1-8 – Conexão JIC. A rosca apenas exerce pressão da região lisa cônica que é responsável pela vedação.

1.4 Aspectos necessários à vedação

Para se estabelecer uma vedação alguns parâmetros são necessários e fundamentais para um bom desempenho. Os principais aspectos são listados abaixo.

- Acabamento superficial
- Tolerância dimensional
- Tolerância de forma
- Elasticidade das partes em contato
- Fluido que se deseja vedar

O estudo de caso desenvolvido se concentrará no acabamento superficial e nas tolerâncias de forma.

1.4.1 Acabamento superficial

A contribuição do acabamento superficial para a vedação está associada à compactação e eliminação dos espaços vazios através dos quais o fluido pode passar. Quando esses espaços são eliminados tem-se a vedação.

Chama-se de rugosidade a irregularidade das superfícies com cristas e reentrâncias que definem o perfil da superfície [3].

A forma de medição da rugosidade e caracterização da superfície é tema do Capítulo 2 deste texto.

CAPÍTULO 2

MODELO DE SUPERFÍCIE RUGOSA

Este capítulo aborda o método de caracterização da superfície rugosa necessário para a generalização da metodologia aplicada à análise da compressão de superfícies metálicas.

2.1 Acabamento Superficial

O acabamento superficial é caracterizado pelo processo de fabricação da peça. Para os principais componentes metálicos, o processo em questão é a usinagem. O acabamento no caso da usinagem é definido pelos parâmetros de corte – profundidade de corte, velocidade de avanço – bem como o perfil da ferramenta de corte. O principal carregamento envolvido na operação de corte é o cisalhante da superfície em usinagem. A superfície usinada possui vales e picos que definem a rugosidade da superfície [3].

A rugosidade superficial é de importância crítica em uma gama de aplicações tribológicas. Por exemplo em mancais de rolamento a razão da espessura de filme de fluido com a altura da asperidade das superfícies em contato são determinantes na vida útil dos componentes [4].

Entretanto, é na vedação de juntas metálicas como as encontradas em flanges, pórticos de teste, conexões hidráulicas e válvulas que o acabamento superficial apresenta grande significância [4].

Uma superfície usinada consiste de linhas de material com os vales e picos orientados na direção da usinagem. Segundo SULLIVAN *et al* [4] estima-se que quando superfícies metálicas são utilizadas como elementos de vedação apenas de 10% a 20% da área permanece em contato. A vedação é então dependente de como o fluido pode ser “aprisionado” na superfície restante.

2.1.1 Modelo da Superfície

A qualidade da superfície pode ser medida a partir de vários métodos. Todos eles definem um valor médio e ponderam o afastamento de cada pico e vale distante deste valor médio. Combinando este desvio, define-se uma grandeza que representa o acabamento superficial.

Para este texto a qualidade da superfície foi medida a partir da média RMS (*Root-Mean-Square*). Essa medida considera a linha média, os vales e picos referentes às imperfeições da superfície. Um exemplo de uma superfície com seus picos e vales pode ser encontrada na Figura 2-1. A Equação 2.1 mostra como é calculado o valor da média RMS de acordo com os valores utilizados.

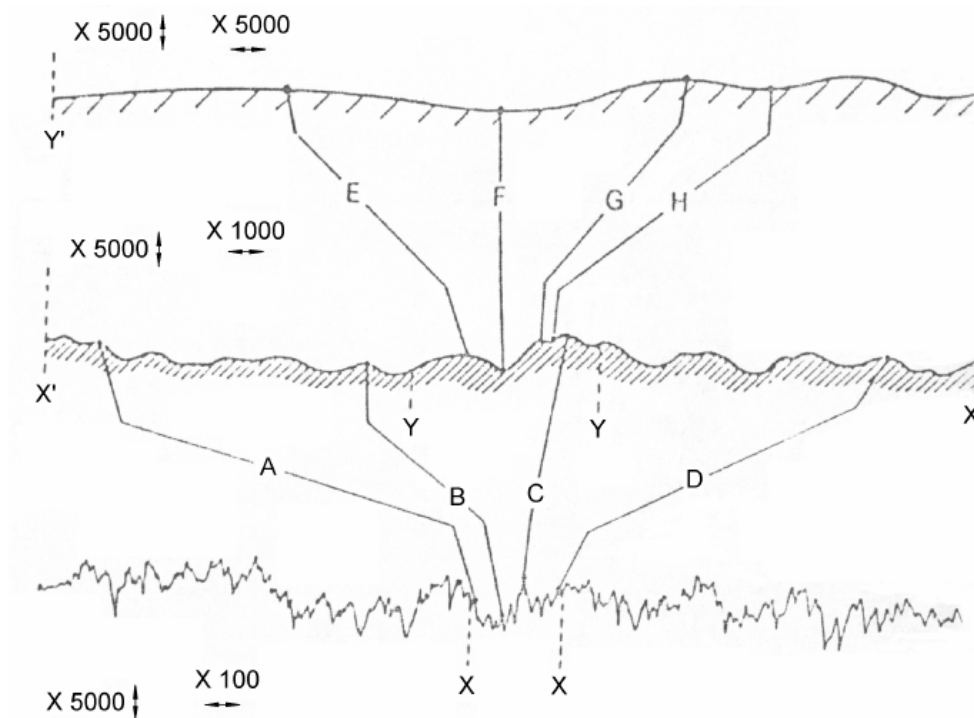


Figura 2-1 – Superfície rugosa típica.

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad \text{Eq.2.1}$$

Onde:

x_n = enésimo desvio da linha média, positiva (pico) ou negativa (vale)

n = número de pontos considerados.

A superfície analisada considerou a superfície com acabamento 8 RMS, por se tratar do acabamento praticado na vedação metálica do estudo de caso apresentado no Capítulo 4. O perfil da superfície foi medido a partir de ensaio em um microscópio de força atômica (*Atomic Force Microscope – AFM*) que foi capaz de determinar os picos e vales existentes. O equipamento que normalmente faria este papel é o perfilômetro. O microscópio AFM foi escolhido no lugar de um perfilômetro para minimizar a influência do contato da ponta do instrumento de medição com a superfície. Um perfilômetro possui força de contato na ordem de micro-Newton. Já o Microscópio AFM trabalha com forças de contato na ordem de nano-Newton [5].

A influência do equipamento de medição é relevante pois o contato necessário para o registro de cada pico pode deformar a superfície medida, deixando-a diferente da remanescente após a medição.

2.1.2 Microscópio AFM

O perfil de uma superfície pode ser obtido por métodos quantitativos como o rugosímetro, o perfilômetro, o microscópio de força atômica (AFM) ou por métodos qualitativos como a sensação tátil, a lupa estereoscópica, o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

No estudo desenvolvido nesta dissertação o método utilizado foi o quantitativo obtido através de microscópio AFM.

Um AFM é composto basicamente por uma ponta ou sonda, que varre a superfície da amostra em estudo. Mede-se a força de interação entre os átomos da ponta e os da superfície e, utilizando recursos computacionais, os resultados são transformados em imagens da amostra.

O AFM opera medindo as forças entre a ponteira e a amostra que dependem, em parte, da natureza da amostra e da ponteira, da distância entre elas, da geometria da ponteira, e de qualquer contaminação que houver sobre a superfície da amostra.

Essas forças são de vários tipos, mas fundamentalmente resumem-se a forças atrativas de van der Waals – de origem química – que agem a distâncias entre 100 e algumas unidades de nanômetros ($1 \text{ nanômetro} = 10^{-9} \text{ metros}$) e forças repulsivas que provêm do princípio de exclusão de Pauli e que agem quando a ponta aproxima-se muito da superfície e os átomos da sonda e da amostra estão tão próximos que começam a se repelir. Esta repulsão eletrostática enfraquece a força atrativa a medida que a distância diminui e acaba anulando-a quando a distância entre átomos é da ordem de alguns ângströms (da ordem da distância característica de uma união química). Quando as forças se tornam positivas, podemos dizer que os átomos estão em contato e as forças repulsivas acabam por dominar.

A força é calculada pela deflexão da micro-alavanca, *cantilever*, (de constante k de elasticidade de mola predeterminada) através da lei de Hooke $F = -k x$, sendo x o deslocamento do *cantilever*. O *cantilever* tem duas propriedades importantes: a constante de elasticidade da mola e sua frequência de ressonância. A constante de mola determina a força entre a ponteira e a amostra quando estão próximas. O seu valor depende da geometria e do material utilizado na construção do *cantilever*. A escolha do *cantilever* é sem dúvida muito importante pois são necessárias grandes deflexões para atingir alta sensibilidade.

No AFM convencional, um detetor capta a deflexão do *cantilever*. O método de detecção por luz é muito sensível a asperezas na superfície da amostra. Entretanto, traz a desvantagem de que o *cantilever* pode esquentar, mudando sua reflexão. Por isso, utiliza-se, em geral, um laser de HeNe que garante aquecimento desprezível. Quando o

cantilever se move, devido à mudanças na topografia da amostra, a luz que ele reflete se move sobre o fotodetector. O quanto o *cantilever* se moveu pode ser calculado a partir da diferença na intensidade de luz nos setores do fotodetector. As mudanças na saída do fotodetector são também utilizadas para realimentação, isto é, para ajustar uma cerâmica piezelétrica na direção vertical z , cujo valor é registrado em função das coordenadas (x,y) , para depois ser traduzido em topografia $z(x,y)$. As coordenadas x,y também são monitoradas através de voltagens aplicadas a cerâmicas piezelétricas colocadas nos drives x,y do scanner, assim como em z . O controle de movimentos em distâncias tão pequenas é possível graças ao uso dessas cerâmicas piezelétricas. Estes materiais comportam-se de forma tal que ocorre uma mudança em suas dimensões quando neles é aplicado um campo elétrico.

Globalmente, os modos de fazer imagens podem ser classificados como: contato, contato intermitente e não-contato, dependendo das forças entre a ponteira e a amostra. Quando o aparelho é operado na região atrativa, o método chama-se não-contato. Nesta região, o *cantilever* de AFM se enverga na direção da amostra. A operação na região repulsiva chama-se contato e o *cantilever* se dobra, afastando-se da amostra. O contato intermitente se produz quando o *cantilever* é forçado a oscilar a certa frequência, próxima a de ressonância, e a certa altura da amostra, de forma tal que periodicamente ele toca a amostra. Ou seja, a força que age nesta forma de operação é às vezes atrativa e às vezes repulsiva.

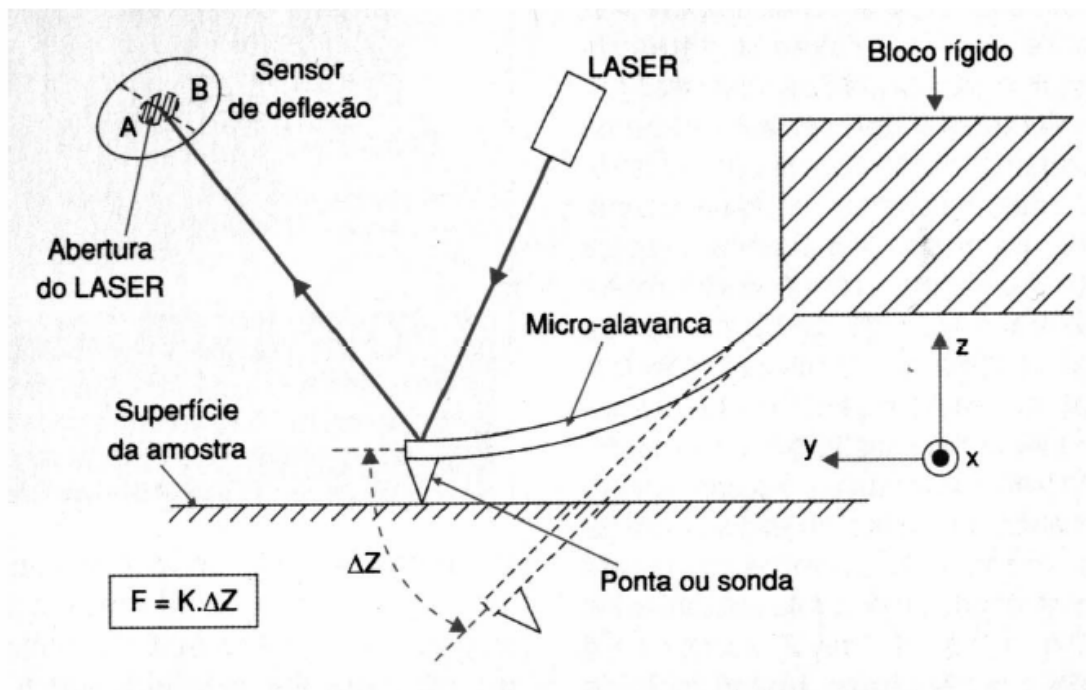


Figura 2-2 – Microscópio AFM – PEMM/COPPE/UFRJ.

A Figura 2-3 mostra o microscópio de AFM utilizado.

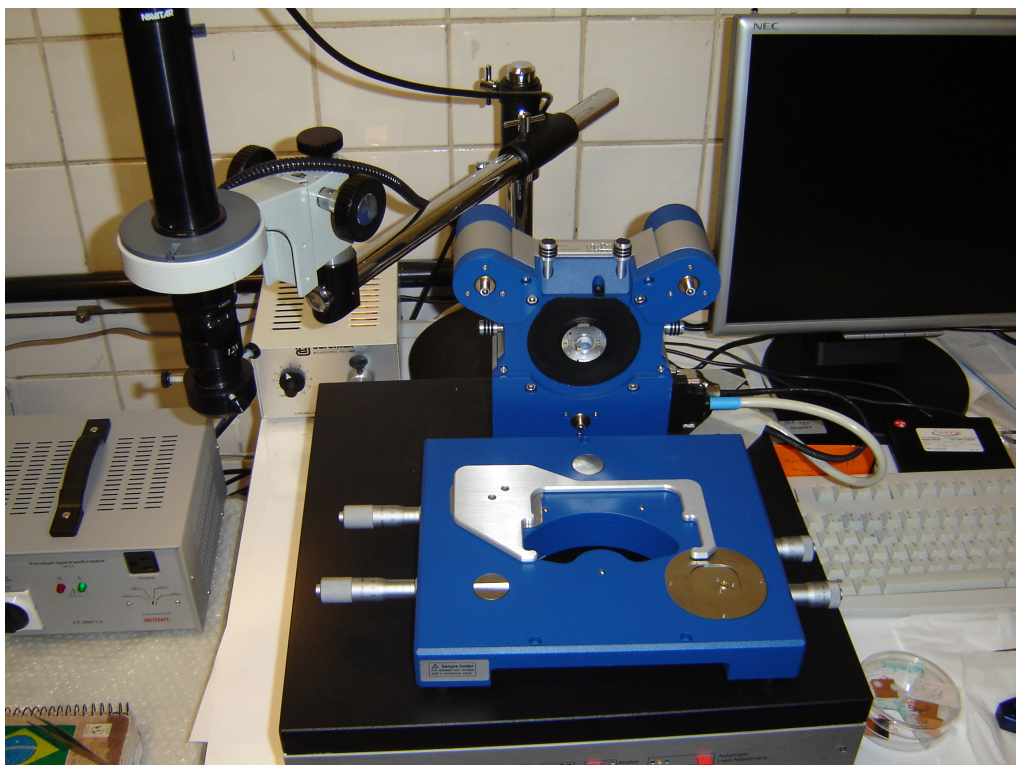


Figura 2-3 – Microscópio AFM – PEMM/COPPE/UFRJ.

2.2 Análise da Superfície

Existem várias maneiras conhecidas na literatura para se caracterizar e representar uma superfície rugosa. Neste estudo o modelo real medido será comparado com algumas aproximações matemáticas que permitem aproximar a superfície desejada por uma função.

2.2.1 Modelo Fractal da Superfície

Um modelo fractal poderia ser utilizado para representar uma superfície rugosa conforme proposto por WANG e KOMVOPOULUS [6] através de uma função bidimensional de alturas, $z(x)$, conforme mostrado na Equação 2.1.

$$z(x) = L_x \left(\frac{G}{L_x} \right)^{D-1} \sum_{n=0}^M \frac{\cos\left(\frac{2\pi\gamma^n x}{L_x}\right)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad \text{Eq 2.1}$$

Onde:

L_x - comprimento do trecho modelado na direção x.

G – Parâmetro de rugosidade do modelo fractal.

D – Dimensão do Fractal ($1 < D < 2$)

γ - Parâmetro de escala ($\gamma > 1$) baseado na planicidade da amostra

Segundo TAO *et al* [7], o modelo fractal pode ser aproximado por vários modelos matemáticos, levando assim à uma função mais simples de se trabalhar mantendo a boa representatividade.

No estudo desenvolvido para esta dissertação foi aplicada abordagem semelhante à de TAO *et al* [7]. A diferença é que TAO *et al* [7] faz a hipótese de que a função de alturas fruto do modelo fractal apresentado na Equação 2.1 corresponde à uma superfície real. No caso apresentado nesta dissertação, a superfície real considerada será a medida pelo microscópio AFM.

2.2.2 Superfície real medida no AFM

A superfície considerada para a análise foi a obtida por lapidação e a qualidade a mesma utilizada na vedação metálica de válvulas de esfera submarinas, justamente pelo interesse do estudo de caso apresentado no Capítulo 4 deste texto.

2.2.3 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado foi uma chapa de aço AISI 8630 mod.II 75K de 3mm de espessura preparada com acabamento 8 RMS obtido por lapidação. Na Figura 2-4 o corpo de prova utilizado pode ser visto.



Figura 2-4 – Chapa de aço AISI 8630 mod. III 75K de 3mm de espessura com acabamento 8 RMS utilizada na visualização no AFM.

Com a utilização do microscópio AFM o corpo de prova foi examinado e sua superfície registrada sob forma de imagem tridimensional como pode ser vista na Figura 2-5.

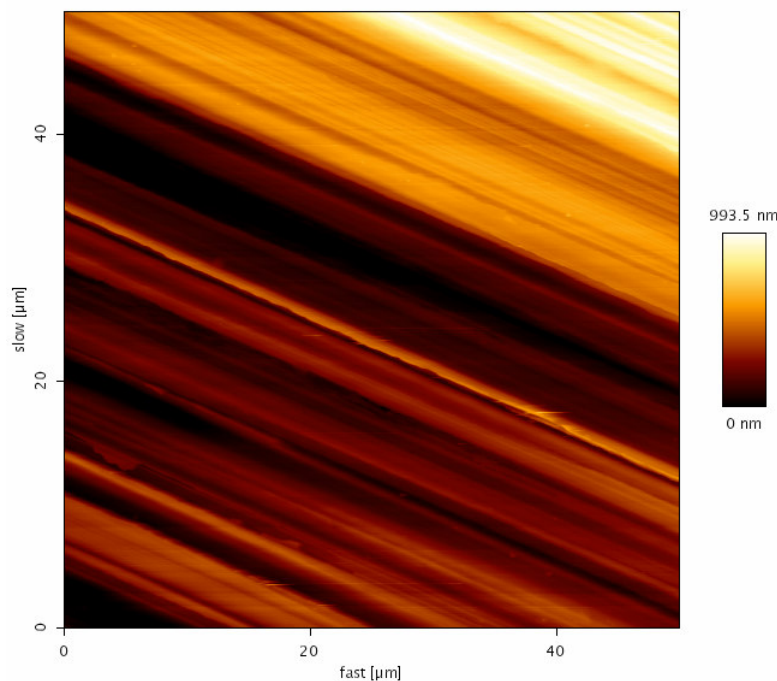


Figura 2-5 – Superfície rugosa de uma chapa de aço AISI 8630 modII com acabamento 8 RMS obtido por lapidação.

Conforme mostrado na imagem da Figura 2-5 existe uma direção preferencial ainda remanescente fruto da última operação de usinagem. Dessa forma, as cristas e vales principais podem ser identificadas. Escolhe-se um “caminho” perpendicular as linhas deixadas pela usinagem. Claramente essa é a direção em que a superfície é mais sinuosa. O software do microscópio AFM permite a exportação dos pontos indicando o passo e cada valor de “altura” a partir de uma referência.

2.2.4 Representação da Superfície Rugosa Real

Na superfície medida com o AFM foi escolhido o caminho desejado e este foi representado como pontos em arquivo *.txt* gerado pelo próprio software do microscópio AFM. Esses pontos foram importados para software de CAD e a partir deles foi criado o arquivo da superfície 2D conforme mostrado na Figura 2-6.

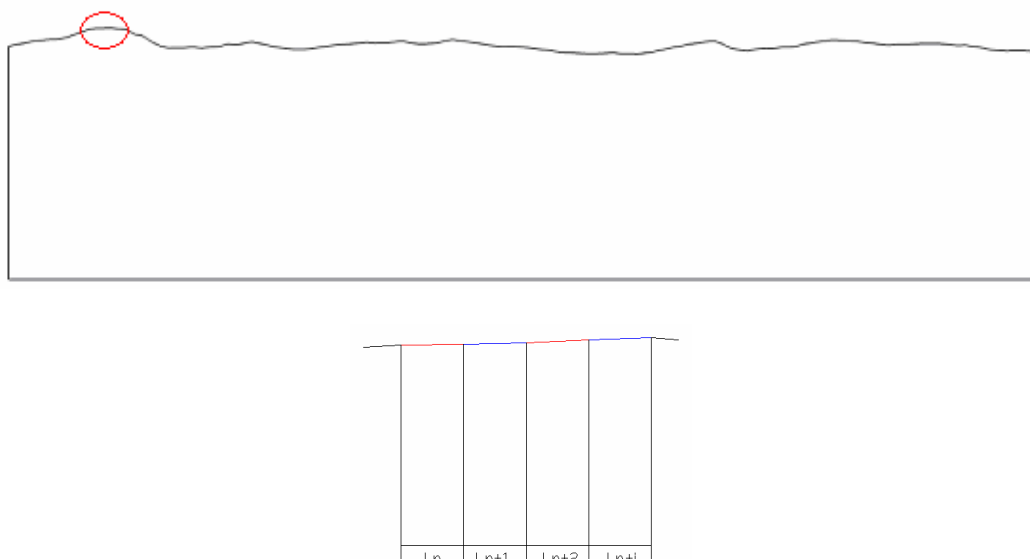


Figura 2-6 – Superfície considerada para o modelo 2D da superfície – razão 1x1. O detalhe mostra as “n” linhas consideradas interligando os pontos obtidos no AFM.

Para executar a comparação da superfície real com a superfície ajustada utiliza-se a representação gráfica conforme mostrado na Figura 2.1

2.3 Ajuste da Superfície

Existem vários modelos matemáticos para se aproximar uma determinada curva ou distribuição de pontos. Dentre elas se destacam a regressão polinomial e as séries de potências. Com o objetivo de caracterizar a superfície, aplicou-se o ajuste de forma a identificar qual deles mais se aproximava da real superfície medida. O intuito de determinar um modelo matemático para a superfície é mostrar como é possível extrapolar o comportamento de uma pequena região medida para toda a superfície destinada à vedação por compressão.

2.3.1 Ajuste por Fourier

Existe uma enorme diferença entre trabalhar com séries de Fourier e séries de potências, pois uma série de Fourier funciona como um processo global enquanto que uma série de potências é local.

Com a série de Taylor de uma função f , obtem-se o polinômio de Taylor que fornece uma boa aproximação para a função f nas vizinhanças de um ponto, mas com a exigência de se tratar de uma função suficientemente suave, ou seja, que f possua derivadas contínuas até uma certa ordem dada, tanto no ponto como nas vizinhanças deste. Para obter um processo de aproximação global, este método falha pois a aproximação de Taylor é local e não global [8].

Para e aplicar séries de Fourier algumas hipóteses devem ser consideradas:

1. $f : R \rightarrow R$ é periódica se existe um número $p \in R$ tal que para todo

$$x \in R: f(x + p) = f(x)$$

2. $f : R \rightarrow R$ deve ser absolutamente integrável sobre um intervalo $[a,b]$:

$$\int_a^b |f(u)| \cdot du < \infty$$

Seja $f(x) = f(x + 2\pi)$ uma função integrável sobre o intervalo $[-\pi, \pi]$ e $n \in N$.

A série de Fourier convergente de f é dada por:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n.x) + b_n \sin(n.x)] \quad \text{Eq 2.2}$$

Onde a_0, a_n e b_n são os coeficientes de Fourier de f definido por:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x).dx \quad \text{Eq 2.3}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x). \cos(n.x).dx \quad \text{Eq 2.4}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x). \sin(n.x).dx \quad \text{Eq 2.5}$$

A formulação apresentada é válida para uma função f contínua. No caso dessa dissertação a superfície é representada a partir de pontos discretos e portanto a forma correta de abordagem é utilizando a forma discreta da série de Fourier. A forma discreta

da série de Fourier altera apenas as equações 2.3, 2.4 e 2.5 que substitui o símbolo de integral pelo de somatório.

2.3.2 Ajuste Polinomial

O ajuste polinomial é talvez o mais conhecido e o mais simples. Sua grande vantagem está na facilidade de se integrar e derivar um polinômio e na certeza de se obter outro polinômio fruto dessas operações. O ajuste polinomial é da forma apresentada pela Equação 2.6 [8].

$$P_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad \text{Eq 2.6}$$

Onde n é um número inteiro não negativo e que representa o grau do polinômio e $a_0, \dots, a_n$ são constantes reais.

Os polinômios de Taylor são muito importantes na análise numérica, porém, da mesma forma que nas séries, eles são eficazes pra um ponto e suas vizinhanças. Um ajuste polinomial requer que a aproximação seja eficaz em toda a extensão da sequência avaliada.

O teorema da aproximação de Weierstrass enuncia a hipótese necessária para a aplicação da aproximação polinomial[8]:

1. Seja f definida e contínua em $[a,b]$. Para cada $\varepsilon > 0$, existe um polinômio $P(x)$ com a propriedade: $|f(x) - P(x)| < \varepsilon$, para todo x em $[a,b]$.

A partir da primeira hipótese o ajuste por polinômios não poderia ser aplicado, pois a distribuição da superfície é discreta. Fez-se necessária uma segunda hipótese para que o método pudesse ser utilizado.

1. A superfície pode ser descrita por meio de uma função suave contínua contendo todos os pontos da superfície e que entre cada dois pontos consecutivos a derivada dessa função não mude de sinal.

2.3.3 Comparação dos ajustes

Os ajustes por série de Fouier e Polinomial foram aplicados aos pontos obidos que representam a superfície real rugosa de interesse. S dados foram ajustados utilizando o *Toolbox* do MATLAB “*Curve Fitting*”. Os ajuste polinomial foi de 9º ordem e o pela série de Fourier com 8 termos.

Na seção 2.2.3 explicou-se que a partir do resultado da medição do AFM, vários perfis de linha ou “caminhos” poderiam ser obtidos. Assim, buscando sempre caminhos perpendiculares à linha preferencial da usinagem final, dois caminhos foram escolhidos, principalmente por fornecerem um perfil aparentemente diferente, porém dentro do permitido para a qualidade especificada. Nas figuras 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 os pontos e as aproximações referentes ao Caminho 1 são apresentados.

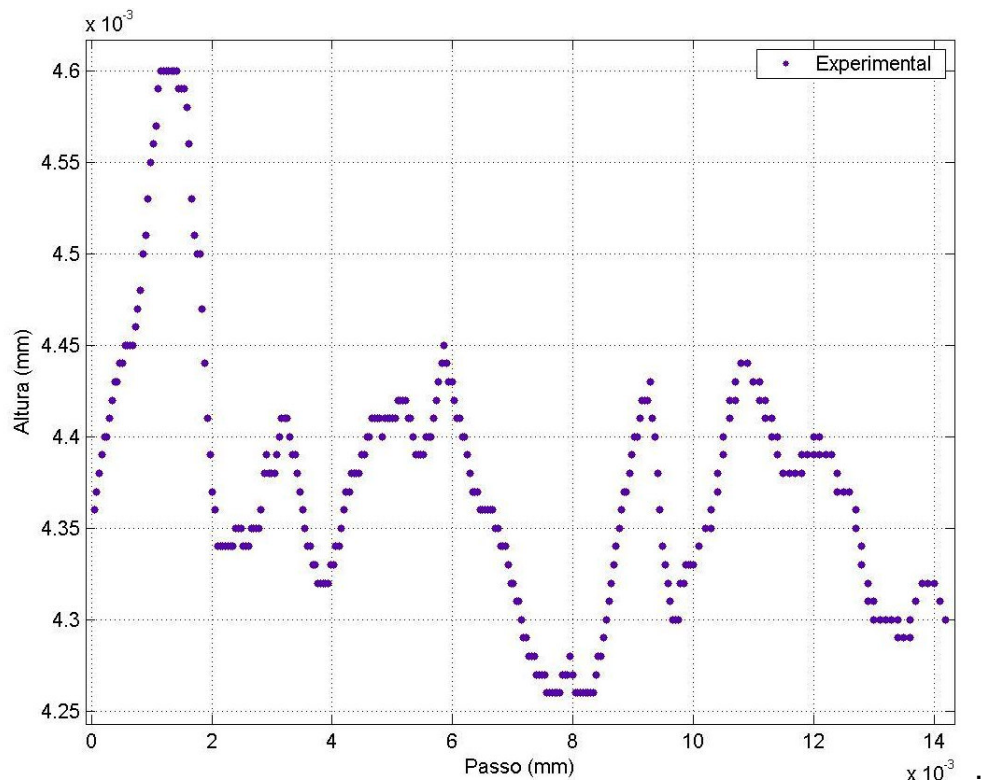


Figura 2-7 – Distribuição obtida para a superfície real (Caminho 1)

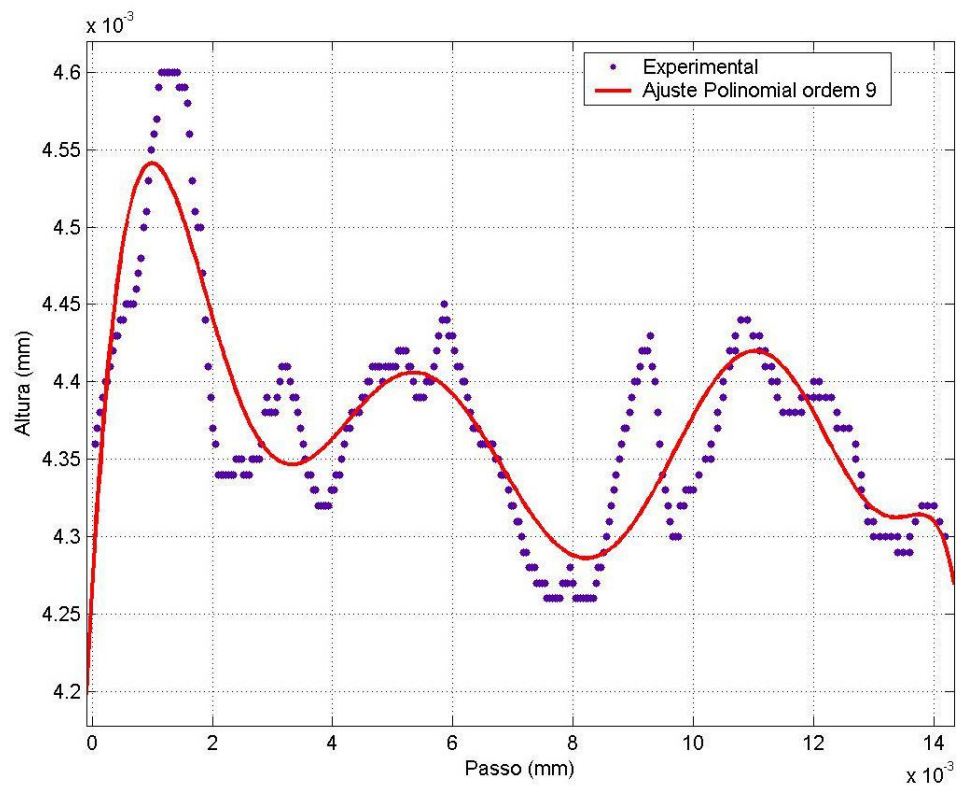


Figura 2-8 – Ajuste Polinomial de ordem 9 – (Caminho 1)

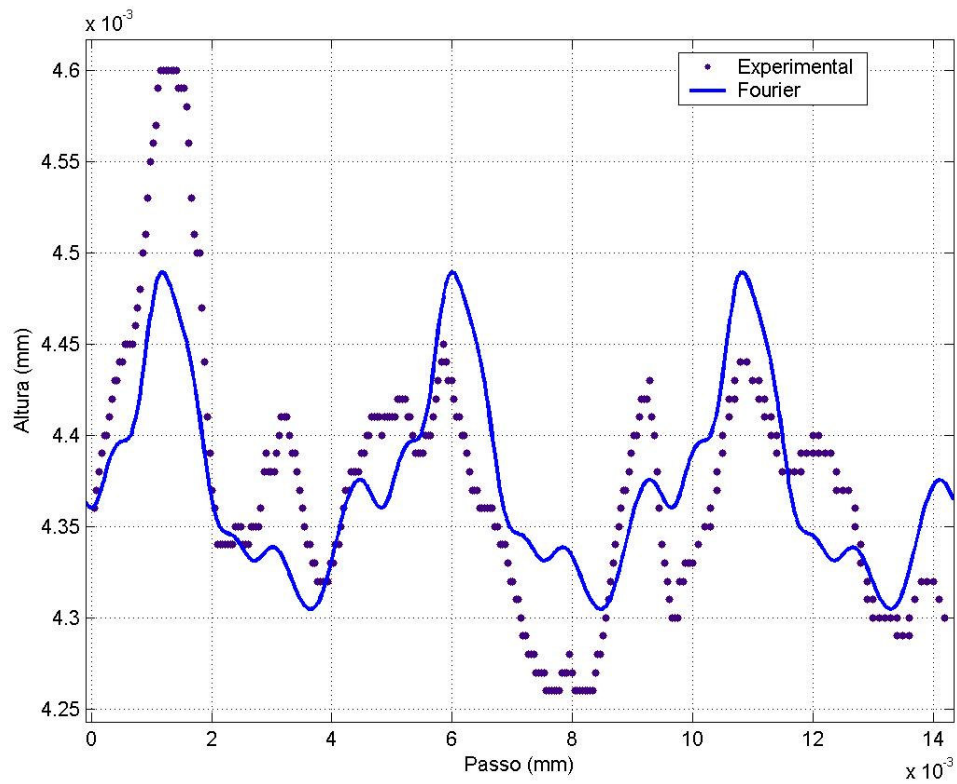


Figura 2-9 – Ajuste Por Fourier, 8 termos – (Caminho 1)

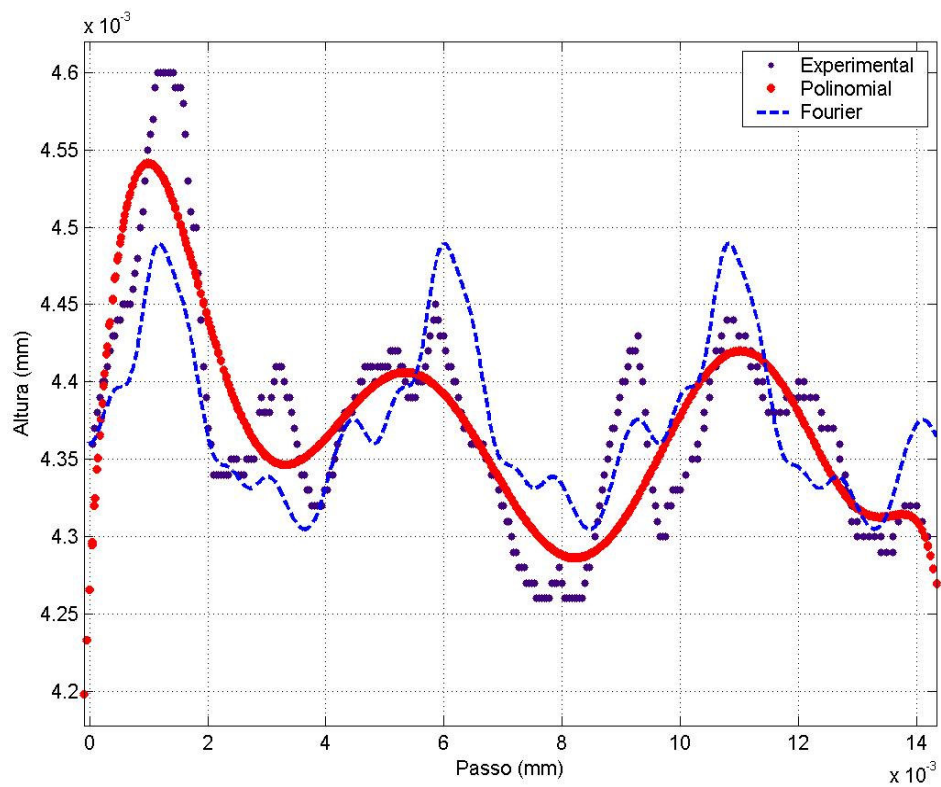


Figura 2-10 – Ajuste polinomial e Fourier – (Caminho 1)

As figuras 2.11, 2.12, 2.13 e 2.14 apresentam os pontos e as aproximações para o Caminho 2.

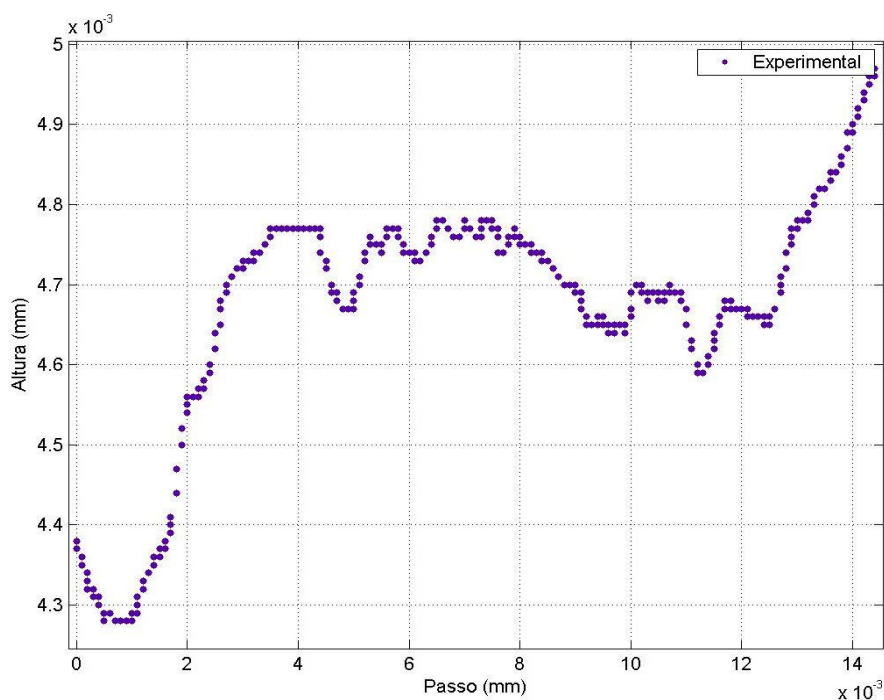


Figura 2-11 – Distribuição obtida para a superfície real (Caminho 1)

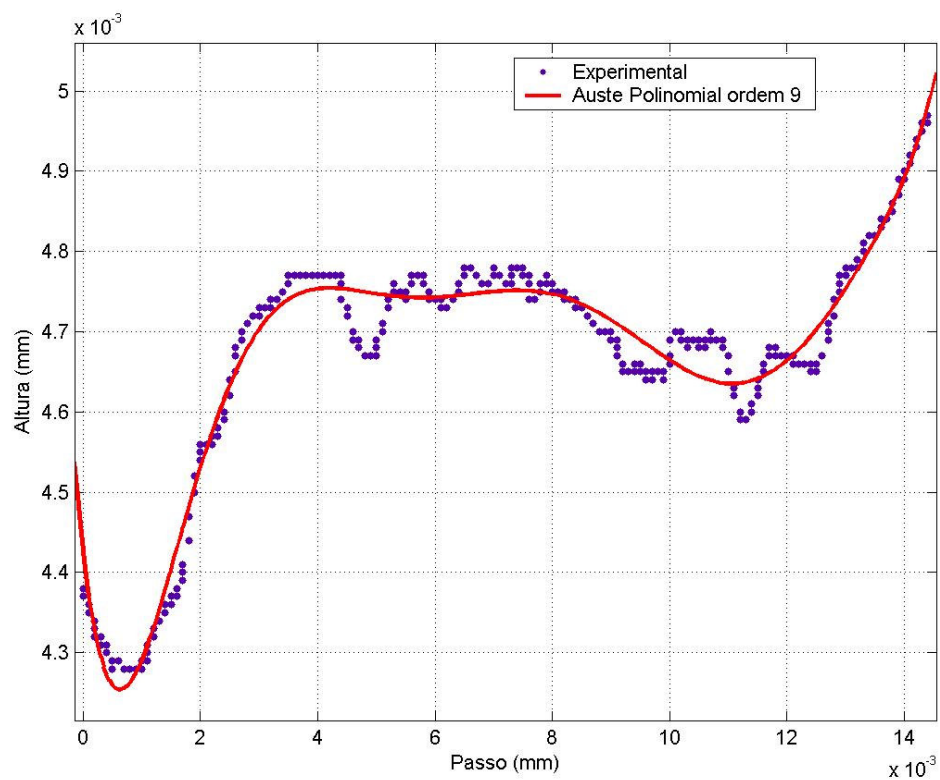


Figura 2-12 – Ajuste Polinomial de ordem 9 (Caminho 2)

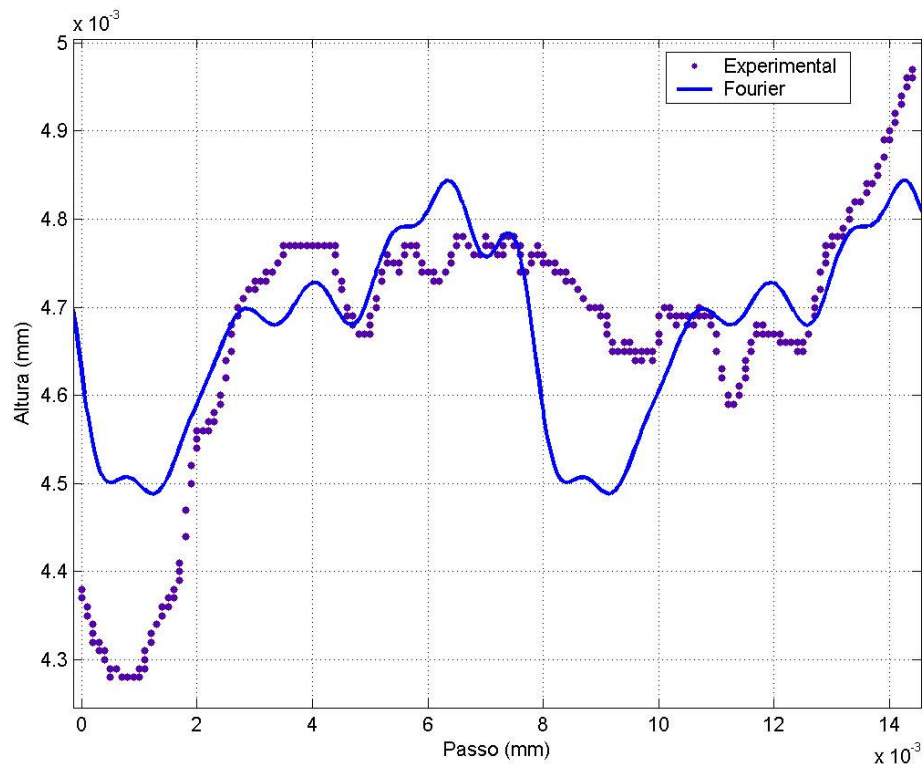


Figura 2-13 – Ajuste Por Fourier, 8 termos (Caminho 2)

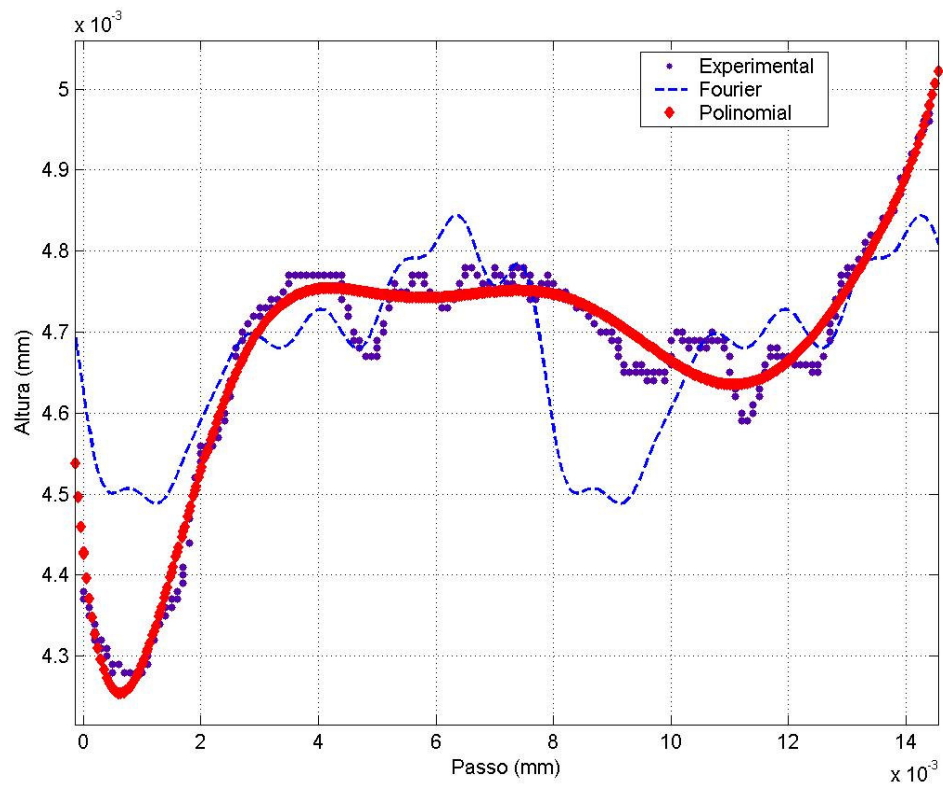


Figura 2-14 – Ajuste polinomial e Fourier (Caminho 2)

Para mostrar a aproximação entre cada modelo de superfície e os pontos reais medidos foi avaliado o erro máximo entre a função aproximada e os pontos reais. Esse erro foi definido em forma de percentual da maior amplitude formado entre picos e vales. Esse método de avaliação de erro permite comparar o quanto o erro de aproximação influencia a compactação completa da superfície. Os resultados foram resumidos na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 - Erros obtidos a partir das aproximações (milímetros)

Caminho	Amplitude	Polinomial	Fourier	Diferença
Caminho 1	3.40×10^{-4}	$0,60 \times 10^{-4}$	$1,10 \times 10^{-4}$	$0,50 \times 10^{-4}$
		17,6%	32,3%	14,7%
Caminho 2	6.40×10^{-4}	$0,90 \times 10^{-4}$	$2,40 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$
		14,0%	37,5%	23,5%

As funções aproximadas devem ser contínuas e periódicas. Para a aproximação por Fourier essa necessidade já é naturalmente cumprida, já que este modelo possui essa hipótese. Já para o ajuste polinomial, não se espera nenhuma periodicidade inerente ao modelo de ajuste. Assim, devemos definir a superfície com período descrito pelo polinômio obtido pelo o ajuste.

Uma necessidade é perceber a diferença entre as duas regiões medidas. Na Figura 2-15 mostra-se diferença considerável.

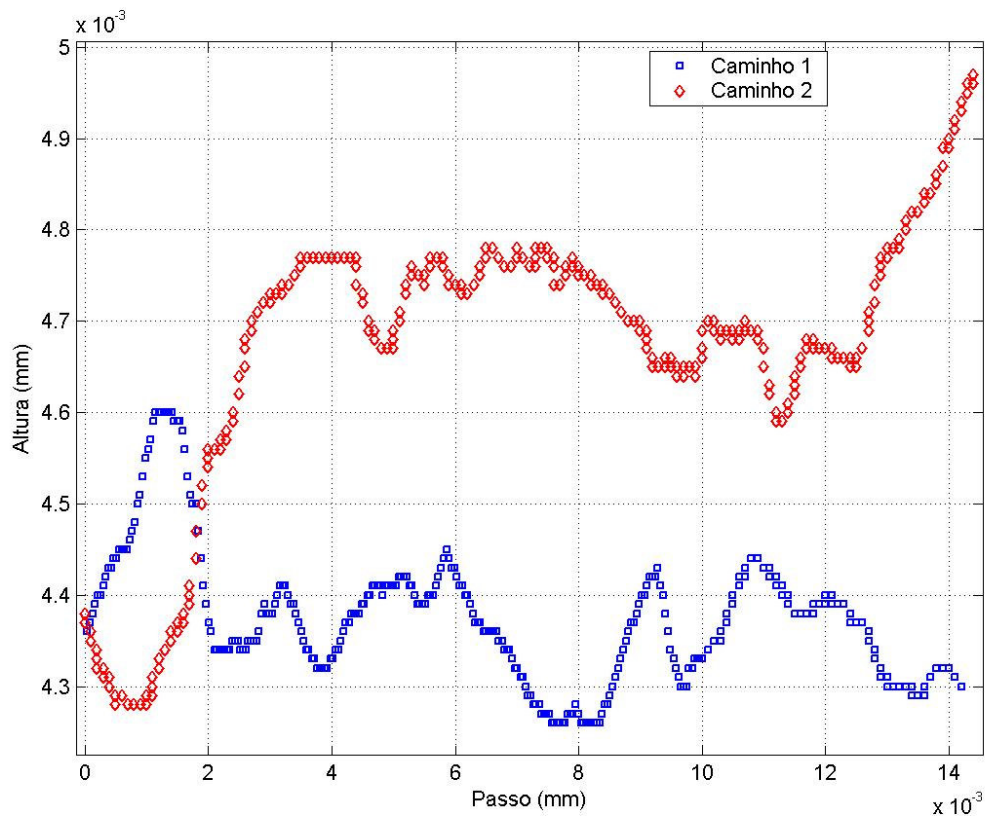


Figura 2-15 – Pontos para Caminho 1 e Caminho 2

O passo seguinte é definir a influência da diferença entre as superfícies na carga necessária à compactação das superfícies. Até agora é visto que existe diferença significativa entre os modelos aproximados, tanto por Fourier como por Polinômio, e os pontos reais obtidos a partir de medição do AFM. O cálculo da força de separação será desenvolvido os próximos Capítulos.

CAPÍTULO 3

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Este capítulo explica o modelo de elementos finitos utilizado para as análises da válvula explicitando o modelo de material, elemento, contato e de análise.

3.1 Modelo de Material

3.1.1 Regime Linear Elástico

O modelo linear elástico é definido em [9] para as seguintes hipóteses:

- Válido para pequenas deformações elásticas (normalmente menores que 0.5%);
- Pode ser isotrópico, ortotrópico ou completamente anisotrópico
- Pode possuir propriedades dependentes da temperatura e/ou outras variáveis de campo.

A relação entre a tensão e deformação no modelo linear elástico para o caso isotrópico é representada pela Equação 2.1 onde se define a matriz de elasticidade.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad \text{Eq 3.1}$$

O critério de estabilidade necessita que $E > 0$, $G > 0$ e $-1 < \nu < 0.5$. O modelo elástico considerado assume a hipótese de que as propriedades são contínuas em todo o material [10].

O limite superior em que o material se apresenta como linearmente elástico, isto é, onde existe uma razão constante entre tensão e deformação, é chamado de limite de

proporcionalidade. É importante destacar a diferença entre limite de proporcionalidade e limite de escoamento. O primeiro diz respeito à mudança de comportamento da curva tensão x deformação representado pelo início de deformação permanente no material. Já o segundo diz respeito a um valor convencionado de deformação admitido para o material que é normalmente 0,2%. Ou seja o limite de escoamento já possui uma parcela de material com deformação permanente.

3.1.2 Regime Plástico

Quando o nível de tensões atinge valor acima do limite de proporcionalidade dizemos que este material começa a escoar. Escoamento pode ser definido como o fenômeno pelo qual o material começa a sofrer deformações permanentes, as deformações plásticas.

Existem diversos modelos para caracterizar a plasticidade dos materiais. O caso estudado considera apenas o caso de carregamento necessário para vedação ou seja, a pressão de contato necessária para deformar a superfície de contato entre sede e esfera. Novamente a hipótese de propriedade contínua em todo o material foi adotada.

No estudo desenvolvido foi escolhido um modelo elastoplástico a partir de dados reais de ensaio de tração uniaxial conforme já apresentado no Capítulo 2 deste texto.

3.1.3 Caracterização do material

O material ensaiado foi o aço AISI 8630 mod. II, material API classe 75K. Os passos seguidos para a caracterização do material foram os seguintes:

1. Determinação do limite de proporcionalidade.
2. Ajuste por regressão linear da região elástica para determinação do Módulo de Elasticidade

Na Figura 3-1 os pontos obtidos no ensaio uniaxial são mostrados. Esses pontos devem ser corrigidos de forma a eliminar a influência da geometria do corpo de prova no resultado obtido [9]. A correção é obtida a partir das Equações 3.2 e 3.3

$$\sigma = \sigma_{nom} \cdot (1 + \epsilon_{nom}) \quad \text{Eq 3.2}$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad \text{Eq 3.3}$$

A partir dos pontos corrigidos a curva tensão x deformação com valores reais pode ser traçada, conforme mostrado na Figura 3-1.

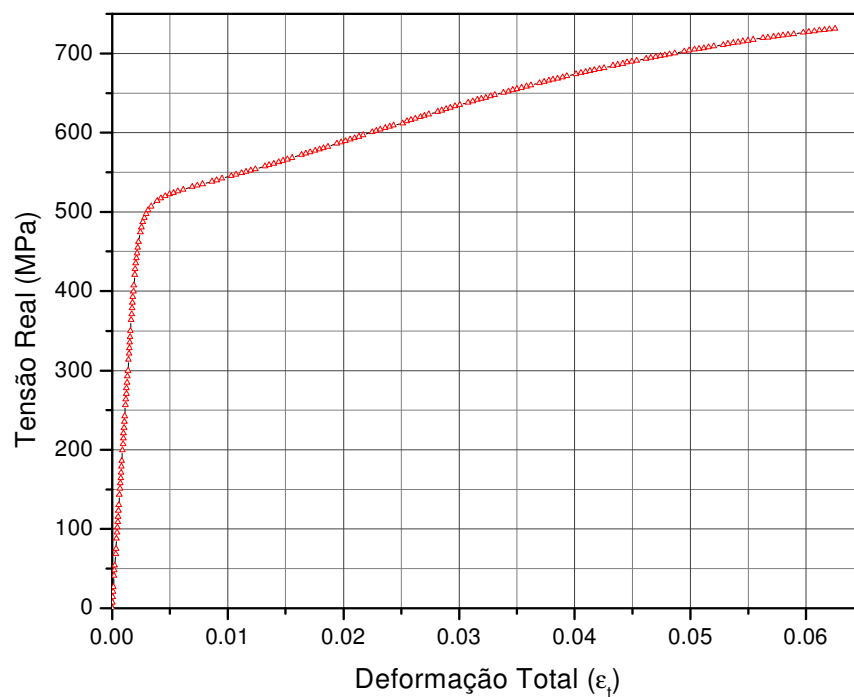


Figura 3-1 – Pontos obtidos a partir de ensaio de tração uniaxial.

É necessário fazer o ajuste linear para determinar o coeficiente angular e assim obter o Módulo de Elasticidade. A partir dos pontos corrigidos a curva tensão x deformação com valores reais pode ser traçada, conforme mostrado na Figura 3-1.

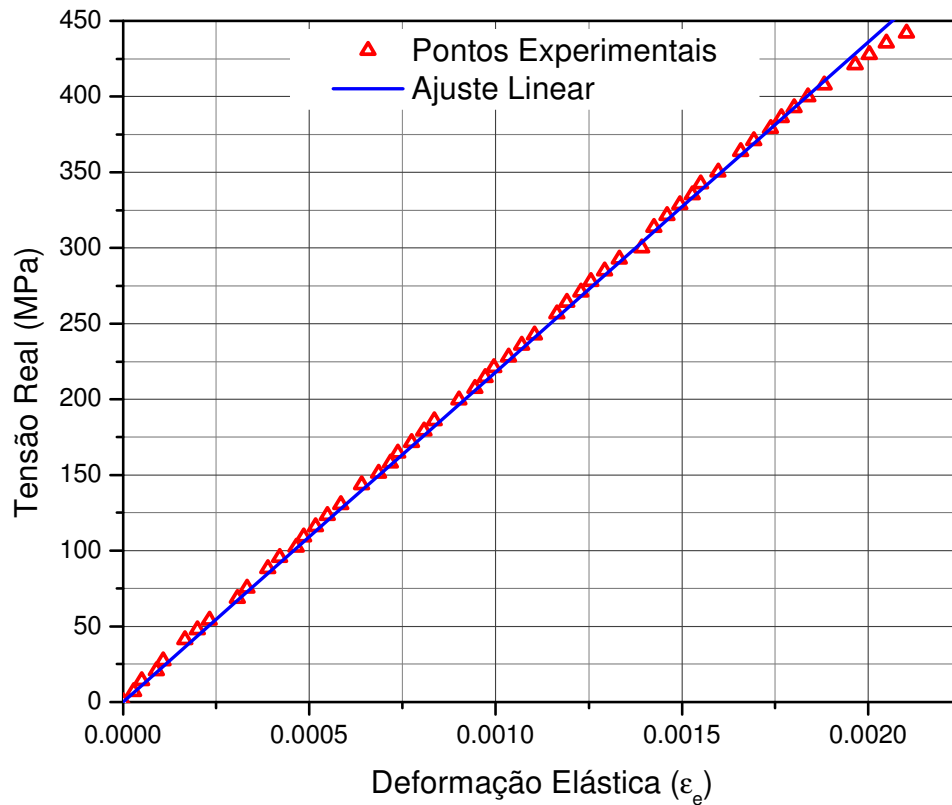


Figura 3-2 – Regressão linear para determinação do módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade obtido a partir da regressão linear foi 218 GPa. Esse valor é condizente com o conhecido na literatura de 210 GPa.

Para uma melhor representação no modelo de elementos finitos, o material foi definido como elastoplástico multilinear. O comportamento do material foi caracterizado por retas que representam bem a curva real, conforme mostrado na Figura 3-3.

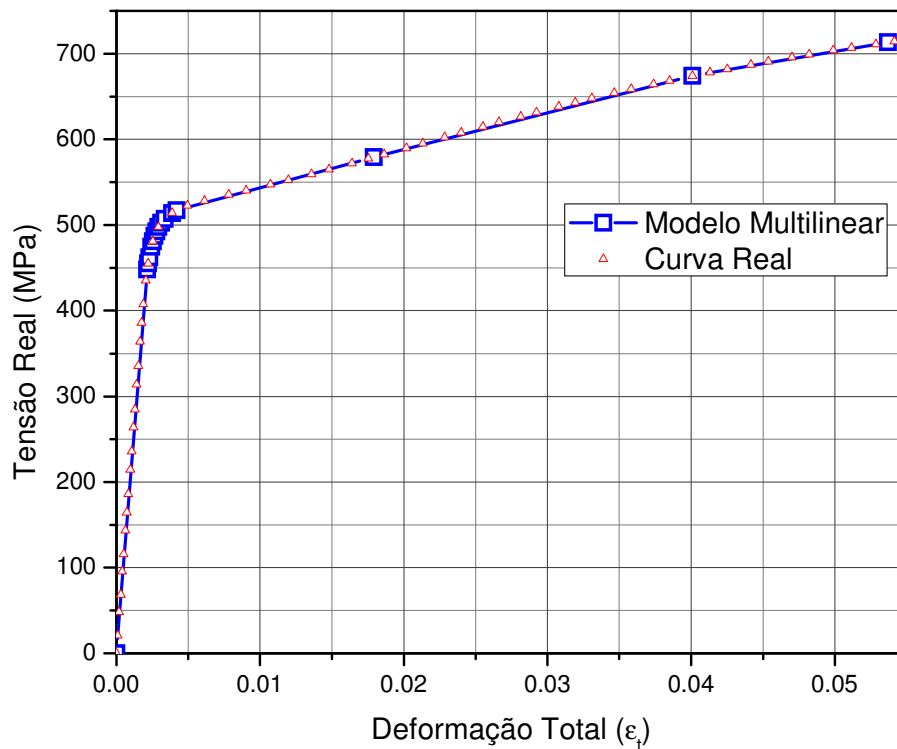


Figura 3-3 – Comparação entre o modelo multilinear e a curva real do material.

Ao final dessa avaliação as características do material modelado podem ser listadas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Características do material modelado – AISI 8630 mod. II – 75K

Característica	Símbolo	Valor
Limite de Proporcionalidade	σ_p	441,05 MPa
Módulo de Elasticidade	E	218,00 GPa
Coefficiente de Poisson	ν	0,29

3.2 Definição da geometria

Uma vez definido o material, é necessário que a geometria a ser analisada seja modelada. Conforme apresentado na seção 2.2.4, utilizou-se os pontos obtidos pela medição em AFM para gerar a superfície que será analisada. Duas geometrias foram

geradas. Cada uma representa respectivamente os Caminhos 1 e 2 já citados no Capítulo 2 deste texto. As superfícies modeladas são 2-D. Dessa forma o modelo é plano bi-dimensional.

O fenômeno físico real da compactação acontece entre duas superfícies de mesmo acabamento superficial. Portanto a mesma geometria pode ser utilizada para as duas superfícies. Por facilidade de modelagem, optou-se por fazer o contato entre duas partes com geometrias “espelhadas”. As duas geometrias utilizadas pode ser vistas nas Figuras 3-4 e 3-5.

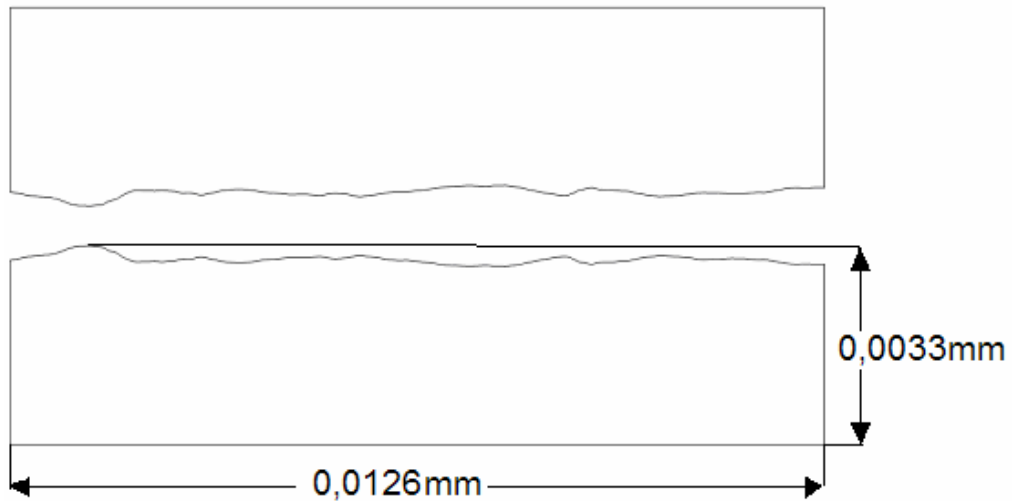


Figura 3-4 – Geometria utilizada para Caminho 1.

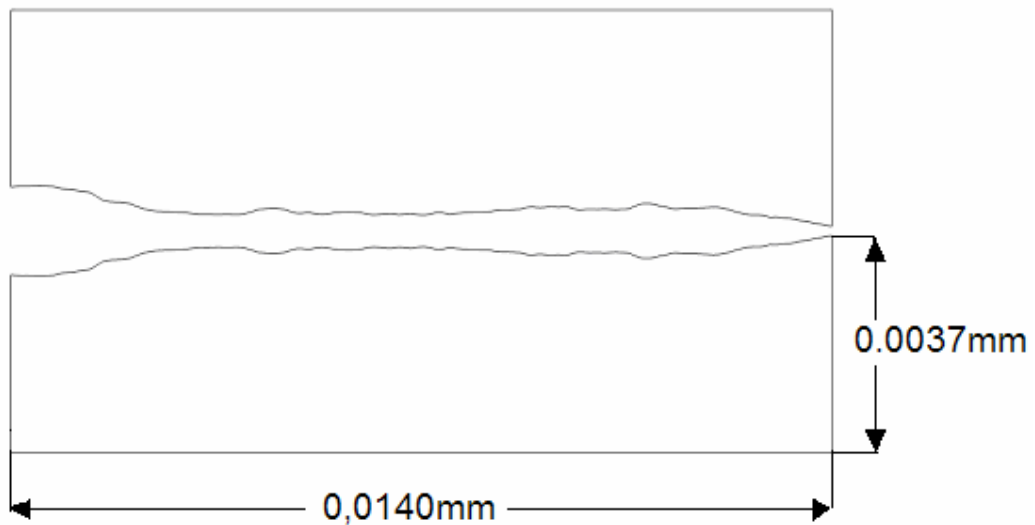


Figura 3-5 – Geometria utilizada para Caminho 2.

3.3 Definição do Contato

Para o estudo da compactação da superfície é necessário definir o comportamento da mesma quando em contato. O contato é definido com dois tipos de comportamento, o normal e o tangencial.

O modelo de contato normal utilizado foi o de contato duro, *HARD*, onde é definido o quanto de interferência é permitido entre as superfícies. O modelo aplicado à análise executada foi de interferência zero.

O contato tangencial foi definido a partir do modelo de Multiplicação Lagrangeana. Nele foi definido o coeficiente atrito em 0,15 [11]. O Multiplicador Lagrangeano foi escolhido pois segundo MAN [12] é o mais adequado pra modelos com grandes deformações. Nessa técnica os nós em contato possuem seus graus de liberdade acoplados. O movimento relativo entre as partes em contato só é verificada quando a tensão cisalhante ultrapassa o valor da resistência pelo atrito definido. A Figura 3-6 mostra como foram definidas as superfícies mestra e escrava.

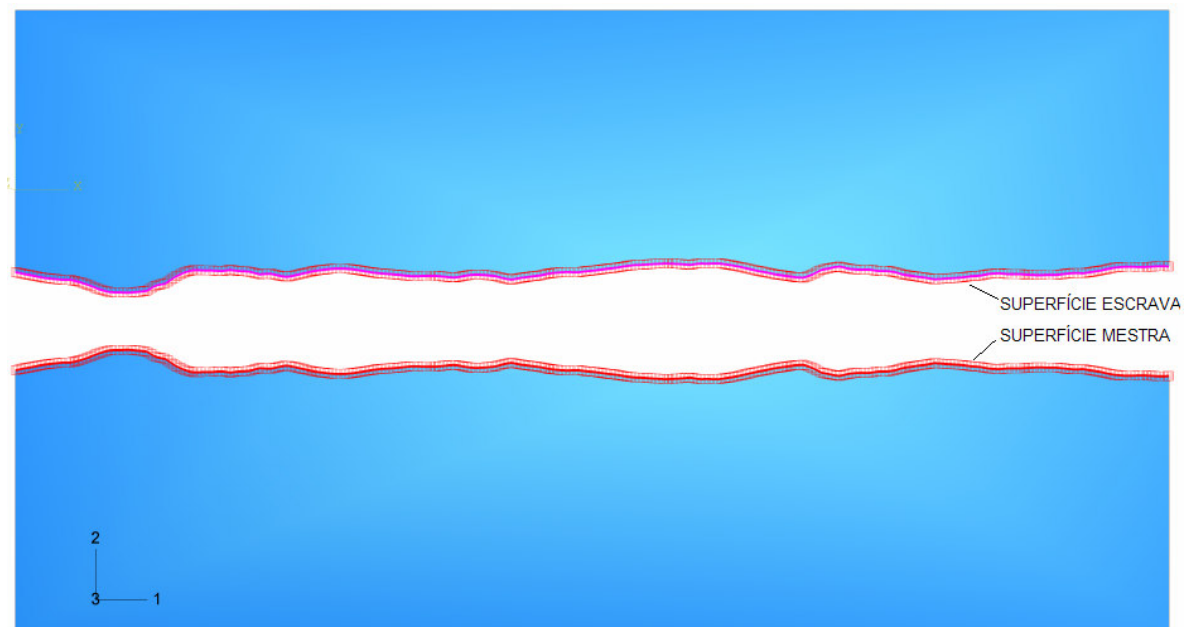


Figura 3-6 – Superfícies em contato definidas.

3.4 Definição das Condições de Contorno

As condições de contorno aplicadas ao modelo foram definidas com o objetivo de representar a superfície para a situação particular da compactação da região de vedação das válvulas de esfera, o estudo de caso apresentado no Capítulo 4 deste texto. As condições podem ser vistas na Figura 3-7.

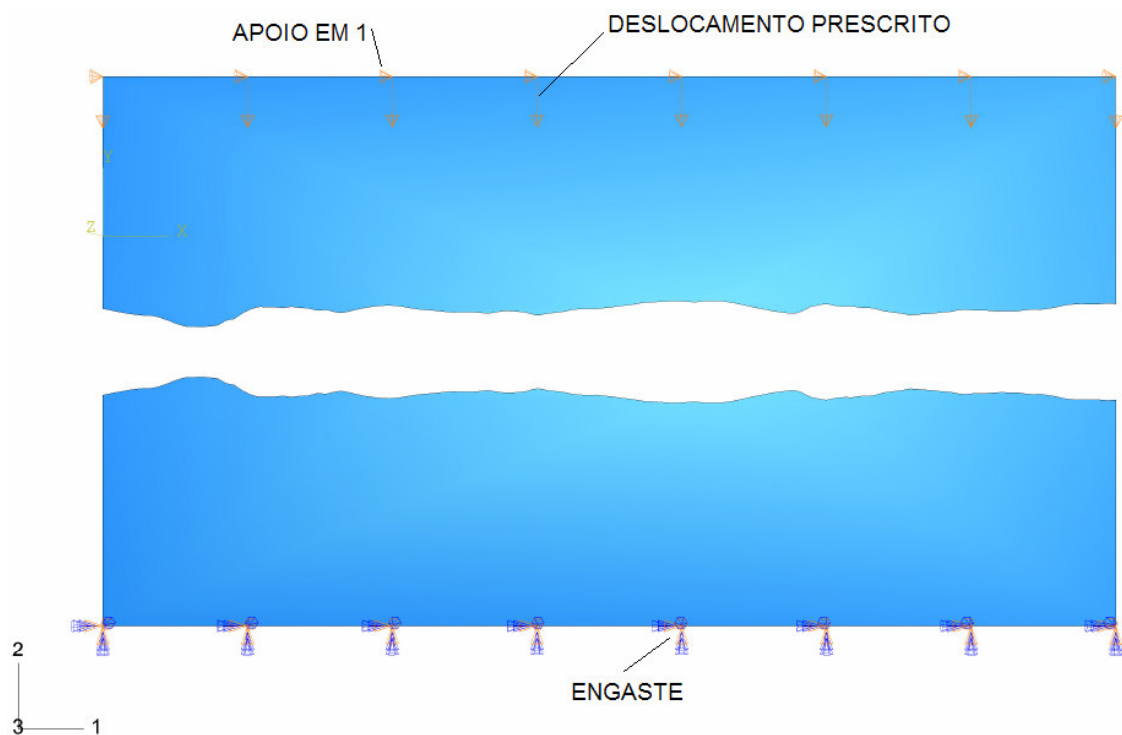


Figura 3-7 – Condições de contorno consideradas.

No modelo descrito não existe força aplicada às partes. A compactação é definida a partir do deslocamento prescrito da parte superior contra a inferior. A força de reação é medida e é dado de saída do modelo.

O deslocamento prescrito para cada caminho foi estabelecido conforme indicado na Tabela 3-2

Tabela 3-2 - Parâmetros do deslocamento prescrito nos modelos

Parâmetro	Tipo/Valor
Deslocamento total Caminho 1	0.002 mm
Deslocamento total Caminho 2	0.02 mm
Subdivisões do passo de carga (aplicável aos dois caminhos)	10

A forma de calcular a interferência entre as peças foi estabelecida segunda a Equação 3.4, onde se estabelece a relação entre o valor do passo de carga e o deslocamento real em milímetros. Como nos dois modelos inicialmente as partes não estão em contato, foi descontado o passo de carga de deslocamento prescrito sem contato entre as partes. Assim pode-se escrever a Equação 3.4 que deve ser aplicada para cada caminho.

$$I = \frac{PC \times DC}{T} \quad \text{Eq 3.4}$$

Onde:

I – Interferência das partes [mm]

PC – Passo de carga (saída da análise)

DC – Deslocamento total com contato [mm]

T – Subdivisões do passo de carga

3.5 Definição da Malha e dos Elementos

A geometria da superfície foi importada para o programa de elementos finitos a partir de um arquivo .dxf com o desenho. Esse desenho continha pontos e linhas utilizadas, conforme explicado no Capítulo 2. A metodologia de construção da malha utilizou as linhas, colocando-se apenas um elemento por linha.

A malha considerada no modelo executado foi do tipo predominante quadrilátera (*quad-dominated*). Esse tipo de discretização permite que não só apenas quadriláteros sejam formados, mas também triângulos nas áreas de transição da malha. Essa opção é importante, pois possibilita o refino da malha na região de interesse que é a superfície de contato. Assim, elementos maiores podem ser definidos nas regiões menos importantes da peça. Diminuindo o número de elementos diminui-se o número de nós, o que resulta em grande economia de tempo de processamento.

O algoritmo de discretização é o conjunto de regras adotado para a construção da malha. Na escolha dos algoritmos existem duas opções, o *Medial Axis* e o *Advancing Front*. O algoritmo *medial axis* inicialmente decompõe a região a ser discretizada em um grupo de regiões mais simples. O algoritmo então usa técnicas de malha estruturada para preencher cada região mais simples com elementos. Se a região a ser discretizada é relativamente simples e possui um grande número de elementos, o algoritmo *medial axis* gera malha mais rápido do que o *advancing front*.

O algoritmo *advancing front* gera elementos quadriláteros nos contornos da região e continua a gerar elementos quadriláteros conforme se move sistematicamente para o interior da região. A Figura 3-8 apresenta a diferença entre o resultado de malha para um caso dos dois algoritmos apresentados.

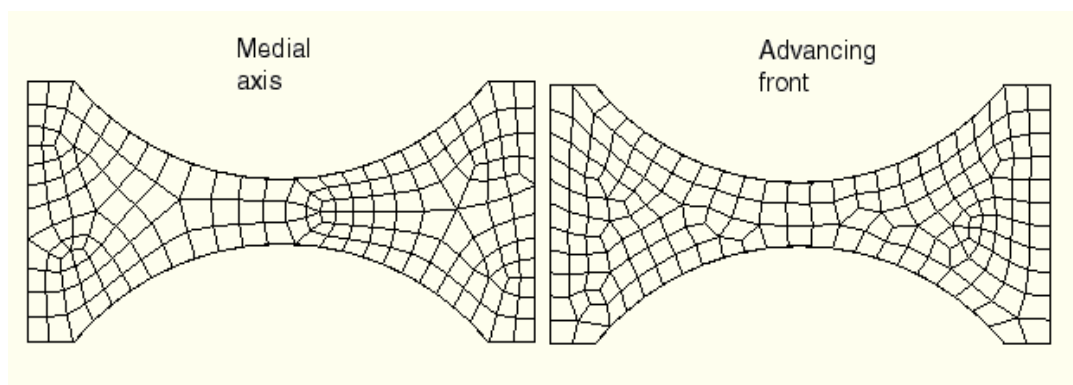


Figura 3-8 – Malha para os dois algoritmos, *medial axis* e *advancing front*.

Dentre as técnicas possíveis ao modelo, estruturada e livre optou-se pela técnica de malha livre. Esse caso foi o escolhido, pois existia uma grande região sem interesse que deveria possuir malha mais grosseira. A malha livre permite mais flexibilidade que a malha estruturada. Quando uma região é discretizada com a malha estruturada, é possível prever o padrão da malha baseado na topologia da região. Entretanto é impossível prever o padrão de uma malha livre antes de criá-la.

O elemento utilizado foi de segunda ordem. Elementos de segunda ordem oferecem maior precisão do que os de primeira ordem para problemas “suaves” que não envolvam condições complexas de contato, impacto ou distorções severas de elementos. Os elementos de segunda ordem conseguem evidenciar as concentrações de tensão de maneira mais efetiva que os de primeira ordem e são melhores para modelar superfícies. A principal vantagem obtida na escolha de elementos de segunda ordem foi a possibilidade de se modelar as curvas com menor quantidade de elementos sem perder a precisão desejada. Uma análise de sensibilidade de malha foi feita para garantir que o resultado não era dependente da malha obtida para o modelo. Esta análise será apresentada no Capítulo 4 deste texto.

O elemento possui integração reduzida (*reduced integration*) que utiliza uma integração de menor ordem para determinação da rigidez do elemento. Essa opção foi escolhida para que fosse reduzido o tempo de processamento. Conforme indicado em [9] o resultado obtido com elementos de segunda ordem com integração reduzida atingem resultados mais precisos que os obtidos por integração completa dos elementos. Já para elementos de primeira ordem a precisão atingida quando utilizada a integração reduzida depende muito da natureza do problema e, geralmente, é menor do que com integração completa.

Elementos híbridos foram utilizados para garantia da utilização de todos os recursos possíveis para a convergência. Um elemento híbrido possui grande utilidade quando o material em questão é incompressível, ou seja, possui coeficiente de Poisson elevado próximo a 0.5. Essa característica incompressível é verificada quando se aplica pressão hidrostática e a resposta é uma pequena variação da deformação em relação ao aumento de pressão. Apesar de o material modelado possuir coeficiente de Poisson 0.29, a característica do fim da compressão - fim do passo de carga definido - faz com que a pressão aumente sem que a deformação aumente também em proporção satisfatória para a convergência da análise. Quando utilizado o elemento híbrido este desacopla a pressão da solução iterativa numérica, deixando que a pressão seja obtida a partir de uma relação constitutiva com a deformação e não diretamente a partir da solução numérica [9].

O tipo de elemento utilizado foi de um estado plano de deformações, pois se entende que este modelo se aproxima dessa condição, uma vez que no plano normal a deformação é nula, pois não há liberdade de movimento.

Após essas considerações o elemento utilizado foi o **CPE8RH**. Um elemento de 8 nós, biquadrático de deformação plana, quadrilátero, híbrido, pressão linear, e integração reduzida. A malha utilizada pode ser vista nas Figuras 3-9 e 3-10.

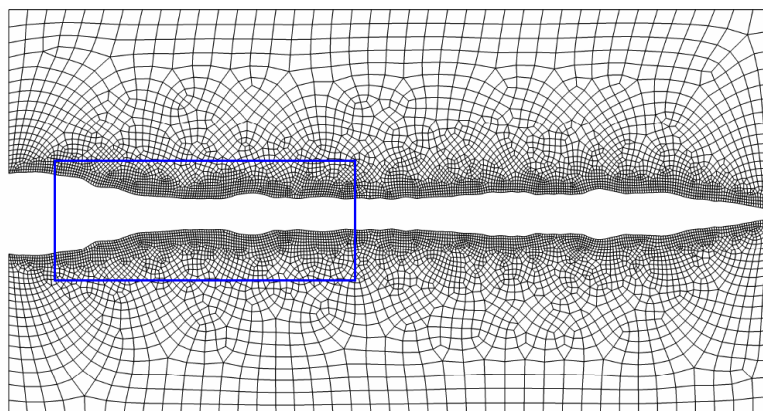


Figura 3-9 – Malha utilizada no modelo - Caminho 1.

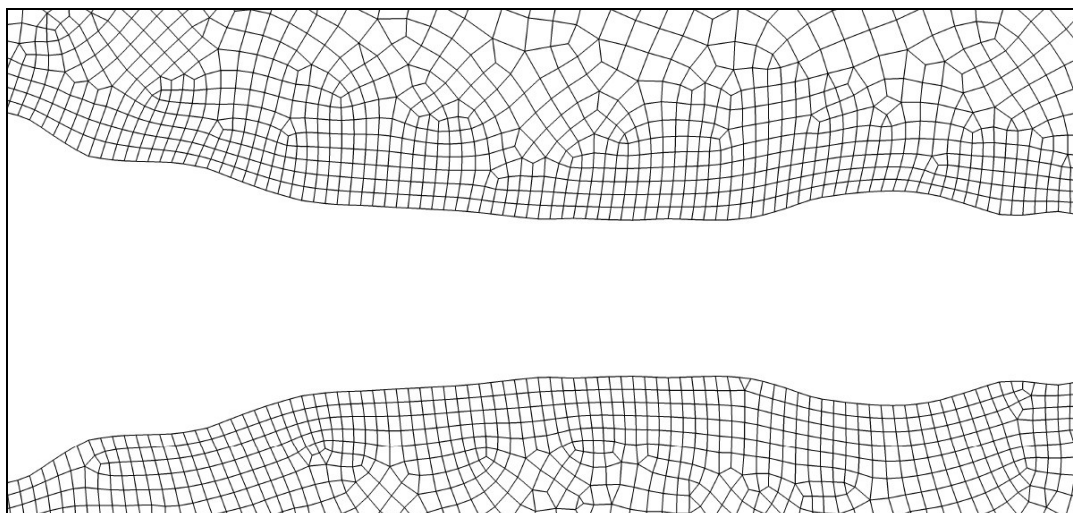


Figura 3-10 – Malha utilizada no modelo - Caminho 1 - detalhe.

3.6 Definição dos Passos de Carga e da Análise

A análise executada foi obtida através de deslocamento prescrito. Posicionou-se cada superfície com folga e, conforme mostrado no item 3.4, uma das condições de contorno previu deslocamento prescrito suficiente para que toda a compactação fosse obtida. Como essa análise era uma análise com grandes deslocamentos e com grandes deformações, ela possuía não linearidades e, portanto a opção por uma solução não linear foi escolhida. Além das não-linearidades do tipo de análise ainda existe a não linearidade de material. O mesmo foi modelado de acordo com sua curva tensão x deformação e, portanto seu comportamento plástico estava sendo utilizado modelado por uma aproximação multilinear.

Para a compressão foi estabelecido apenas um passo de carga que foi dividido em 10 sub-passos. Na análise apenas a compressão foi estudada, pois o objetivo é determinar a carga necessária à compactação. A força foi a variável monitorada de maior interesse, seguida pela energia interna e pela tensão de von Mises. Os parâmetros de entrada para a solução numérica podem ser vistos na Tabela 3-3

Tabela 3-3 - Parâmetros para solução numérica utilizados

Parâmetro	Tipo/Valor
Tipo de incremento	Automático
Máximo número de incrementos	100000
Incremento inicial	1.0
Incremento Mínimo	1E-008
Incremento Máximo	2.0

3.7 Avaliação da Compactação

Esta seção explica como foi feita a avaliação da pressão de contato necessária à vedação e como as imperfeições da superfície e o método de fabricação influenciam na determinação desse valor e da vedação.

3.7.1 Definição da Carga Perimetral

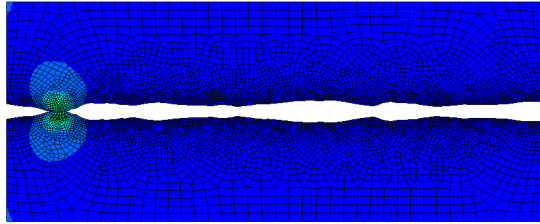
A pressão de contato é obtida pela razão entre a força de contato e a área real de contato. Para avaliação da pressão de contato necessária é importante parametrizar a carga aplicada. Uma vez que a análise local conduzida possui dimensões muito menores que qualquer forma macroscópica obtida pelas peças em vedação é importante definir uma grandeza que se aplique a cada geometria assumida pela superfície com o acabamento obtido.

Define-se uma carga perimetral que, como o nome sugere, é a razão entre a carga total aplicada e o perímetro da região em vedação. Define-se na Equação 3.4 a carga perimetral.

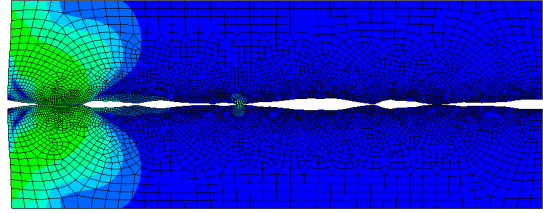
$$w_p = \frac{F}{L} \quad \text{Eq. 3.4}$$

3.7.2 Resultado da Compactação Superficial

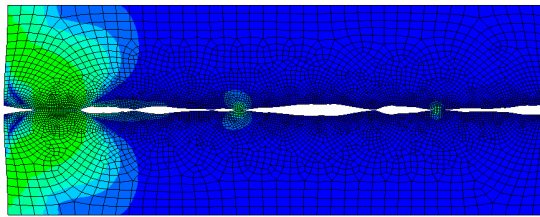
O resultado da compactação foi obtido após a análise do modelo descrito neste capítulo. As superfícies quando em contato tocam cada pico de uma vez. Conforme cada pico é adicionado na compressão a carga total é amplificada. Na Figura 3.11 a sequência de contato é apresentada para o caminho 1 definido.



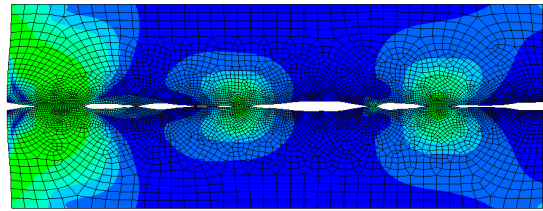
a) $I = 3,72 \times 10^{-5}$



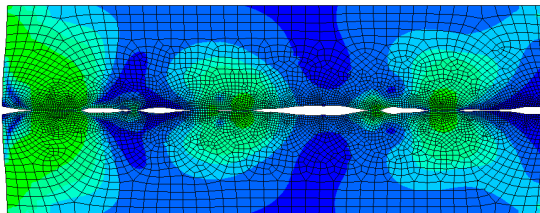
b) $I = 3,38 \times 10^{-4}$



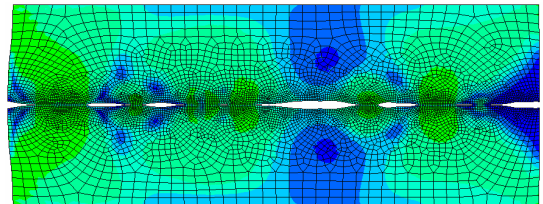
c) $I = 3,42 \times 10^{-4}$



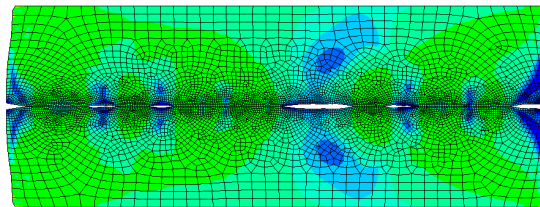
d) $I = 3,83 \times 10^{-4}$



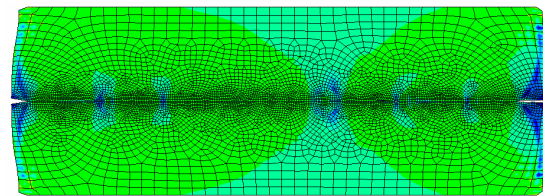
e) $I = 4,07 \times 10^{-4}$



f) $I = 4,47 \times 10^{-4}$



g) $I = 5,51 \times 10^{-4}$



h) $I = 7,19 \times 10^{-4}$

Figura 3-11 – Sequência de compactação. O contorno apresentado é para tensões de von Mises. Interferência em mm - Caminho 1.

O resultado desejado para análise é a força vertical necessária para a compactação das superfícies. A Figura 3.12 apresenta a carga compressiva variando de acordo com os passos de carga do Caminho 1.

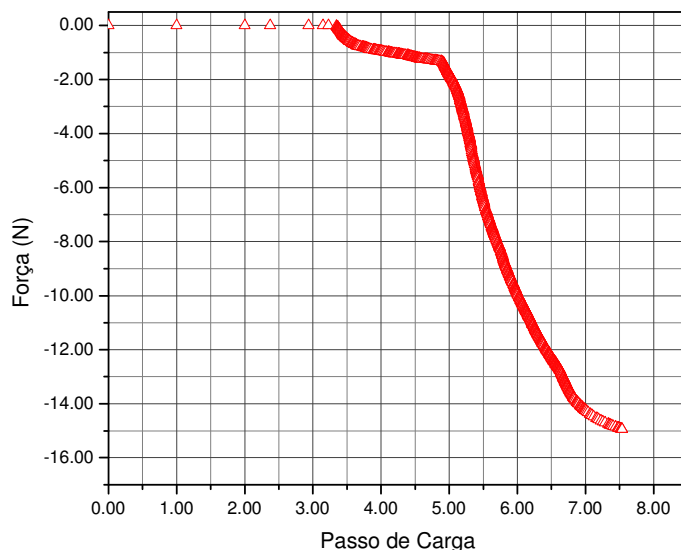


Figura 3-12 – Resultado da força compressiva entre as duas superfícies -Caminho1

O valor obtido no entanto deve ser de acordo com a Equação 3.4 onde divide-se a carga pelo comprimento, obtendo-se assim um valor parametrizado para a compactação dessa qualidade de superfície. O comprimento compactado foi 0,0126mm para o Caminho 1.

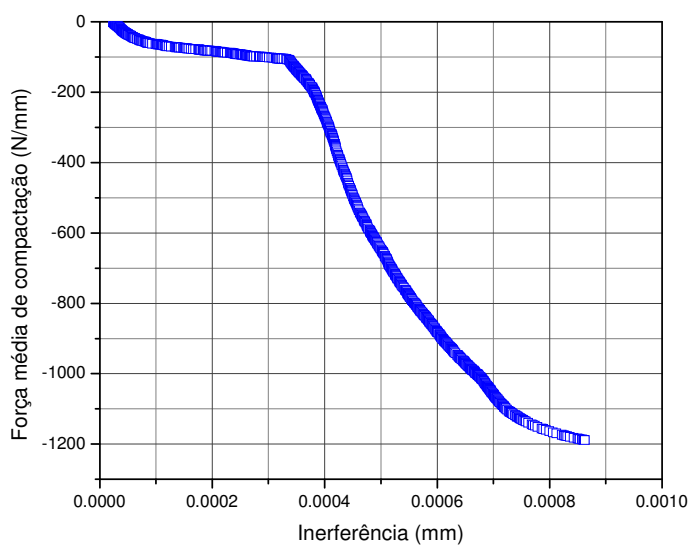
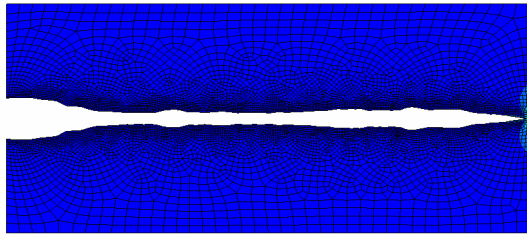
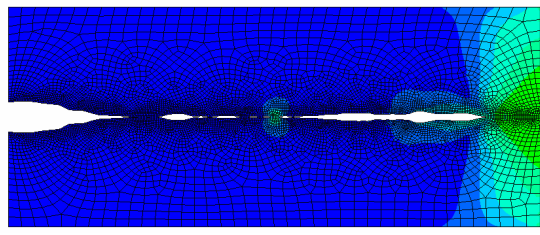


Figura 3-13 – Carga perimetral *versus* interferência - Caminho 1.

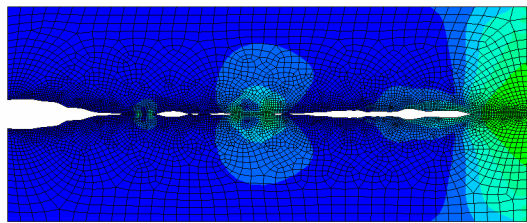
A mesma metodologia é aplicada ao Caminho 2. O valor obtido no entanto deve ser de acordo com a equação 3.4 onde divide-se a carga pelo comprimento, obtendo-se assim um valor parametrizado para a compactação dessa qualidade de superfície. O comprimento compactado foi 0,0124 mm para o Caminho 2.



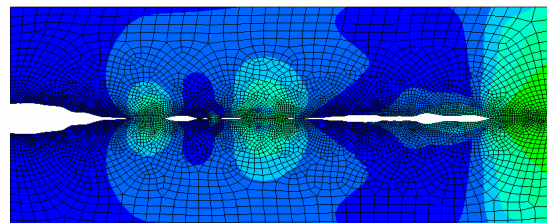
a) $I = 2,34 \times 10^{-5}$



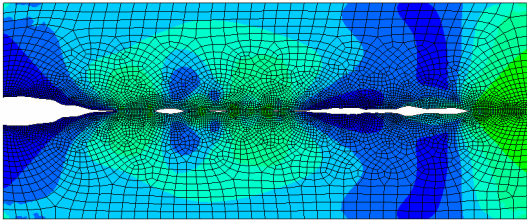
b) $I = 3,87 \times 10^{-4}$



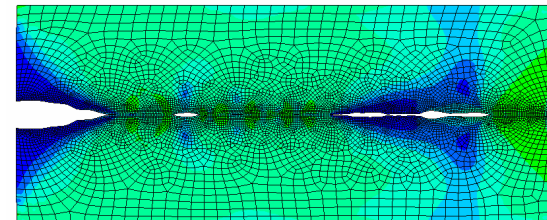
c) $I = 4,01 \times 10^{-4}$



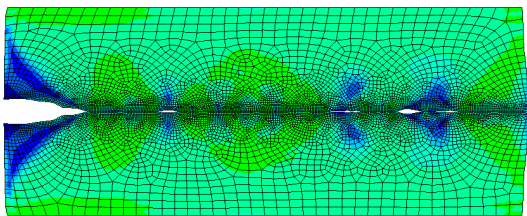
d) $I = 4,1 \times 10^{-4}$



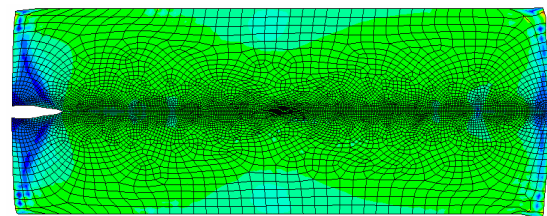
e) $I = 4,36 \times 10^{-4}$



f) $I = 4,98 \times 10^{-4}$



g) $I = 5,97 \times 10^{-4}$



h) $I = 1,23 \times 10^{-3}$

Figura 3-14 – Sequência de compactação. O contorno apresentado é para tensões de von Mises. Interferência em mm - Caminho 2.

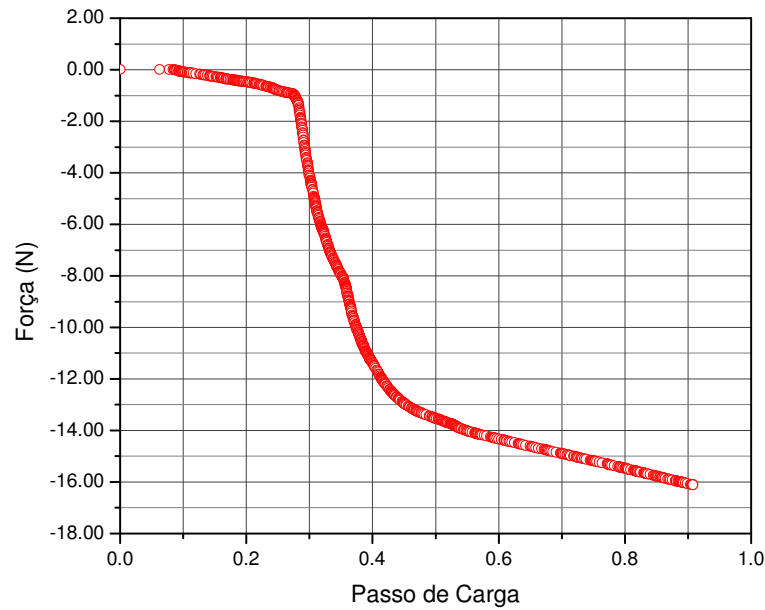


Figura 3-15 – Resultado da força compressiva entre as duas superfícies - Caminho 2.

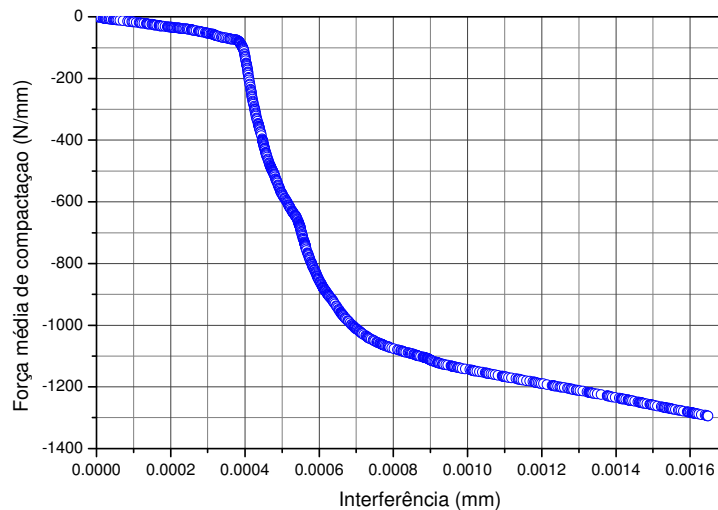


Figura 3-16 – Carga perimetral *versus* interferência – Caminho 2.

A comparação entre as superfícies mostra que apesar de as superfícies possuírem formas distintas a carga compressiva em função da interferência é bem próxima. Conforme apresentado no Capítulo 2 na Figura 2-5, a diferença da altura entre o Caminho 1 e 2 é bem grande, cerca de 53%. A carga perimetral que representa a força necessária para a compactação, é bem próxima entre os dois caminhos porque ambos

possuem o mesmo acabamento. O resultado para a carga de compactação total para cada caminho é listada na Tabela 3.4. Na figura 3-17 a comparação é apresentada.

Tabela 3-4 - Resultados da força perimetral máxima para compactação

Caminho	Valor
	N/mm [lbf/in]
Caminho 1	1188,73 [6787,82]
Caminho 2	1294,37 [7391,04]
Diferença	8.8%

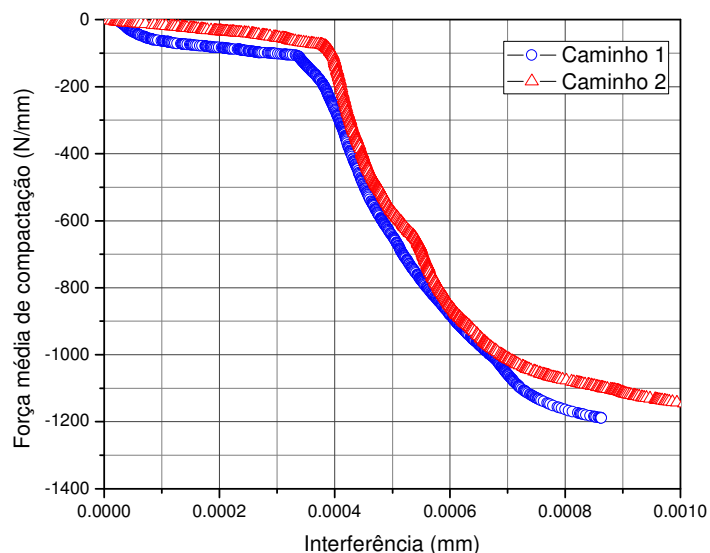


Figura 3-17 – Comparação dos resultados para os dois caminhos.

3.7.3 Teste de sensibilidade de Malha

O resultado da compactação foi obtido após a análise do modelo descrito neste capítulo. Entretanto existe o risco de o resultado ser dependente da malha que discretiza a superfície, justamente por se tratar de um resultado de um método numérico. Para certificar que a malha não influencia no resultado é necessário fazer o teste de sensibilidade de malha. Neste teste a discretização pode ser aumentada ou diminuída

para verificar o quanto ela influencia no resultado. No caso das superfícies estudadas, a malha inicial considerou as linhas que interliga os pontos extraídos do microscópio AFM discretizadas por um elemento. Para discretizar de forma mais grosseira a geometria representada não seria a mesma, pois não é possível colocar menos elementos. A única opção seria excluir alguns pontos e nesse caso a análise não utilizaria todos os pontos medidos. Dessa forma a opção escolhida foi refinar a discretização aumentando para dois elementos por linha. Na Figura 3-18 as linhas e suas divisões são apresentadas. A malha inicial e a refinada são apresentadas nas Figuras 3-19 e 3-20.

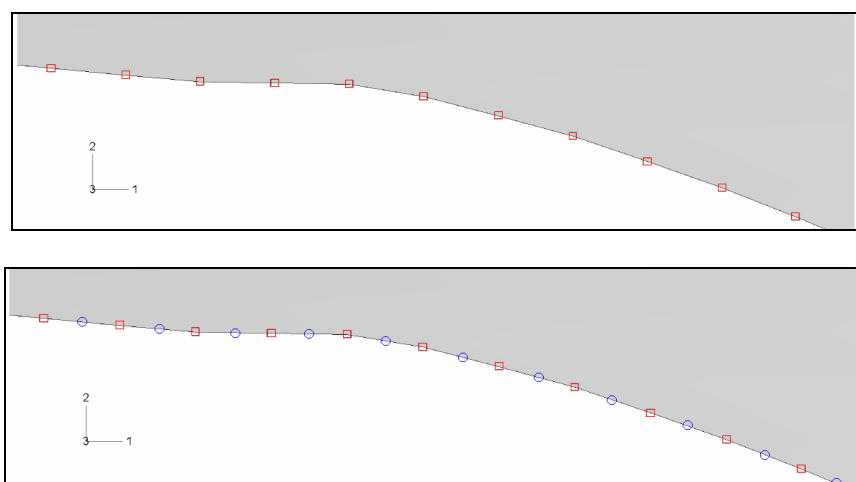


Figura 3-18 – Linhas que interliga os pontos da medição no AFM e suas divisões para discretização inicial e refinada.

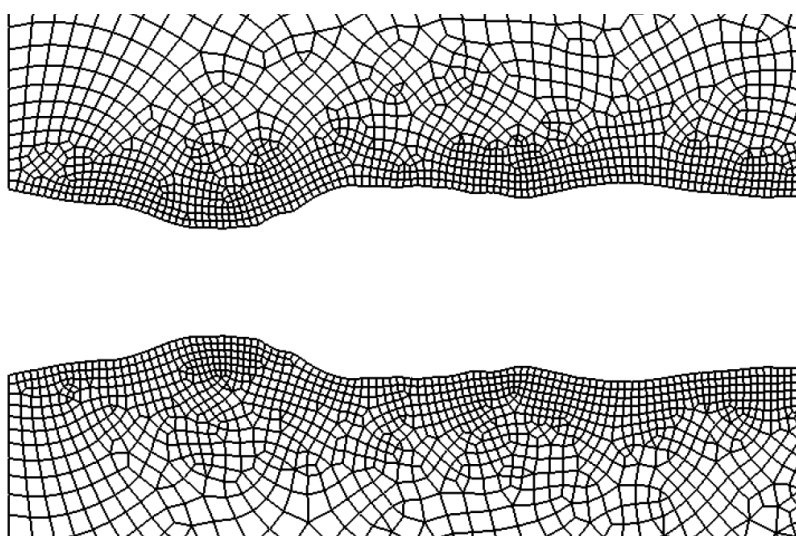


Figura 3-19 – Malha normal – 1 elemento por linha da superfície.

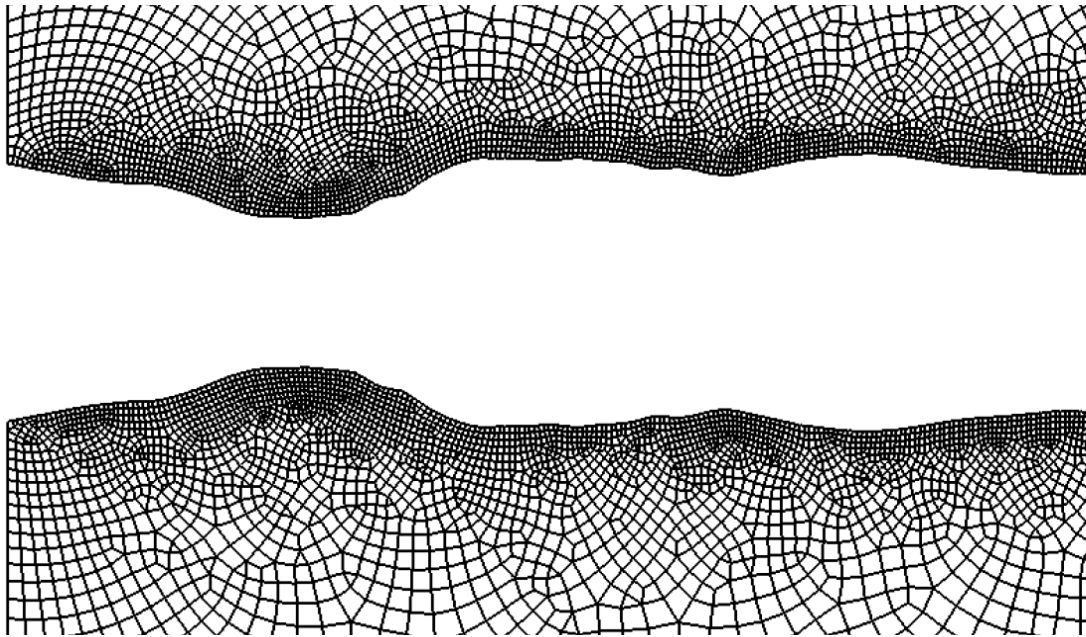


Figura 3-20 – Malha refinada – 2 elementos por linha da superfície.

O resultado para as duas discretizações é comparado a seguir. Inicialmente o principal resultado, a força vertical, que no modelo é a saída R2 (reação na direção 2).

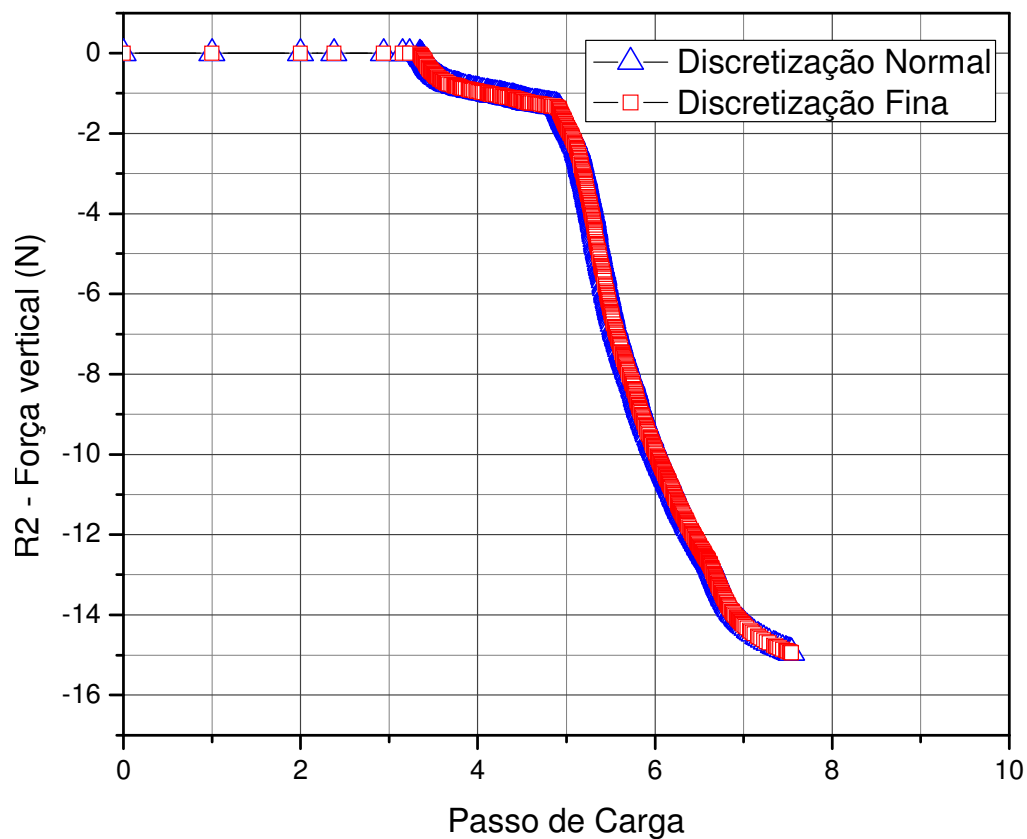


Figura 3-21 – Comparação da carga vertical para as duas discretizações.

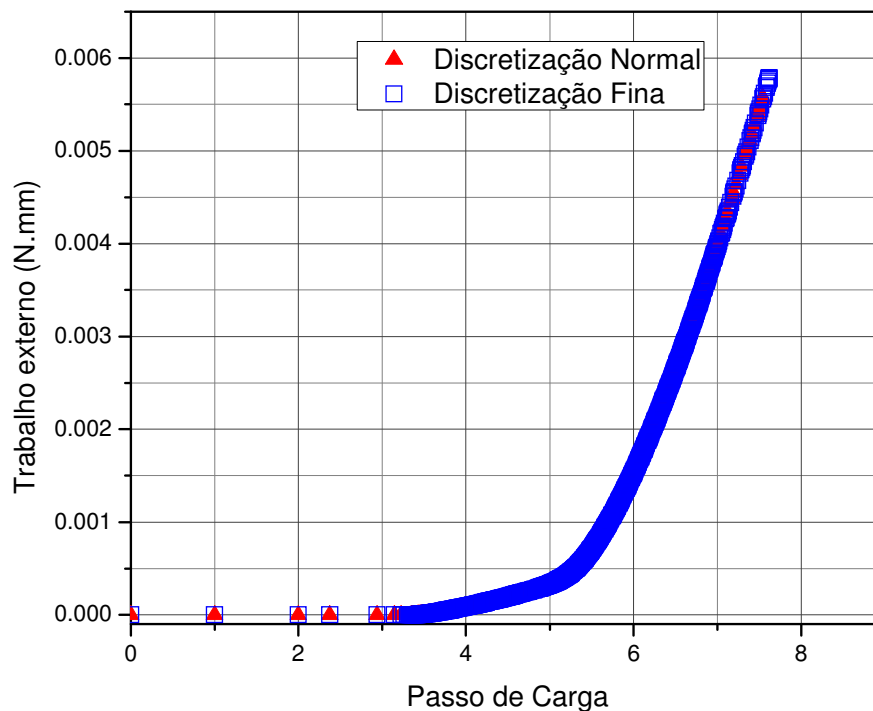


Figura 3-22 – Comparação do Trabalho externo para as duas discretizações.

O resultado da reação vertical, que é o principal dado de saída para este estudo, não se alterou para a precisão de 6 casas decimais escolhida para o resultado. Já o Trabalho Externo mostrou pequena diferença fruto do modelo numérico, mas sem comprometer o resultado. A Tabela 3-5 mostra as diferenças obtidas.

Tabela 3-5 - Comparação do Trabalho Externo

Discretização	Trabalho externo N.mm
Normal	$5,58 \times 10^{-3}$
Fina	$5,79 \times 10^{-3}$
Diferença	3,7%

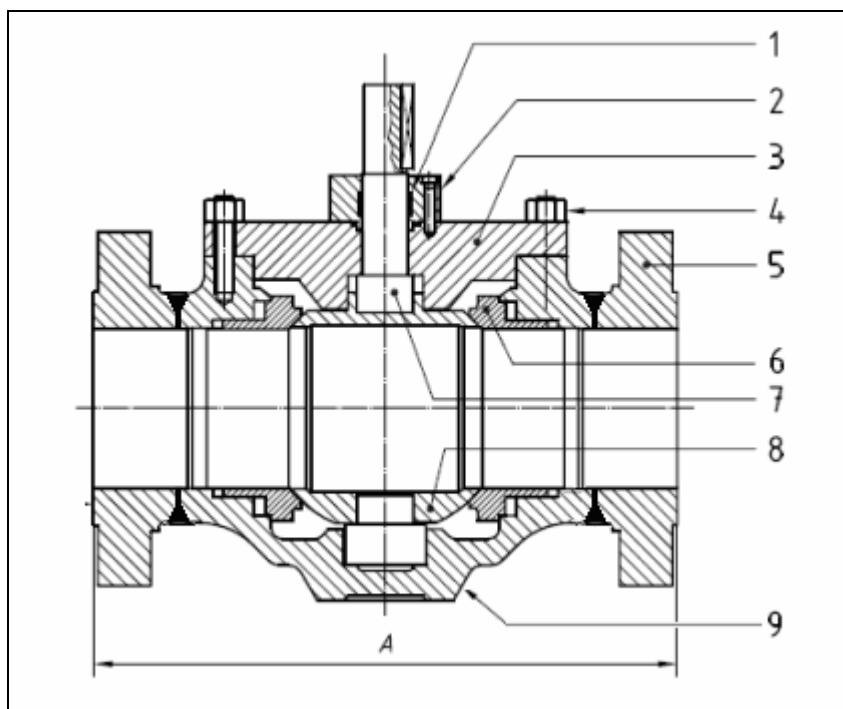
CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO : VEDAÇÃO METAL-METAL ENTRE SEDE E ESFERA DE VÁLVULAS DE ESFERA DE BLOQUEIO

Este capítulo explica o funcionamento de uma válvula de esfera detalhando cada componente e sua função durante a operação da válvula.

4.1 Princípio de uma Válvula Esfera

Na figura 1.1 os principais componentes da válvula podem ser identificados, bem como sua posição.



- | | |
|---------------------------------|-----------|
| 01 Gaxetamento da Haste | 06 Sede |
| 02 Retentor do Gaxetamento | 07 Haste |
| 03 Bonnet | 08 Esfera |
| 04 Estojos de fixação do Bonnet | 09 Corpo |
| 05 Adaptador | |

Figura 4-1 – Montagem de uma válvula esfera de bloqueio (topy entry)

Uma válvula de esfera se caracteriza por possuir uma esfera como elemento de bloqueio. O movimento da esfera é rotativo e possui curso angular de 90°, ¼ de volta, vedando a Montante. Uma válvula de bloqueio como a estudada neste texto só possui duas posições de operação: Aberta e Fechada. As válvulas podem ser atuadas manualmente (ROV – *Remotelly Operated Vehicle* ou mergulhador), hidráulicamente, pneumáticamente e eletricamente.

4.2 Componentes de uma Válvula de Esfera

4.2.1 Gaxetamento da Haste

É constituído por gaxetas tipo “U-V”, as mais simples por o-rings ou por gaxetas únicas tipo “U” que vedam a haste confinando a pressão no corpo, isolando assim o meio externo da possibilidade de vazamento através da junção entre a esfera e seu atuador. Gaxetas são preferidas nesta posição pois devem conter pressão no diâmetro da Haste que possui movimento rotativo.

4.2.2 Retentor do Gaxetamento

Peça responsável pela contenção do efeito pistão na haste devido à pressão interna. Ele garante a fixação do gaxetamento e reage no bonnet para fornecer essa fixação (*stem blowback proof*).

4.2.3 Bonnet

É responsável pelo tamponamento do corpo, confinando assim a pressão. A sua vedação no corpo é geralmente feita com anéis metálicos como por exemplo os do tipo BX. Ele é fixado por estojos no corpo os quais devem garantir também a energização do anel de vedação.

4.2.4 Estojos de fixação do Bonnet

Estojos com grande responsabilidade estrutural. Devem não só fixar o Bonnet, mas também garantir pré-carga suficiente para o esmagamento do anel metálico que faz a vedação entre o corpo e o meio externo.

4.2.5 Adaptador

O Adaptador pode ser soldado, como mostrado na Figura 1-1, ou mesmo fabricado como parte integral ao corpo. Ele tem por função fazer a interface entre a válvula e o equipamento onde ela vai ser montada.

A interface pode ser biselada para solda, flangeada ou roscada para baixos nominais.

4.2.6 Sede

A sede, juntamente com a esfera é a parte mais importante de uma válvula esfera. Ela é responsável por fazer a vedação entre montante e o corpo. Ela é pré-carregada por molas que garantem a pressão de contato necessária para a vedação na esfera em baixa pressão. Quando pressurizada, a esfera é projetada contra a esfera o que aumenta a pressão de contato, melhorando a condição para a vedação. Na Figura 1-2 um exemplo de uma sede pode ser visto [13].

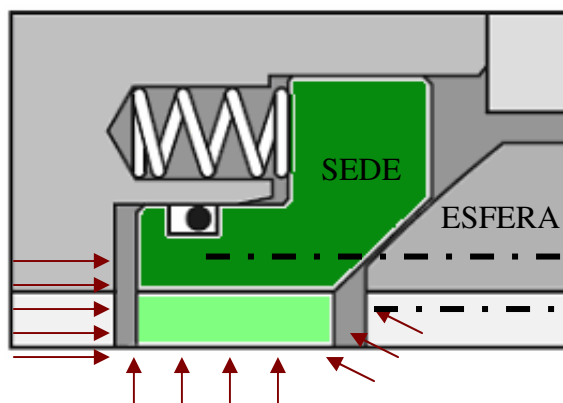


Figura 4-2 – Sede de uma válvula de esfera- região pressurizada e setor onde a pressão atua ajudando a vedação.

4.2.7 Haste

A Haste é a responsável pela interligação entre o atuador e a esfera. Ela é a responsável por transmitir o movimento rotativo necessário à atuação da esfera de uma região sem pressão da linha (acima do gaxetamento da haste) para a região com pressão da linha onde fica a esfera.

4.2.8 Esfera

A esfera é o elemento de bloqueio. Ela é responsável pela vedação entre a sede e o corpo, impedindo assim a comunicação entre montante e jusante, interrompendo o fluxo. A vedação pode ser feita por meio de elastômeros adaptados na sede ou mesmo pelo contato direto entre sede e esfera o que se denomina vedação metal-metal (*Metal-to-Metal - M2M*). Na esfera também se encontram regiões de ressalto as quais são chamadas de munhões (*Trunnion*). Os munhões são responsáveis pelo apoio onde existe a rotação da esfera. O munhão superior em particular, possui a interface que acopla na haste para a transmissão do movimento desta para a esfera. Na Figura 1-3 um exemplo de esfera pode ser visto.



Figura 4-3 – Esfera de uma válvula de esfera

4.2.9 Corpo

Ele é responsável por conter a pressão da linha. Sua integridade deve ser verificada bem como suas vedações com as outras partes para o meio externo.

4.2.10 Outros Componentes

Os outros componentes da válvula que devem ser citados não são menos importantes, porém não estão ligados à análise desejada por este texto, que é o estudo da contenção da pressão e bloqueio do fluxo. Dentre eles cita-se o Atuador, que pode ser manual, atuado por ROV ou mergulhador, hidráulico atuado por uma linha hidráulica, elétrico por um atuador elétrico ou pneumático por linha pneumática.. O atuador possui a função de transformar, e se possível multiplicar, a entrada de movimento para a haste de acionamento da válvula.

Um atuador manual possui um volante para o caso de válvulas operadas por mergulhador ou uma interface ROV, para o caso de ROV. Em ambos os casos o movimento do operador, que é rotativo, é amplificado e transmitido para a haste.

Para o caso de um atuador hidráulico o movimento é linear e o atuador tem a função de transforma-lo em rotativo, também amplificando-o.

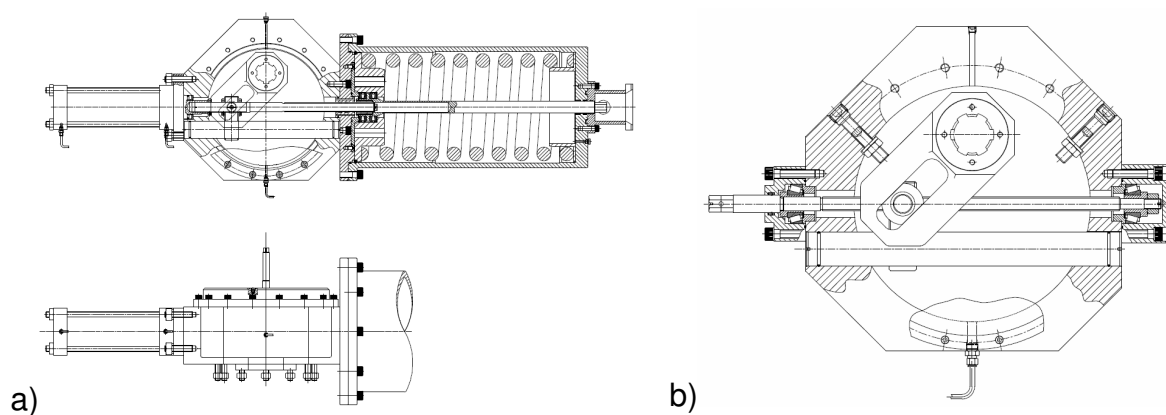


Figura 4-4 – Modelo de atuador a)hidráulico com retorno por mola e b)manual.

4.3 Análise Estrutural do Contato Sede - Esfera

Com o objetivo de aplicar os resultados obtidos na análise de compactação de superfícies, estudou-se o contato entre sede e esfera de válvulas de esfera. O caso adotado inicialmente foi o contato bidimensional típico entre sede e esfera. Inicialmente a válvula utilizada foi o padrão GROVE de 8" com vedação combinada e em seguida uma de vedação metal-metal apenas. O modelo de válvula simulado é largamente utilizado em equipamentos submarinos como PLETs, ILTs, PLEMs e MCVs. No caso da vedação combinada a sede possui um alojamento para o-ring. O o-ring não foi incorporado na análise pois não é objetivo dessa avaliação. Nas válvulas de vedação apenas metal-metal, esse alojamento obviamente não é encontrado. A sede pode ser constituída por dois anéis mas, para efeito desta análise, eles serão tratados como uma única parte.

4.3.1 Condições da Análise

Para o completo entendimento da análise executada é importante que sejam explicadas as etapas consideradas para a válvula. Essas etapas dizem respeito às condições de vedação necessárias para uma válvula de esfera. Nesta análise elas são:

1. Pré-carga – molas que comprimem a sede contra a esfera
2. Baixa pressão – 1,03 Mpa (150 psi)
3. Alta pressão – 37,23 Mpa (5400 psi)

As etapas consideradas para o modelo de elementos finitos serão vistas na sequência.

4.3.2 Pré-Carga

A pré-carga é obtida através de molas que pode ser do tipo helioidal ou *belleville* (mola prato). A quantidade de molas varia com o nominal da válvula. Para o caso estudado de uma válvula de 8" são utilizadas 24 molas.

Cada mola aplica 441.30 N (100 lbf). Assim a pré carga é definida como a multiplicação do número de molas pela força de cada mola. A pré-carga considerada no modelo foi 10591.18 N (240lbf), distribuido na região mostrada pela Figura 4-2.

4.3.3 Baixa e Alta Pressão

Segundo a API 6A [14] uma válvula deve ser capaz de vedar em baixa pressão e em alta pressão. Esses valores são definidos de acordo com a classe de pressão da válvula. A considerada nesse estudo é a 1500, que prevê pressão de trabalho máxima de 24.82 MPa (3600 psi). Uma característica importante da válvula de esfera é que a pressão ajuda na vedação. A Figura 4-5 ajuda nesse entendimento.

No diâmetro 1 da Figura 4-5 existe o topo de um alojamento de o-ring. Assim, a pressão é limitada à esse diâmetro para vedação com o corpo. Na vedação com a esfera os diâmetros 2 e 3 representam o limite de pressão pra as vedações elastomérica e metal-metal respectivamente. Neste estudo apenas será considerada a vedação metal metal entre a sede e a esfera.

Quando a pressão é aplicada na sede esta atua em áreas diferentes que, no caso mostrado, favorece a compressão da sede contra a esfera. Na Figura 4-5 da direita para a esquerda a área pressurizada é a do diâmetro 1, que é maior que a pressurizada na direção oposta, no diâmetro 3. Assim o efeito resultante é a pressão da válvula atuando

no setor circular definido pelos diâmetros 1 e 3 na direção da compactação da sede na esfera.

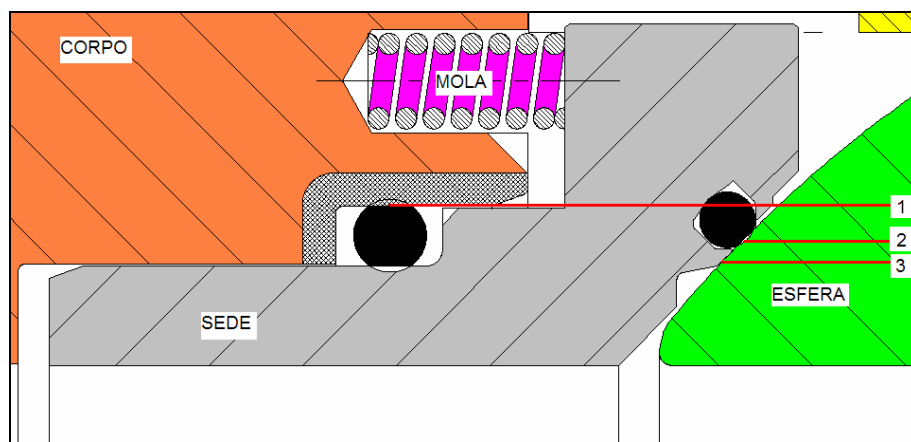


Figura 4-5 – Esquema de contato entre sede e esfera utilizado para modelo de elementos finitos com os diâmetros de vedação.

No caso da válvula de 8” considerada para o modelo de elementos finitos a seção analisada pode ser vista na Figura 4-6. Nela identificam-se os valores dos diâmetros 1, 3 e da passagem, que caracterizam o nominal da válvula.

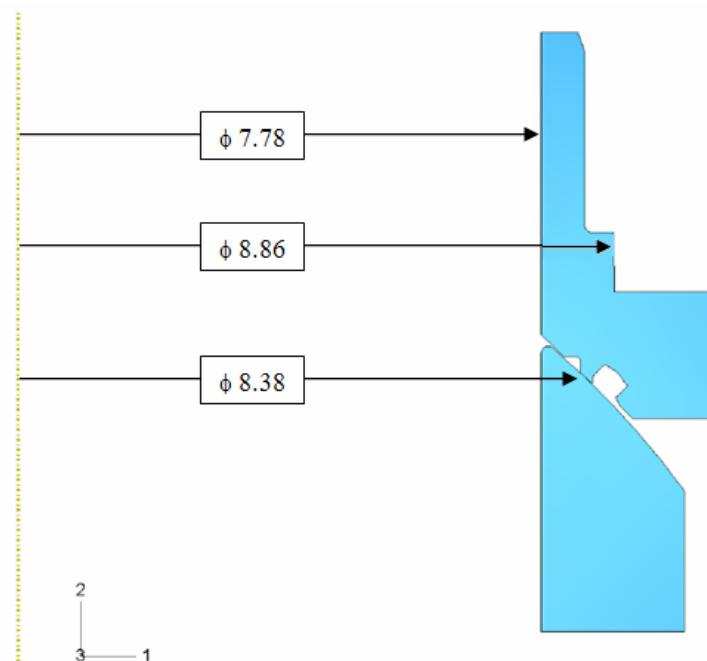


Figura 4-6 – Dimensões principais e modelo das partes em contato do modelo de elementos finitos de sede com alojamento para o-ring.

Como a vedação que se objetiva estudar é a metal-metal, foi analisado um outro tipo de sede, muito similar, que não possui o alojamento para o-ring. Este modelo de sede pode ser visto na Figura 4-7. Os diâmetros considerados são os mesmos que o da sede com alojamento para o-ring.

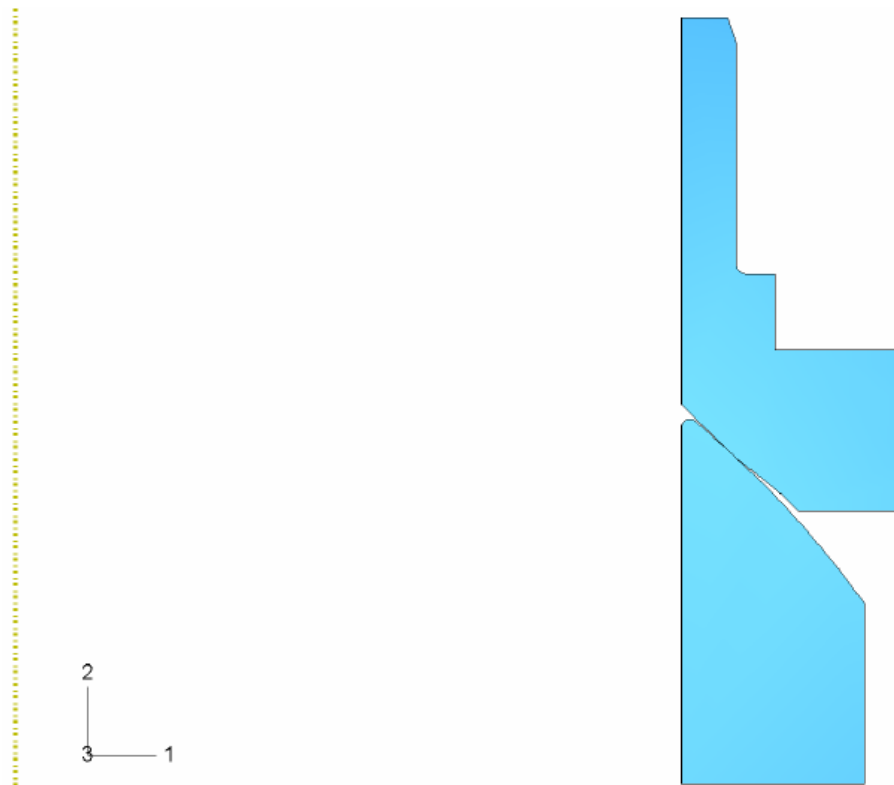


Figura 4-7 – Dimensões principais e modelo das partes em contato do modelo de elementos finitos de sede sem alojamento para o-ring

4.3.4 Modelo de elementos finitos

O modelo de elementos finitos seguiu as mesmas etapas de decisão e construção explicados no Capítulo 3. A análise foi dividida em 5 passos de carga: Pré Carga, Equilíbrio de Forças, Carga de Mola, Baixa Pressão e Alta Pressão. As características do modelo estão listadas na Tabela 4-1

Tabela 4-1 – Características do modelo de elementos finitos desenvolvido para a válvula

Característica	Usado
Material	AISI 8630 mod II 75K – curva real
Elemento	CAX8RH
Técnica de construção de malha	<i>Advancing front</i>
Ordem Geométrica	Quadrática
Tipo de Discretização (Malha)	Livre
Contato	Normal – Hard Tangencial – Multiplicador Lagrangeano (coeficiente de atrito 0.15)
Tipo de Análise	Não linear e axissimétrica
Pré-Carga	Passo de Carga 0 – 10
Equilíbrio de Forças	Passo de Carga 10 – 20
Carga de Mola	Passo de Carga 20 – 30
Baixa Pressão	Passo de Carga 30 – 40
Alta Pressão	Passo de Carga 40 - 50

A pré-carga aplicada no modelo foi um artifício para facilitar a convergência. Inicialmente implicasse um deslocamento prescrito para garantir que as partes entrem em contato. Após esse contato inicial, aplica-se valor das reações obtidas como forças e desativa-se o deslocamento prescrito. Assim o sistema fica equivalente e aí pode continuar a sua solução com forças apenas.

A discretização aplicada ao modelo pode ser vista na Figura 4-8 e o detalhe da região de interesse na Figura 4-9.

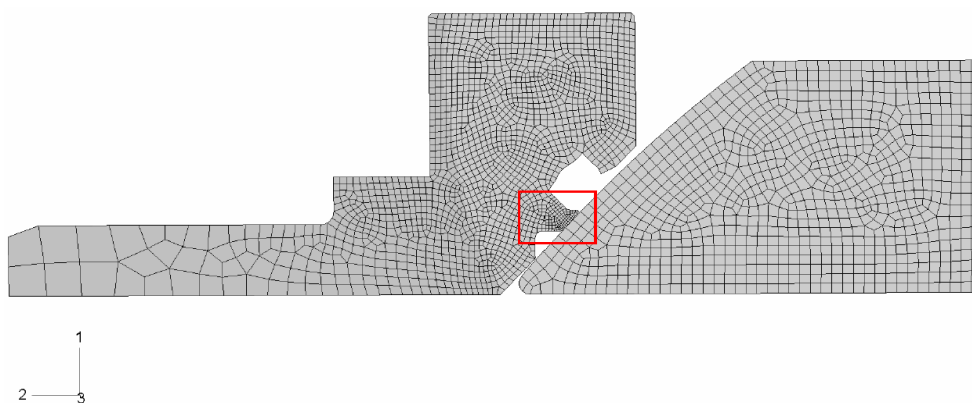


Figura 4-8 – Discretização aplicada nas partes analisadas. Sede e esfera.

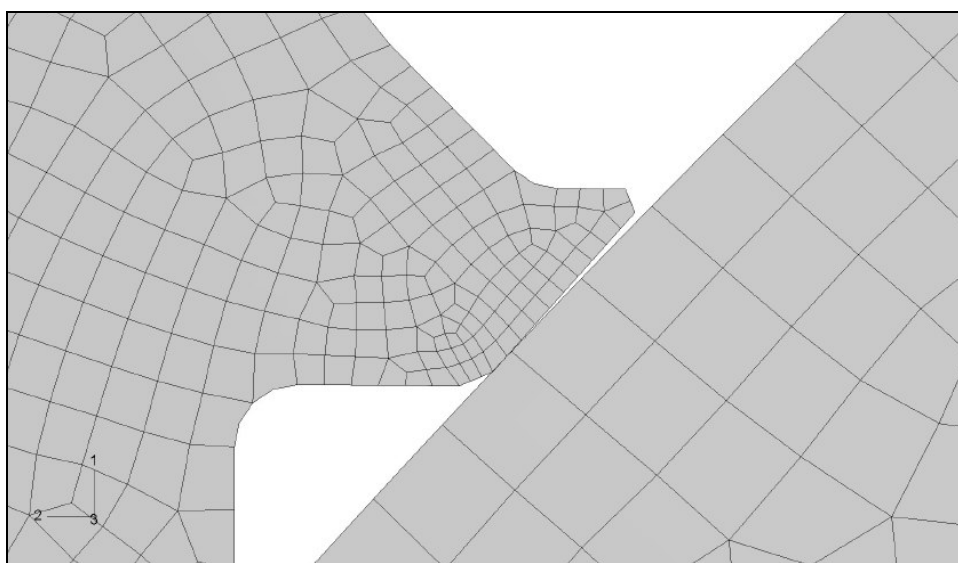


Figura 4-9 – Detalhe da discretização aplicada à região de contato entre sede e esfera.

4.3.5 Resultados – Sede com alojamento para o-ring

A seguir são apresentados os resultados obtidos para o modelo de sede com alojamento para o-ring. Os resultados investigados foram as forças perimetrais, bem como as plotagens de contato e de tensões de von Mises.

A Figura 4-10 mostra o comportamento das forças na direção 1 e 2 do modelo conforme o sistema de coordenadas apresentado na Figura 4-8.

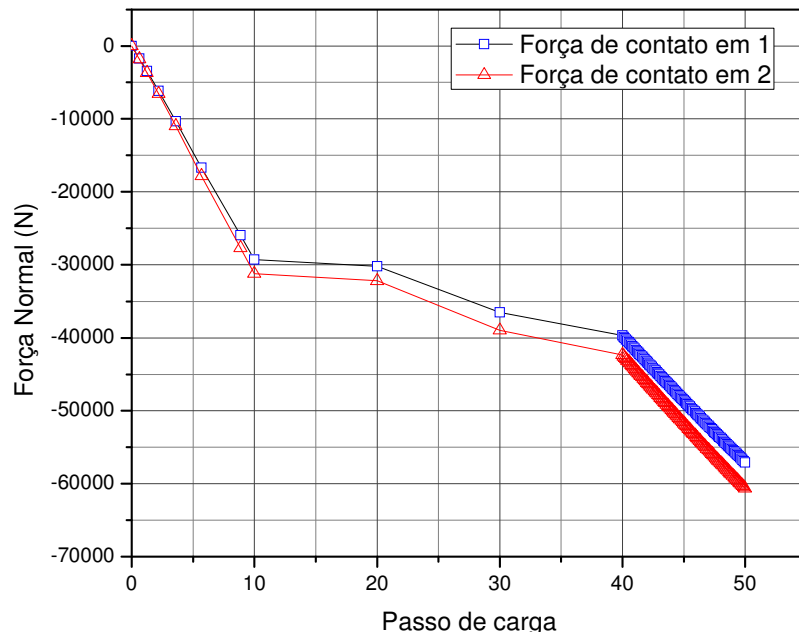


Figura 4-10 – Força compressiva nas direções 1 e 2 para sede com alojamento para o-ring.

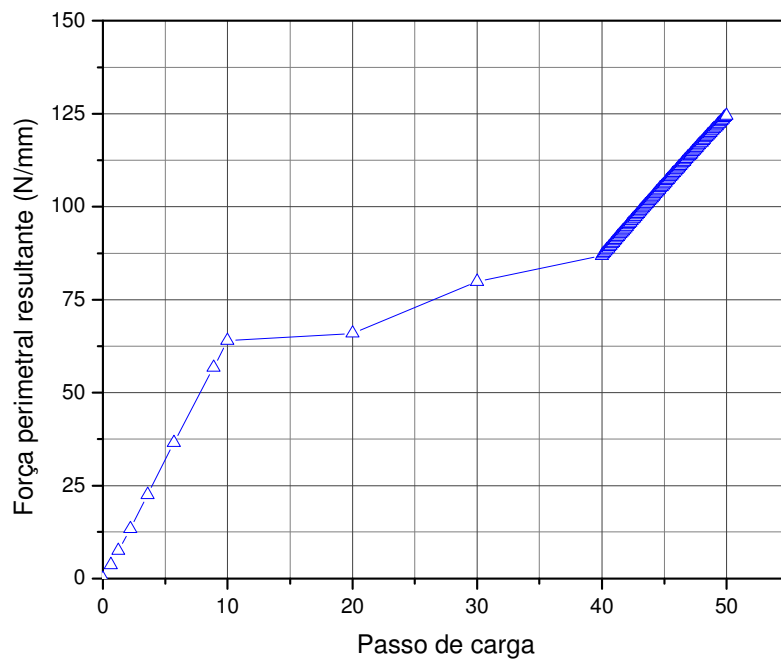


Figura 4-11 – Força perimetral para sede com alojamento para o-ring.

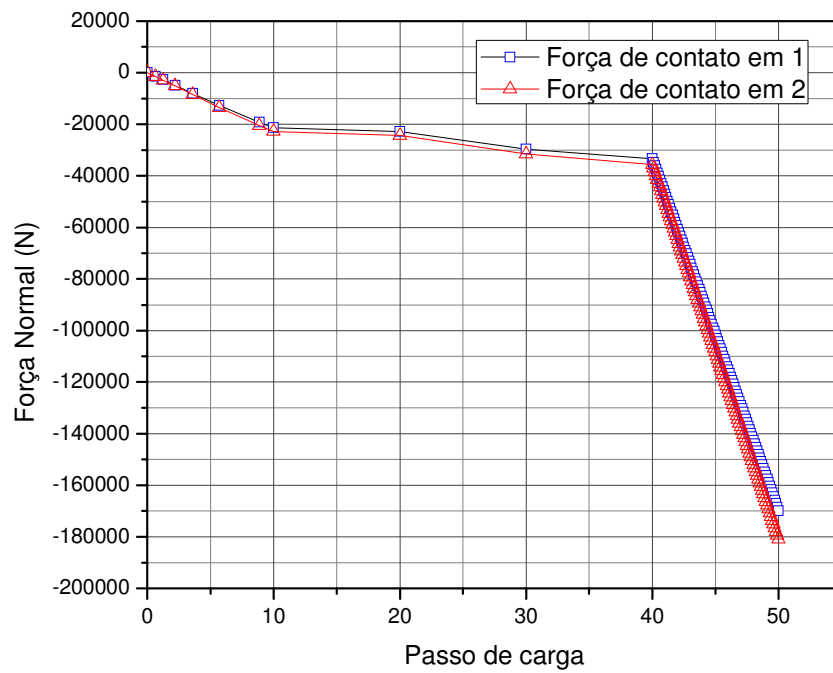


Figura 4-12 – Força compressiva nas direções 1 e 2 para sede sem alojamento para o-ring.

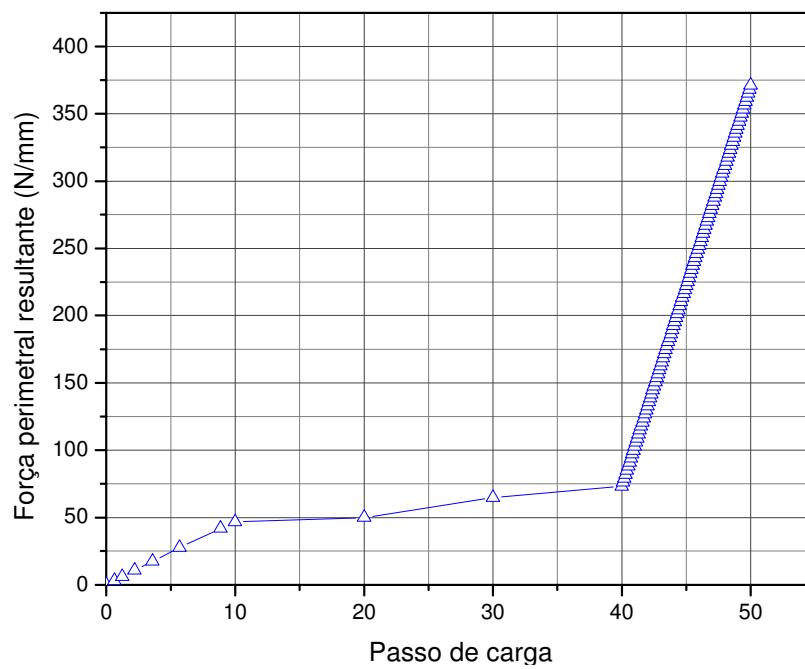


Figura 4-13 – Força perimetral para sede sem alojamento para o-ring.

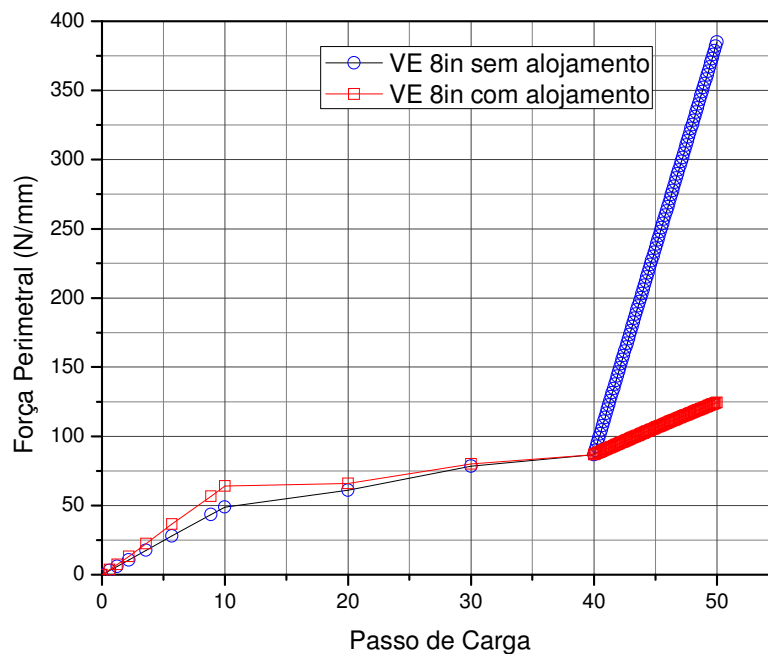


Figura 4-14 – Comparação entre as duas cargas perimerais para os dois tipos de sede.

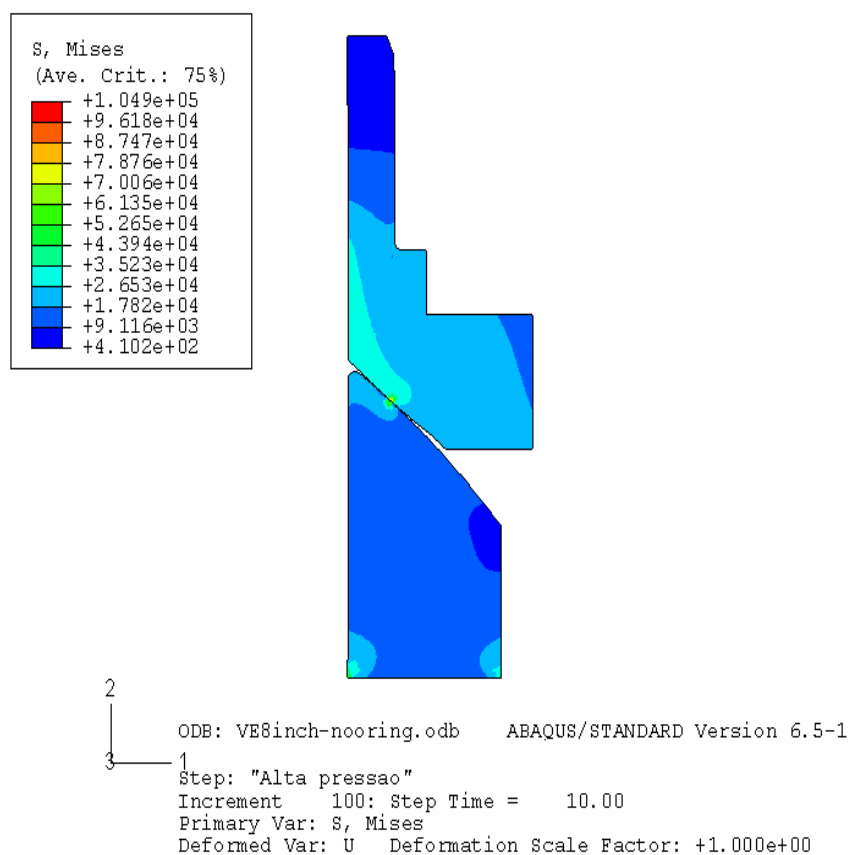


Figura 4-15 – Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede sem alojamento para o-ring.

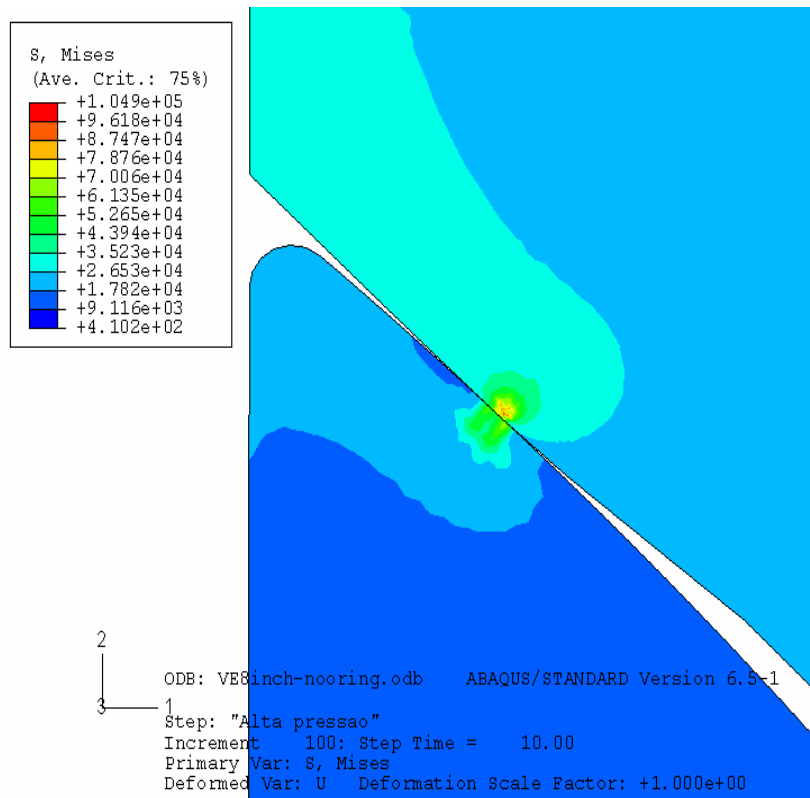


Figura 4-16 – Detalhe da região mais solicitada. Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede sem alojamento para o-ring.

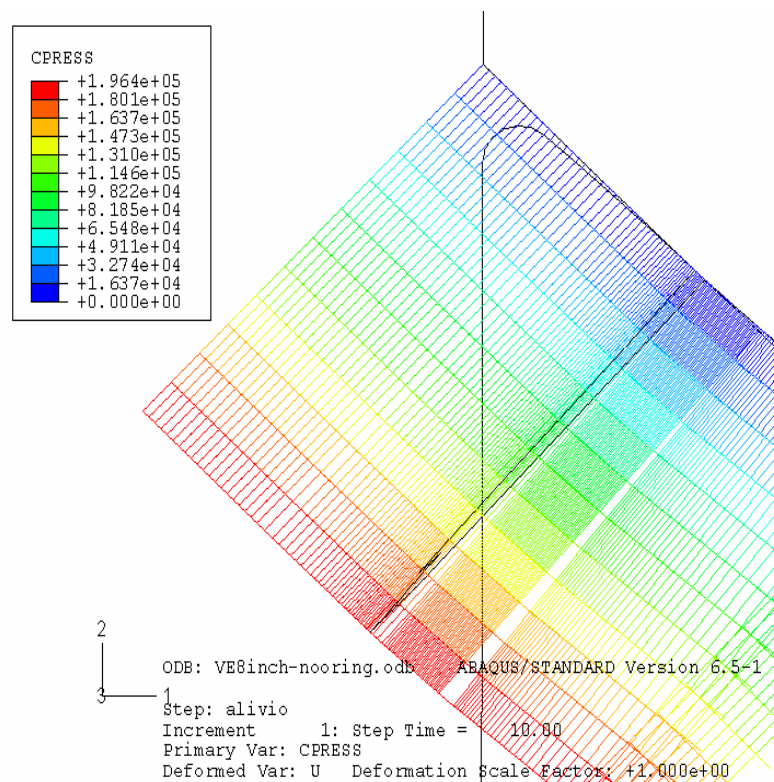


Figura 4-17 – Pressão (psi) de contato entre sede e esfera para sede sem alojamento para o-ring.

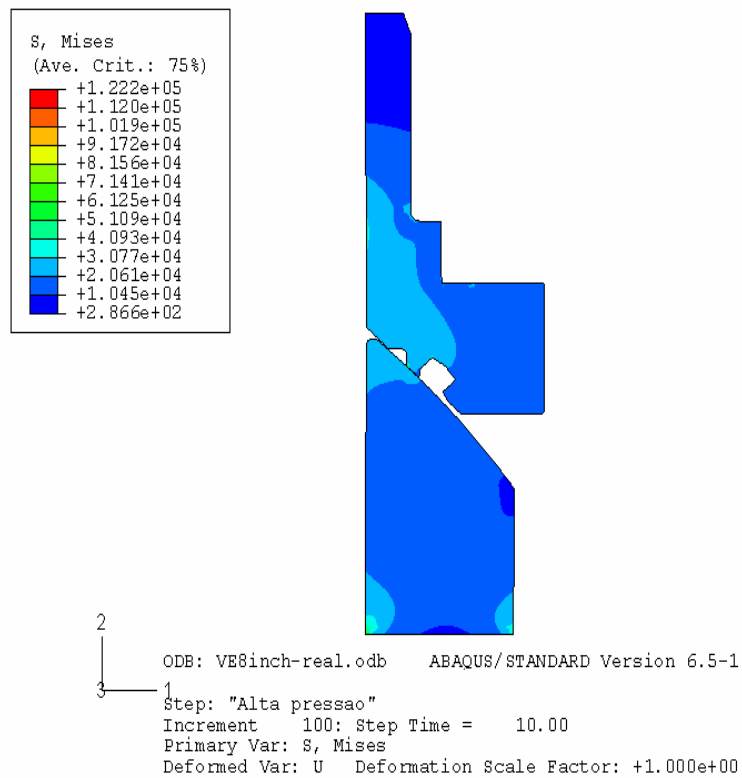


Figura 4-18 – Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede com alojamento para o-ring

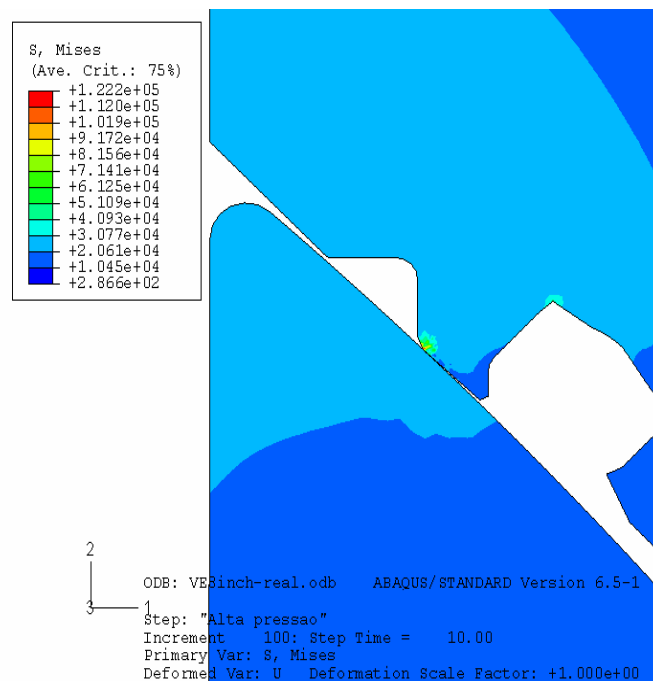


Figura 4-19 – Detalhe da região mais solicitada. Tensões de von Mises (psi) para compatação entre esfera e sede com alojamento para o-ring.

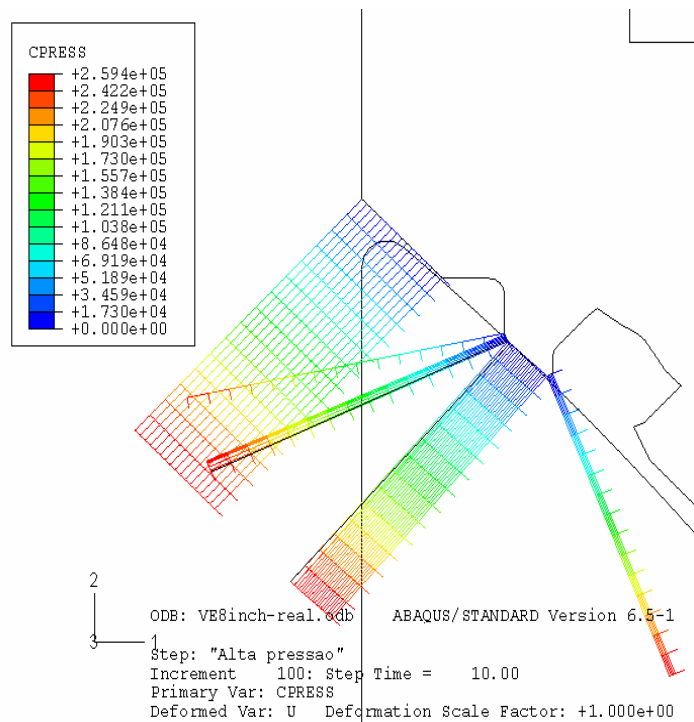


Figura 4-20 – Pressão de contato (psi) entre sede e esfera para sede com alojamento para o-ring.

Os resultados foram resumidos na Tabela 4-2. Os resultados mostram como a diferença de rigidez é fundamental para a diminuição da tensão de contato. A sede que possui alojamento para o-ring, possui maior flexibilidade em seu lábio que a sede compacta sem alojamento para o-ring.

Tabela 4-2 – Resultados do modelo de elementos finitos para as válvulas

Resultado	VE 8in sem o-ring	VE 8in com o-ring
Força Perimetral Máxima	384,84 N/mm (2197,00 lbf/in)	124,54 N/mm (711,14lbf/in)
Máxima Tensão Local	841,16 MPa (122 Ksi)	723,26 MPa (104,90 Ksi)

A discretização foi verificada nos mesmos moldes da feita para a análise de superfície. Com a discretização mais refinada o resultado não se alterou.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Este capítulo expõe as conclusões obtidas sobre a avaliação da vedação metal-metal e sua aplicação no estudo de caso apresentado no Capítulo 4.

5.1 Considerações Gerais

O estudo da compactação de superfícies é importante para determinar a força necessária ao esmagamento de superfícies reais. A análise local considerando a rugosidade permite o entendimento do mecanismo de esmagamento dos picos e vales existentes em superfícies usinadas. A resposta para o sucesso ou não da vedação no entanto é dependente de outros fatores principalmente do fluido que se deseja vedar.

Os resultados obtidos permitem avaliar comparativamente tanto a metodologia de representação de superfícies como o projeto de equipamentos como o do estudo de caso escolhido para esta dissertação.

5.2 Representação de Superfície

A superfície real foi considerada e ajustada por uma função polinomial e por série de Fourier. O erro obtido com a aproximação polinomial foi menor que pela série de Fourier. Entretanto, para o modelo de superfície é interessante que a função seja periódica. Essa é uma característica presente na série de Fourier mas não na aproximação polinomial. Para que a aproximação polinomial seja aceita, é necessário definir periodicidade como hipótese.

Os modelos apresentados para representação de superfície mostraram erro consideravelmente elevado. É necessário definir um critério para aceitação do resultado antes de julgar o mesmo.

Observando as superfícies obtidas pelos caminhos 1 e 2 percebemos diferença considerável no formato entre elas conforme pode ser visto nas Figuras 2-15, 3-4 e 3-5.

É importante ressaltar que segundo TAO *et al* [7] uma superfície pode ser muito bem representada por uma série de Fourier. A diferença entre o estudo desenvolvido por TAO *et al* [7] e o dessa dissertação está no ponto de partida. TAO *et al* [7] iniciou seu ajuste considerando uma superfície representada pelo modelo Fractal apresentado no Capítulo 2 deste texto. Foi ajustando por Fourier a superfície gerada a partir do modelo Fractal que TAO *et al* [7] concluiu que a série de Fourier pode representar bem uma superfície rugosa.

Neste texto a superfície ajustada foi medida com o microscópio AFM. Dessa forma a superfície de partida é real e não um modelo. Para o caso analisado, a série de Fourier não foi tão eficaz quanto para TAO *et al* [7], o que leva à conclusão de que a aproximação escolhida depende do tipo de superfície.

Pode-se dizer então que a série de Fourier não representa tão bem uma superfície rugosa real, porém devido ao sucesso obtido por TAO *et al* [7] ela pode ser uma boa aproximação para superfícies geradas a partir de modelos Fractais.

5.3 Força de Compactação

Na análise local que verificou a força necessária para a compactação da superfície foi mostrado que, apesar de bem diferentes entre si, a força para compactação de ambas as superfícies foi muito próxima.

Dessa maneira pode-se dizer que o formato da superfície não é determinante no resultado, desde que ambas estejam com o mesmo nível de acabamento superficial. Assim, esse resultado torna aceitável o erro encontrado na fase de ajuste da superfície, desenvolvida no Capítulo 2 desta dissertação.

A força de compactação foi obtida de forma paramétrica visando sua aplicação a qualquer caso de carga distribuída uniformemente. A diferença obtida para a força de compactação entre o caminho 1 e 2 foi de 8.8%.

5.4 Análise da Válvula de esfera – estudo de caso

O estudo de caso apresentado no Capítulo 4 comparou as duas possibilidades de vedação metal-metal em válvulas de esfera. A primeira delas é com a vedação combinada, onde o selo elastomérico é responsável pela vedação em baixa pressão e progressivamente, além do o-ring, a sede encosta também na esfera dando início à vedação metal-metal. O segundo tipo de vedação foi o metal-metal onde não existe elastômero e a sede encosta desde o início na esfera pra a vedação.

Constatou-se que a rigidez da região da sede onde ocorre a vedação metal-metal é importante para a vedação. No caso da sede com alojamento para o-ring, a região de contato metal-metal é menos rígida e os valores de força obtidos foram menores. Já para o projeto de sede sem alojamento de o-ring a região de contato possui maior rigidez e o valor da força de contato foi bem maior.

Esse resultado é importante pois evidencia uma possibilidade de que numa válvula metal-metal, o o-ring seja o real responsável pela vedação e que o metal-metal não seja efetivo. Já no caso de uma válvula com sede sem alojamento para o-ring, a chance de se obter uma vedação metal-metal é bem maior, dado que a força de contato obtida é maior.

Quando comparados os valores obtidos para as válvulas analisadas e os valores obtidos para a compactação das superfícies obtidos no Capítulo 3, percebe-se que entre a sede e esfera não há a compactação total da superfície. Esse fato pode explicar o motivo de não haver vedação quando o fluido de trabalho é gás, por exemplo, mas haver vedação quando o fluido é água. A molécula da água é maior que a do gás (geralmente

Nitrogênio). Assim é mais difícil para ela permear os possíveis poros deixados por uma compactação incompleta.

Outro motivo que explica a falha na vedação está no processo de fabricação. Geralmente as válvulas e sedes são lapidadas no sentido circunferencial conforme mostrado na Figura 5-1. A direção da lapidação é fundamental para a vedação pois ela define num caso de compressão incompleta se existe ou não caminho por onde o fluido possa passar.

Conforme visto no Capítulo 2, a superfície usinada possui direção preferencial deixada pela própria operação de usinagem. Os picos e vales se estendem por linhas e o fluido pode passar por entre elas. Uma recomendação para ajudar a vedação é deixar os picos na direção normal a escoamento. Dessa forma se possui uma garantia maior da vedação. A Figura 5-1 esclarece os dois procedimentos, o atual e o recomendado.

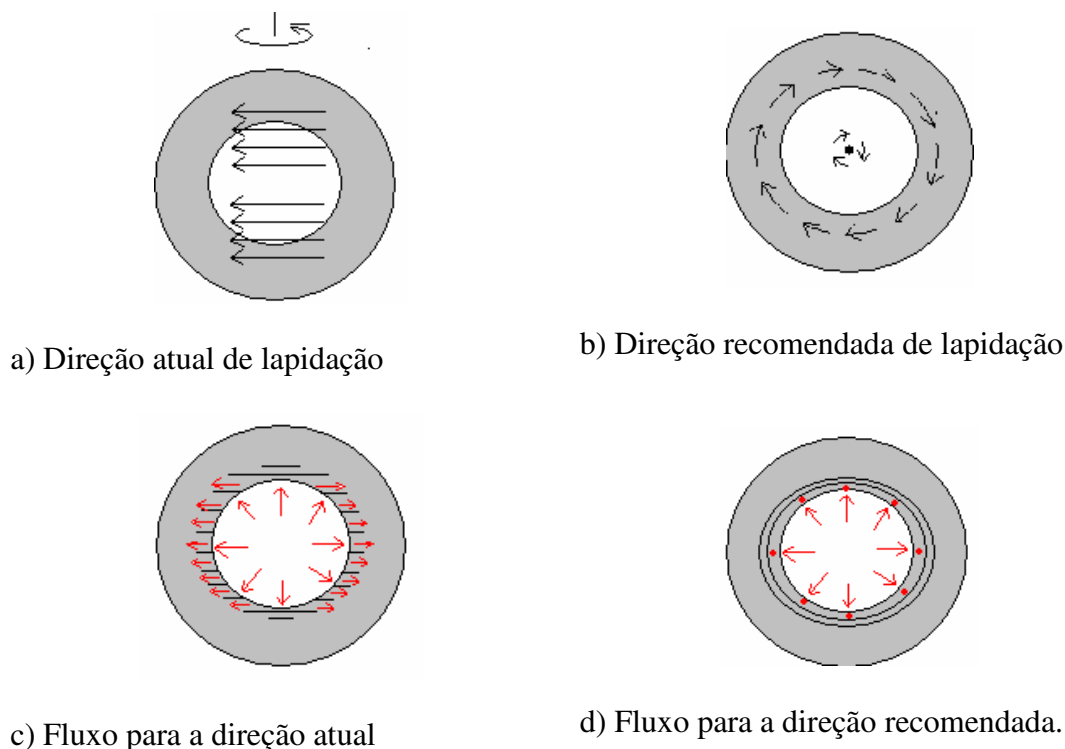


Figura 5-1 – Direção atual e recomendada de lapidação entre sede e esfera.

5.5 Proposta para Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros cita-se a determinação da força necessária à compactação considerando outras qualidades de acabamento e materiais combinados. Por exemplo, um aço carbono como base e um revestimento de Níquel, que é mais duro que o aço carbono.

Para as válvulas de esfera é necessário avaliar o efeito cíclico da vedação. Uma vez aplicada e retirada a carga compressiva, é importante garantir que nos ciclos subsequentes a válvula ainda esteja com boa performance de vedação. Esse tema é bastante interessante pois trata de obter grandes deformações localizadas e recuperação, evento não comum nos metais.

REFERÊNCIAS

- [1] PETROBRAS, “Relatório Anual Petrobras – 2006”, Petróleo Brasileiro S/A, 2006.
- [2] GLOBAL SPEC website, portfólio público.
- [3] FERRARESI, D., *Fundamentos da Usinagem dos Metais*, 10ª reimpressão, Edgar Blücher LTDA editora, 2000
- [4] SULLIVAN, *et ali* – “Application of a Three-Dimensional Surface Analysis System to Prediction of Asperity Interaction in Metallic Contacts”, 1st Journal of Machining Tools Manufacturers, v. 32, nº 1/2, pp. 157-169, 1992
- [5] ZANETTE, S.I., “Funcionamento e Utilização de um Microscópio de Força Atômica”, IV Escola do CBPF, 2002
- [6] S. WANG, K. KOMVOPOULOS, “A Fractal Theory of the Interfacial Temperature Distribution in the Slow Sliding Regime, Part I. Elastic Contact and Heat Transfer Analysis”, Journal of Tribology, nº 116, pp. 812-823, 1994.
- [7] TAO *et ali*, “The Behavior of an Elastic-Perfectly Plastic Sinusoidal Surface Under Contact Loading” – *WEAR*, 261, pp. 145-154, Oct 2005.
- [8] BOYCE, W.E., DIPRIMA R.C., “*Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*” 6ª ed., LTC Editora, 1999.
- [9] ABAQUS DOCUMENTATION – “*ABAQUS Analysis User’s Manual*” – © ABAQUS Inc. 2003
- [10] LUBLINER, J., *Plasticity Theory*, Dover Publications, 2005
- [11] FMC INTERNAL SPECIFICATION – “*Material Specification for AISI Steel Alloy 8630 mod.II, 75K*” – FMC Technologies
- [12] Man, K.W., “*Contact Mechanics Using Boundary Elements*”, Topics in Engineering, v. 22, Computational Mechanics Publications, 1994.

- [13] DATA SHEET, “Side Entry and Top Entry Trunnion Mounted Ball Valves”,
Cooper Cameron Valves Data Sheet, www.c-a-m.com, 2006
- [14] API 6A – “Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment”, 19^a ed.,
American Petroleum Institute, Jul, 2004.
- [15] TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. E., *Mecânica dos Sólidos*, 1^a ed., traduzida por
DE CARVAHO, J. R., LTC editora, 1994
- [16] FMC Technologies, portfólio público.
- [17] PETROBRAS, “Relatório Anual Petrobras – 2006”, Petróleo Brasileiro S/A, 2006.
- [18] BURDEN, R.L., FAIRES, J.D., “*Análise Numérica*”, 1^a ed., Thomson Editora,
2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)