

# *Dissertação de Mestrado*

## **Simulação Computacional da Interação Fluido-Estrutura em Bombas de Cavidades Progressivas**

**Rairam Francelino Cunha de Almeida**

**Natal, março de 2010**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INTERAÇÃO  
FLUIDO-ESTRUTURA EM BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESSIVAS***

*por*

***RAIRAM FRANCELINO CUNHA DE ALMEIDA***

***Dissertação apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre***

*Natal – Rio Grande do Norte  
Março - 2010*

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila  
Mamede

Almeida, Rairam Francelino Cunha de.

Simulação computacional da interação fluido-estrutura em bombas de cavidades progressivas / Rairam Francelino Cunha de Almeida. – Natal, RN, 2010.

102 f.

Orientador: João Alves de Lima.

Co-orientador: Emilio Ernesto Paladino.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Bombas de Cavidades Progressivas (BCP) – Dissertação. 2. Simulação computacional 3D-t – Dissertação. 3. Geração de malhas – Dissertação. 4. Interação fluido-estrutura (FSI) – Dissertação. I. Lima, João Alves. II. Paladino, Emilio Ernesto. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.65(043.3)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

***SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INTERAÇÃO  
FLUIDO-ESTRUTURA EM BOMBAS DE CAVIDADES  
PROGRESSIVAS***

***Rairam Francelino Cunha de Almeida***

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**Área de Concentração:** Mecânica Computacional  
**Orientador:** Prof. Dr. João Alves de Lima  
**Co-Orientador:** Prof. Dr. Emilio Ernesto Paladino

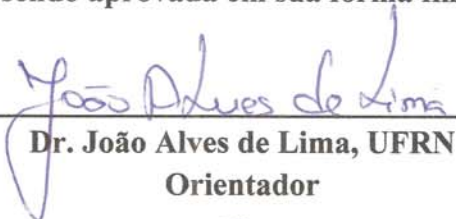
Natal – RN  
2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA EM  
BOMBAS DE CAVIDADES PROGRESSIVAS**

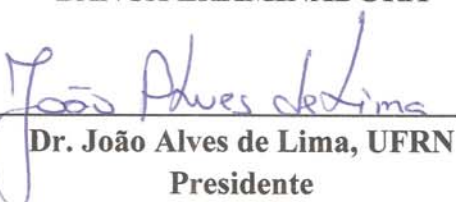
**RAIRAM FRANCELINO CUNHA DE ALMEIDA**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final**

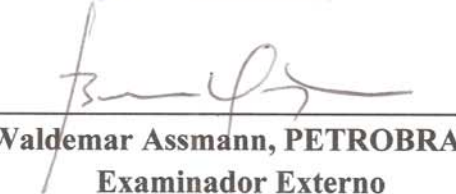
  
\_\_\_\_\_  
**Dr. João Alves de Lima, UFRN**  
**Orientador**

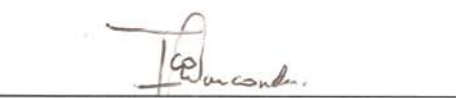
  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Emilio Ernesto Paladino, UFRN**  
**Co-orientador**

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. João Alves de Lima, UFRN**  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Emilio Ernesto Paladino, UFRN**  
**Co-orientador**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Benno Waldemar Assmann, PETROBRAS/UN-RNCE**  
**Examinador Externo**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Francisco Marcondes, UFC**  
**Examinador Externo**

*“Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas nada pode ser modificado até que seja enfrentado. Dificuldades e obstáculos são fontes valiosas de saúde e força para qualquer sociedade”.*

Albert Einstein

## Dedicatória

*Dedico aos meus pais, Raimundo e Maria por terem heroicamente batalhado para que me permitisse colher os frutos do meu esforço e dedicação.*

*A minha namorada Tatyanna, que dividiu comigo todas as dificuldades e satisfações proporcionadas por este trabalho.*

*Aos meus irmãos, Raimar e Raiana.*

*E ao meu sobrinho Rafael.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

A minha família, principalmente aos meus pais pelo apoio incondicional.

Agradeço sinceramente aos Professores e amigos Dr. João Alves de Lima e Dr. Emilio Ernesto Paladino pela dedicação, orientação e constante incentivo durante a realização deste trabalho.

LMC – Laboratório de Mecânica Computacional através do Prof. Dr. João Alves de Lima por ceder o espaço e os computadores com os “*softwares*” para que eu desenvolvesse este trabalho.

A Tatyanna, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus amigos Hugo e João José, pelo incentivo e apoio.

Aos meus amigos e companheiros de Pós-Graduação (Felipe Assmann, Paulo Alison e Vinícius Ângelo) pelo incentivo e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos companheiros do LMC (Guilherme, Coringa, Mikhail, Vitor Assmann e Victor) pelo apoio e companheirismo.

NUPEG - PRH-ANP 14 pelo apoio e suporte financeiro para a realização deste trabalho.

A PETROBRAS pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

A Netzsch do Brasil, pelo fornecimento das propriedades constitutivas do elastômero.

Finalmente, quero agradecer a todos aqueles que, direta ou indiretamente, ajudaram para que este trabalho fosse concluído.



---

---

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS _____	iii
LISTA DE TABELAS _____	vii
LISTA DE SÍMBOLOS _____	viii
LISTA DE SIGLAS _____	xi
RESUMO _____	xii
ABSTRACT _____	xiii
CAPÍTULO 1 _____	1
INTRODUÇÃO _____	1
1.1.    Histórico _____	2
1.2.    Motivação _____	3
1.3.    Objetivos _____	4
1.4.    Organização do Trabalho _____	5
CAPÍTULO 2 _____	5
SISTEMA DE ELEVAÇÃO _____	5
2.1.    Elevação Natural _____	6
2.2.    Elevação Artificial _____	6
2.2.1.    “Gás lift” (GL) _____	6
2.2.2.    Bombeio mecânico por hastes (BMH) _____	7
2.2.3.    Bombeio centrífugo submerso (BCS) _____	8
2.2.4.    Bombeio por cavidades progressivas (BCP) _____	8
2.3.    Sistema de elevação por BCP _____	8
2.3.1.    Componentes geométricos _____	8
2.3.2.    Vantagens / Desvantagens _____	10
CAPÍTULO 3 _____	11
GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE PACOTES COMERCIAIS _____	11
3.1.    Construção do modelo sólido _____	12
3.2.    Cinemática da BCP _____	12

3.3.	Geração da malha _____	16
3.3.1.	Problemática _____	16
3.3.2.	Malhas não-estruturadas _____	17
3.3.3.	Malhas estruturadas _____	18
3.4.	Topologias geométricas _____	21
3.4.1.	Topologia de duas retas _____	21
3.4.2.	Topologia de quatro retas _____	22
3.4.3.	Topologia de retângulo e quadrado _____	23
3.4.4.	Topologia tal que posição radial dos pontos internos diferente dos externos _____	24
3.4.5.	Topologia radial centrada nas seções do rotor e do estator _____	25
3.4.6.	Topologia centrada na seção do estator _____	27
3.5.	Implementação Computacional _____	29
3.5.1.	Especificação, via CEL, dos nós sobre a superfície do rotor _____	30
3.5.2.	Leitura de arquivos de malhas _____	31
CAPÍTULO 4 _____		35
GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE METODOLOGIA PRÓPRIA _____		35
4.1.	Topologias geométricas _____	36
4.1.1.	Topologia radial centrada nas seções do rotor e do estator _____	36
4.1.2.	Topologia centrada na seção do estator _____	38
4.2.	Geração da malha (metodologia própria) _____	40
4.3.	Cálculo, via “ <i>Junction Box</i> ”, das coordenadas dos nós da malha _____	51
4.4.	Resultados e Discussões _____	52
4.4.1.	“ <i>Software</i> ” BCP MESHER & CFD _____	53
4.4.2.	Geração da Malha _____	53
4.4.3.	Validação _____	57
CAPÍTULO 5 _____		61
INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA - FSI _____		61
5.1.	Caracterização do elastômero _____	62
5.2.	Análise da Interação Fluido-Estrutura _____	65

5.2.1.	Método particionado (“ <i>one-way</i> ”)	66
5.2.2.	Métodos monolíticos (“ <i>two-way</i> ”)	69
a.	Interação “ <i>two-way</i> ” explícita	70
b.	Interação “ <i>two-way</i> ” implícito via Ansys	73
c.	Interação “ <i>two-way</i> ” implícito simplificado	74
CAPÍTULO 6		91
CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS		91
CAPÍTULO 7		98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		98

---



---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rotor e estator de uma BCP. _____	2
Figura 2: Bomba alternativa para bombeio mecânico por hastes _____	7
Figura 3: Relação de passos de uma Bomba de Cavidades Progressivas _____	9
Figura 4: Dimensões características da seção transversal de uma BCP de um lóbulo _____	9
Figura 5: Parâmetros de rotação da bomba _____	13
Figura 6: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$ _	14
Figura 7: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 135^\circ$	14
Figura 8: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que $\theta = 180^\circ$ $\theta = 225^\circ$	15
Figura 9: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que $\theta = 270^\circ$ $\theta = 315^\circ$	15
Figura 10: Posição do rotor, em relação ao estator, no instante em que $\theta = 360^\circ$ _____	15
Figura 11: Malha Não-Estruturada _____	17
Figura 12: Malha gerada no CFX-Mesh _____	18
Figura 13: Malha Estruturada _____	19
Figura 14: Exemplo de malhas geradas utilizando o ICEM _____	20
Figura 15: Malha da BCP gerada no ICEM _____	20
Figura 16: Topologia de duas Retas: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional	21
Figura 17: Topologia de quatro Retas: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional _____	22
Figura 18: Topologia de retângulo e quadrado: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional _____	23
Figura 19: Topologia de 24 pontos externos e 48 pontos internos: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional _____	24
Figura 20: Topologia de 26 pontos externos e 96 pontos internos: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional _____	25
Figura 21: Ilustração das linhas de base para distribuição dos pontos (centrada na seção do rotor e do estator) _____	26
Figura 22: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do rotor e do estator)	26
Figura 23: Malha numérica representando a região fluida, topologia baseada na construção de linhas helicoidais _____	27
Figura 24: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluida (centrada na seção do estator) _____	28
Figura 25: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do estator) _____	28

---

Figura 26. Malha numérica representando a região fluida, topologia baseada na construção de linhas retas longitudinais _____	29
Figura 27: Malha ilustrando grandes distorções ao longo do tempo causadas pela rigidez artificial, para os tempos (a) $t = 0.75 s$ , (b) $t = 2 s$ , (c) $t = 0.75 s$ e (d) $t = 2 s$ . __	31
Figura 28: Comparação da vazão volumétrica versus diferencial de pressão para óleo ____	32
Figura 29: Comparação da vazão volumétrica versus diferencial de pressão para água ____	33
Figura 30: Distribuição de Pressão ao longo do estator da BCP _____	33
Figura 31: Ilustração das linhas de base para distribuição dos pontos (centrada na seção do rotor e do estator) _____	37
Figura 32: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do rotor e do estator)	37
Figura 33: Ilustração das malhas computacionais 3D (centrada na seção do rotor e do estator) _____	38
Figura 34: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluido (centrada na seção do estator) _____	38
Figura 35: Ilustração das malhas computacionais sobpostas as linhas de base (centrada na seção do estator) _____	39
Figura 36. Ilustração das malhas computacionais 3D (centrada na seção do estator) ____	39
Figura 37: Tipos de geometria/malhas possíveis pela presente metodologia. BCP/Malhas com: (a) folga ou interferência negativa, (b) interferência nula, (c) interferência positiva _____	40
Figura 38: Numeração de nós produzida de acordo com a regra da mão direita _____	41
Figura 39: Esquema para Determinação dos Pontos Espaciais da Malha _____	42
Figura 40: Esquema para determinação analítica dos pontos espaciais da malha _____	44
Figura 41: Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas de geração de malhas _____	48
Figura 42: Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas da cinemática da BCP _____	52
Figura 43: Ambiente Gráfico do BCP MESHER & CFD _____	53
Figura 44: Arquivo INDATA _____	55
Figura 45: Tela de Execução do Programa _____	56
Figura 46: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão, $Q \times \Delta P$ , $(42,0 \times 10^{-3} \text{ Pa.s})$ . _____	59
Figura 47: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão, $Q \times \Delta P$ , $(481,0 \times 10^{-3} \text{ Pa.s})$ . _____	59

---

Figura 48: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão, $Q \times \Delta P$ , ( $1 \times 10^{-3}$ Pa.s). _____	60
Figura 49: Teste de Tração/Compressão em Amostra com Deformação Inicial de 5 e 10%. _____	63
Figura 50: Teste de Tração/Compressão em Amostra com Deformação Inicial de 15 e 25%. _____	63
Figura 51: Teste de Compressibilidade Volumétrica. _____	63
Figura 52: Testes de Relaxação em Amostras com Deformação inicial de 10% _____	64
Figura 53: Ajuste dos Dados Experimentais para o Modelo <i>Yeoh de 3ª Ordem</i> no Módulo “ <i>Engineering Data</i> ” do ANSYS. Deformação Inicial: 5% e 25%. Temperatura: 23 °C. _____	64
Figura 54: Fluxograma esquemático da interação unidirecional _____	66
Figura 55: Campo de Deformações em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada) _____	68
Figura 56: Campo de Tensões em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada) _____	68
Figura 57: Componente Longitudinal de Deformação em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada) _____	68
Figura 58: Componente Longitudinal de Deformação Longo da Superfície do Estator da BCP (Escala Ampliada) _____	69
Figura 59: Fluxograma esquemático da interação “ <i>two-way</i> ” explícito _____	70
Figura 60: Perfil de pressão axial ao longo da bomba para folga constante e FSI-Explícito _____	71
Figura 61: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para BCP metálica e FSI explícito ao longo do tempo _____	72
Figura 62: Comparação da vazão entre os casos com folga constante e modelo FSI explícito ao longo do tempo _____	72
Figura 63: Fluxograma esquemático da interação “ <i>two-way</i> ” <i>Ansys</i> _____	73
Figura 64: Deformação radial em cada plano transversal da BCP, modelo implícito _____	74
Figura 65: Fluxograma esquemático da interação “ <i>two-way</i> ” simplificado _____	76
Figura 66: Comparação da vazão entre os casos com modelo, fluido dinâmico e experimental, com folga constante e folga FSI implícito simplificado, versus diferencial de pressão _____	78
Figura 67: Comparação da vazão entre os casos com folga constante e modelo FSI implícito simplificado ao longo do tempo _____	79
Figura 68: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito simplificado ao longo do tempo _____	80

Figura 69: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito _____	81
Figura 70: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito _____	81
Figura 71: Linhas de medidas ao longo da coordenada $z$ da BCP _____	82
Figura 72: Perfil da deformação radial ao longo da coordenada $z$ da bomba, em $\theta = 0^\circ$ . __	83
Figura 73: Perfil da deformação radial ao longo da coordenada $z$ da bomba, em $\theta = 90^\circ$ . _	83
Figura 74: Comportamento da deformação radial ao longo de uma linha em cada posição longitudinal $z$ da bomba, para a posição angular $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e $270^\circ$ . ____	84
Figura 75: Comportamento da pressão ao longo de uma linha em cada posição longitudinal $z$ da bomba, para a posição angular $\theta = 90^\circ$ . _____	85
Figura 76: Comportamento da pressão ao longo de uma linha em cada posição longitudinal $z$ da bomba, para as posições angulares $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e $270^\circ$ . _____	86
Figura 77: Comportamento da pressão e deformação radial ao longo de uma linha em cada posição longitudinal $z$ da bomba, para a posição angular $\theta = 0^\circ$ . _____	87
Figura 78: Análise de Convergência (vazão em função da razão do número de nós da malha), para as razões de aspecto máxima de $\sim 71,0$ e $\sim 35,0$ . _____	88
Figura 79: Análise de Convergência (vazão em função da razão de aspecto da malha), para um número de nós de $\sim 665.020$ . _____	88
Figura 80: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 206,84 kPa. _____	89
Figura 81: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 551,58 kPa _____	89
Figura 82: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 896,32 kPa _____	90
Figura 83: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluida (centrada na seção do rotor) _____	94
Figura 84: Ilustração das linhas de base para traçado da malha (centrada na seção do rotor) geometria com $E = \frac{R_{SR}}{2}$ _____	95

---

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Parâmetros geométricos da BCP dos experimentos de Gamboa <i>et al.</i> (2002 e 2003).	32
Tabela 2: Propriedades dos fluidos usados nos experimentos de Gamboa <i>et al.</i> (2002 e 2003).	32
Tabela 3: Parâmetros Geométricos	54
Tabela 4: Parâmetros da Malha	54
Tabela 5: Características Numéricas da Malha Temporal Computacional	55
Tabela 6: Características dos Fluidos	58



---



---

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Alfabeto Latino**

$C_0$	Posição do centro da seção transversal do rotor em um instante inicial, $t_0$
$C_1$	Posição do centro da seção transversal do rotor em um instante posterior, $t$
$C_2$	Linha circular da geometria do rotor
$C_3, C_4$	Linhas circulares da geometria do estator
$C_{i0}, D$	Propriedades constitutivas dos elastômeros
$C_{SR}$	Centro da seção do rotor
$d_c = \overline{P_E P_{SR}}$	Distância entre o centro da hélice do rotor ao centro do estator
$d_{CSR}$	Deslocamento do centro da seção do rotor
$dP$	Diferencial de pressão
$d_R$	Menor diâmetro do rotor
$d_{HR}$	Maior diâmetro do rotor
$d_s$	Diâmetro menor do estator
$d_{SM}$	Diâmetro maior do estator
$dt$	Passo de tempo
$d_{ti}$	Diâmetro do tubo do estator
$E$	Excentricidade
$E$	Modulo de elasticidade
$\bar{I}$	Primeiro invariante do tensor tensão
$J$	Determinante do gradiente de deformação elástica
$L$	Comprimento da espessura elastomérica
$n$	Número de malhas
<b>NEL</b>	Número de total de elementos hexaédricos na BCP
<b>NEL<sub>CAS</sub></b>	Número de elementos em cada fatia: estator/rotor
<b>NEL<sub>FZ</sub></b>	Número de elementos em cada fatia: entrada/saída
<b>NFZ<sub>PST</sub></b>	Número de seções transversais, ou faces, por passo da BCP
<b>NFZ<sub>TOT</sub></b>	Número total de faces ao longo da BCP
<b>NL<sub>Z</sub></b>	Número de linhas “circulares” em uma seção transversal da BCP
<b>N<sub>MESHT</sub></b>	Número de passos de tempo por rotação do rotor
<b>NPST</b>	Número de passos do estator

---

$\mathbf{NPT}_{FZ}$	Número de pontos por face/seção transversal
$\mathbf{NPT}_L$	Número de pontos ao longo de uma linha “circular” em uma seção transversal da BCP
$\mathbf{NPT}_{TOT}$	Número total de pontos na BCP
$P$	Pressão
$P_{i,j}^k$	Pressão em cada ponto em cada iteração temporal
$P_0$	Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor em um instante posterior, $t_0$
$P_1$	Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor em um instante posterior, $t$
$P_2$	Ponto de intersecção entre a linha radial e a seção transversal do estator
$P'_2$	Ponto de intersecção entre a linha radial e a seção transversal do estator na posição deformada
$P_E$	Centro da seção do estator
$P_{HR}$	Centro da hélice do rotor
$P_{SR}$	Centro da seção do rotor
$P_r$	Passo do rotor
$P_s$	Passo do estator
$Q$	Vazão da bomba
$R_0$	Linha de base para geração da malha
$R_1, R_2$	Linhas retas da geometria do estator
$R_{SR}$	Raio da seção transversal do rotor
$R_{ST}$	Raio da seção circular do estator
$t$	Tempo
$t_{volta}$	Tempo para rotor efetuar uma rotação/volta
$w$	Folga entre o estator e o rotor
$w_{min}$	Folga mínima entre o estator e o rotor
$w_{max}$	Folga máxima entre o estator e o rotor
$W$	Modelo reológico <i>Yeoh de 3ª ordem</i>
$x$	Coordenada cartesiana na direção $x$
$X_{CSR}$	Coordenada $x$ do centro da seção transversal do rotor

---

$X_{P_0}$	Coordenada cartesiana $x$ do ponto $P_0$
$X_{P_1}$	Coordenada cartesiana $x$ do ponto $P_1$
$X_{P_2}$	Coordenada cartesiana $x$ do ponto $P_2$
$X_{P'_2}$	Coordenada cartesiana $x$ do ponto $P'_2$
$y$	Coordenada cartesiana na direção $y$
$Y_{CSR}$	Coordenada $y$ do centro da seção transversal do rotor
$Y_{P_0}$	Coordenada cartesiana $y$ do ponto $P_0$
$Y_{P_1}$	Coordenada cartesiana $y$ do ponto $P_1$
$Y_{P_2}$	Coordenada cartesiana $y$ do ponto $P_2$
$Y_{P'_2}$	Coordenada cartesiana $x$ do ponto $P'_2$
$z$	Coordenada cartesiana na direção $z$

### Alfabeto Grego

$\alpha, \beta$	Ângulos de intersecção
$\delta L$	Deformação ao longo de um comprimento
$\varepsilon$	Deformação de engenharia
$\gamma$	Posição angular da linha radial
$\gamma_{RT}$	Posição angular da linha de base do ponto $P_1$
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\rho$	Massa específica
$\sigma$	Tensão de engenharia
$\theta_0$	Posição angular do rotor no instante inicial
$\theta$	Ângulo de rotação do rotor
$\theta_s$	Posição angular do estator
$\omega$	Velocidade de rotação da bomba

### Índices

$i, j$	Posição
$k$	Iteração;
$o$	Valores iniciais;

---

## RESUMO

O sistema de bombeamento por cavidades progressivas está sendo cada vez mais empregado na indústria do petróleo, devido à sua capacidade de elevação de óleos altamente viscosos ou de fluidos com grandes concentrações de areia ou outras partículas sólidas. Uma Bomba de Cavidades Progressivas (BCP) é composta, basicamente, por um rotor - uma peça metálica de forma semelhante a um parafuso excêntrico, e um estator - um tubo de aço revestido internamente por uma hélice dupla, a qual pode ser rígida ou deformável/elastomérica. Em geral, uma BCP é submetida a uma combinação de pressão do poço com pressão gerada pelo próprio processo de bombeio. Em BCPs elastoméricas, essa combinação de esforços comprime o estator, gerando ou aumentando a folga existente entre o rotor e o estator, reduzindo, portanto, o efeito de vedação entre suas cavidades. Tal abertura da região de selagem produz o que é conhecido como escorregamento do fluido, diminuindo, com isso, a eficiência de sistema de bombeio por BCP.

Dessa maneira, este trabalho se propõe a desenvolver um modelo computacional tridimensional transiente do processo dinâmico da interação fluido-estrutural (FSI) que ocorre no interior de BCPs metálicas e elastoméricas. O objetivo principal é avaliar, a partir do uso do modelo desenvolvido, as características dinâmicas de eficiência de bombeio por BCPs, em função de informações locais e instantâneas detalhadas dos campos de velocidade, pressão e deformação no seu interior. Para o alcance de tais metas (desenvolvimento e uso do modelo), fez-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia própria para geração de malhas computacionais dinâmicas, móveis e deformáveis, representando as regiões fluida e estrutural de uma BCP. Tal procedimento caracterizou-se como o maior desafio para a elaboração do modelo computacional, devido à cinemática complexa e à geometria crítica desse tipo de bomba (ângulos de hélice diferentes entre rotor e estator e grandes diferenças de escala de comprimento). Os processos de geração dinâmica das malhas e de avaliação simultânea das deformações sofridas pelo elastômero são realizados através de sub-rotinas em linguagem Fortran 90, as quais interagem dinamicamente com o “*software*” de dinâmica dos fluidos computacional CFX/ANSYS. Desde que o modelo linear elástico é empregado para avaliar as deformações elastoméricas, não é necessário usar nenhum “*software*” para análise estrutural. Entretanto, uma proposta inicial para simulação dinâmica no ANSYS empregando-se modelos constitutivos hiper-elásticos para o elastômero é também apresentada no presente trabalho.

A validação dos resultados produzidos com a presente metodologia (geração de malha, simulação do escoamento em BCPs metálicas e simulação da interação fluido-estrutural em BCPs elastoméricas) é obtida através da comparação com resultados experimentais reportados pela literatura. Vislumbra-se que o desenvolvimento e aplicação de tal ferramenta computacional poderão fornecer maiores detalhes da dinâmica do escoamento no interior de BCPs metálicas e elastoméricas, de maneira que melhores sistemas de controle possam ser implementados na área de elevação artificial por BCPs.

**Palavras-Chaves:** Geração de Malha, Simulação Computacional 3D-t, Bombas de Cavidades Progressivas (BCP), Interação Fluido-Estrutura (FSI).

---

---

## ABSTRACT

The pumping through progressing cavities system has been more and more employed in the petroleum industry. This occurs because of its capacity of elevation of highly viscous oils or fluids with great concentration of sand or other solid particles. A Progressing Cavity Pump (PCP) consists, basically, of a rotor - a metallic device similar to an eccentric screw, and a stator - a steel tube internally covered by a double helix, which may be rigid or deformable/elastomeric. In general, it is submitted to a combination of well pressure with the pressure generated by the pumping process itself. In elastomeric PCPs, this combined effort compresses the stator and generates, or enlarges, the clearance existing between the rotor and the stator, thus reducing the closing effect between their cavities. Such opening of the sealing region produces what is known as fluid slip or slippage, reducing the efficiency of the PCP pumping system.

Therefore, this research aims to develop a transient three-dimensional computational model that, based on single-lobe PCP kinematics, is able to simulate the fluid-structure interaction that occurs in the interior of metallic and elastomeric PCPs. The main goal is to evaluate the dynamic characteristics of PCP's efficiency based on detailed and instantaneous information of velocity, pressure and deformation fields in their interior. To reach these goals (development and use of the model), it was also necessary the development of a methodology for generation of dynamic, mobile and deformable, computational meshes representing fluid and structural regions of a PCP. This additional intermediary step has been characterized as the biggest challenge for the elaboration and running of the computational model due to the complex kinematic and critical geometry of this type of pump (different helix angles between rotor and stator as well as large length scale aspect ratios). The processes of dynamic generation of meshes and of simultaneous evaluation of the deformations suffered by the elastomer are fulfilled through subroutines written in Fortran 90 language that dynamically interact with the CFX/ANSYS fluid dynamic software. Since a structural elastic linear model is employed to evaluate elastomer deformations, it is not necessary to use any CAE package for structural analysis. However, an initial proposal for dynamic simulation using hyper-elastic models through ANSYS software is also presented in this research.

Validation of the results produced with the present methodology (mesh generation, flow simulation in metallic PCPs and simulation of fluid-structure interaction in elastomeric PCPs) is obtained through comparison with experimental results reported by the literature. It is expected that the development and application of such a computational model may provide better details of the dynamics of the flow within metallic and elastomeric PCPs, so that better control systems may be implemented in the artificial elevation area by PCP.

**Keywords:** Mesh Generation, 3D-t Computational Simulation, Progressing Cavity Pumps (PCPs), Fluid-Structure Interaction (FSI).

---

---

# CAPÍTULO 1

---

---

## INTRODUÇÃO

---

---

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se um breve histórico do desenvolvimento do sistema de elevação artificial por BCP, desde a sua criação até os recentes avanços; o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho, tendo em vista a ampliação da utilização de Bombas de Cavidades Progressivas (BCP) em elevação artificial, junto com os objetivos a serem alcançados para melhoria desse dado método de elevação. Por último, uma apresentação sucinta da estrutura deste trabalho é efetuada.

### 1.1. Histórico

O sistema de bomba de cavidades progressivas foi desenvolvido em 1920, pelo engenheiro francês René Moineau. Este sistema é composto por um rotor e um estator, o rotor sendo uma peça metálica de forma semelhante a um parafuso, com o centro da hélice deslocado do centro da seção, e o estator sendo formado por um tubo de aço revestido internamente por uma hélice dupla, esta podendo ser de aço ou de elastômero. Na Figura 1 é mostrada uma foto desses componentes essenciais/primitivos de uma BCP.

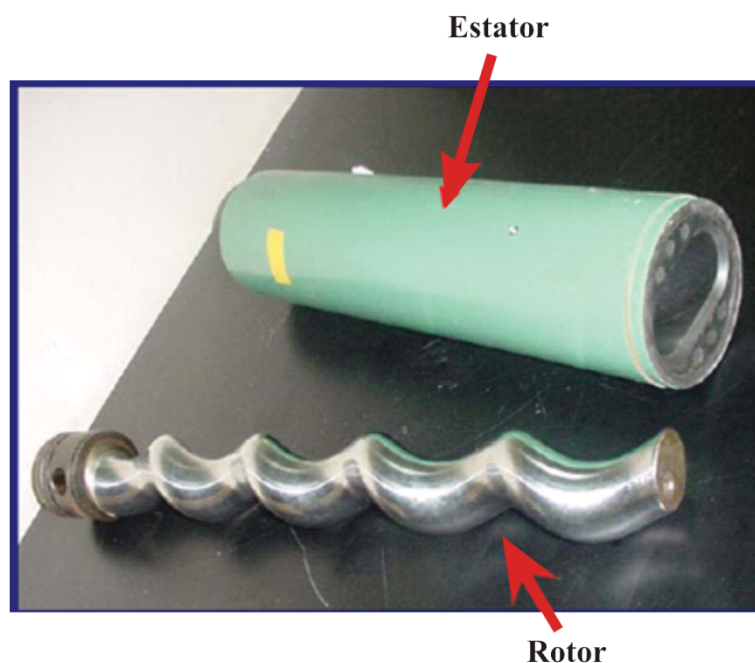


Figura 1: Rotor e estator de uma BCP (Assmann, 2005).

---

Depois de sua criação, o sistema só foi patenteado no ano de 1930, e em 1932 foi criada a “*Pompes Compresseurs Mécanique*” primeira empresa para fabricação deste tipo de bombas e outras fábricas como: a inglesa *Mono Pumps* e a americana *Robins & Myers* foram licenciadas. Mas somente no ano de 1933 a primeira bomba foi fabricada, sendo vendida apenas em 1935. Na busca de aumentar a sua aplicabilidade na década de 40, a borracha natural foi substituída pela sintética, denominada de elastômero devido ao seu alto grau de deformação elástica, com isso, possibilitando a sua aplicação em condições mais adversas de temperatura e pressão (Assmann, 2008), sendo assim utilizada como bomba para transferência em superfície. Na década de 50 deu-se início a sua aplicação em acionamento hidráulico de bombas para perfuração de poços (Carvalho, 1999).

Em 1951 a empresa alemã *Netsch* adquiriu a patente do francês René Moineau, com isso consegue o direito de comercialização e assim proporcionando, posteriormente, o aumento considerável nas suas aplicações, sendo empregada tanto na exploração de petróleo “*on shore*” como “*off shore*” e também nas refinarias para o transporte de fluidos pesados (Netsch, 2009). Apesar de ter sido testada pela primeira vez na década de 60, a sua utilização efetiva na elevação de petróleo só se deu no final da década de 70 com a evolução da tecnologia utilizada no desenvolvimento de novos materiais e na sua fabricação.

A sua utilização no Brasil foi iniciada no ano de 1982, no nordeste do país, mas precisamente no estado do Ceará no campo de Fazenda Belém, depois se expandindo para outras regiões, como: bacia potiguar, Sergipe, Alagoas, Bahia e Espírito Santo (Assmann, 2008). Com o sucesso obtido no uso deste sistema e dos avanços no desenvolvimento de novos equipamentos na década de 90, foram ampliados os seus limites de aplicação, atendendo assim uma maior faixa de vazão e pressão e com isso se tornando um método mais competitivo em relação aos outros sistemas de elevação artificial comumente utilizados (Carvalho, 1999).

Os últimos avanços se deram no ano de 1997, quando a fabricação de bombas com acionamento elétrico de fundo, possibilitou a utilização desse sistema em poços desviados ou direcionais, onde o acionamento da superfície através de haste seria inviável.

## **1.2. Motivação**

O bombeio por cavidades progressivas é um dos sistemas mais indicados na extração de óleos altamente viscosos. Atualmente, têm-se buscado ampliar a sua utilização na indústria do petróleo, tendo em vista que as Bombas de Cavidades Progressivas (BCP) têm



---

demonstrado uma eficiência mecânica mais elevada do que os sistemas de bombeamento rotodinâmicos, além de seu menor investimento inicial e consumo de energia. Além disso, a BCP possibilita o bombeio de fluidos com areia e com maiores quantidades de gás em relação ao sistema convencional de bombeio alternativo de hastes.

A eficiência da bomba está ligada diretamente à selagem de suas cavidades. Assim, para se obter um aumento desta característica em curto prazo e uma maior vida útil, é preciso ajustar corretamente a interferência entre rotor e estator, de acordo com a expansão do elastômero. Este tipo de comportamento presente nas BCPs elastoméricas possui características de um fenômeno onde se observa uma forte ligação entre a dinâmica dos fluidos e a mecânica dos sólidos, a qual é denominada de Interação Fluido-Estrutura ou, no inglês, “*Fluid-Structure Interaction (FSI)*”.

Por outro lado, a incompatibilidade do fluido com o elastômero é um problema sério, o qual ocorre quando se escolhe inadequadamente o tipo do elastômero, principalmente em áreas de utilização inicial de BCP onde não se tem experiência e conhecimento das características do fluido produzido pelo reservatório. Por exemplo, se o fluido contiver presença de gás, este permeia pelas cadeias poliméricas proporcionando um aumento do volume do elastômero, causando e/ou aumentando a interferência entre o estator e o rotor, acentuando assim, a possibilidade de desgaste do sistema. Tal desgaste pode levar à perda de capacidade de estanqueidade devido à abertura da linha de selo da bomba, região ao longo da bomba que apresenta a menor distância entre o rotor e o estator, onde ocorre a vedação das cavidades.

Tendo em vista esta estreita ligação entre a fluidodinâmica das BCPs e a deformação do elastômero presente no estator, existe uma importante motivação de desenvolver um modelo computacional que seja capaz de prever o comportamento da folga/interferência ao longo do tempo.

### **1.3. Objetivos**

De acordo como exposto nas seções precedentes, os objetivos deste trabalho serão:

- Desenvolver um gerador de malhas computacionais para simulações, fluidodinâmica, estruturais e fluido-estruturais em BCPs de estator rígido ou estator elastomérico (deformável).

---

- Implementar um modelo computacional de Interação Fluido-Estrutura para o escoamento em BCP, que estão fortemente ligados no processo de abertura da linha de selo (aumento da folga);

- Obter soluções dinâmicas em diversas condições de operação: RPM, diferencial de pressão, viscosidade e pressão de entrada (região de sucção da bomba);

- Analisar resultados visando o melhor entendimento de BCP;

Tal entendimento se reveste de um caráter fundamental na otimização deste tipo de bombeio de elevação artificial, visando a garantia de uma maior eficiência do sistema de extração, levando, à redução do consumo de energia, um acréscimo no volume de produção, redução de custos devido à substituição de equipamentos e extensão da vida de operação de equipamentos usados para a extração subterrânea.

#### **1.4. Organização do Trabalho**

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, tendo como principal foco a implementação de um modelo computacional de interação fluido-estrutura, através da criação de uma metodologia de geração de malhas computacionais que permite a simulação desse fenômeno no interior da bomba de estator elastomérico.

O capítulo dois apresentará uma breve descrição de alguns dos principais sistemas de elevação de petróleo, enfatizando o sistema de elevação por BCP. No capítulo três são apresentadas as simulações utilizando malhas computacionais desenvolvidas através de pacotes comerciais, destacando as principais dificuldades e limitações presentes na utilização de cada “*software*”. No capítulo quatro apresentam-se as simulações, utilizando malhas computacionais desenvolvidas através de uma metodologia própria, a qual permite maior controle da posição de cada nó da malha, possibilitando a validação dos resultados de vazão versus diferencial de pressão do modelo 3D-t da BCP de estator rígido. No próximo capítulo, o cinco, é desenvolvido o modelo de interação fluido-estrutura, bem como as equações empregadas em cada nó simulando a deformação elastomérica do estator, em seguida obtendo as curvas de vazão versus diferencial de pressão para este modelo FSI 3D-t da BCP de estator deformável. Finalmente, o capítulo seis apresenta as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros dentro da presente área de atuação.

---

---

# **CAPÍTULO 2**

---

---

## **SISTEMA DE ELEVAÇÃO**

---

---

---

---

## SISTEMA DE ELEVAÇÃO

O propósito deste capítulo é apresentar brevemente os sistemas de elevação mais comuns na indústria de petróleo, evidenciando o sistema de elevação por bomba de cavidade progressiva, que será o foco deste trabalho.

### 2.1. Elevação Natural

Nesse método de elevação, o transporte dos fluidos até a superfície se deve exclusivamente pela pressão de fundo ser relativamente alta, o suficiente para vencer a pressão hidrostática e as perdas de carga, existentes do poço até a linha de produção. Assim, o óleo presente no fundo do poço seja elevado naturalmente para a superfície. Esse método, que é denominado de surgência, é o mais simples e também o que apresenta o menor custo.

### 2.2. Elevação Artificial

O método de elevação artificial somente é necessário quando a pressão do reservatório é insuficiente para vencer as perdas de carga e a pressão hidrostática, existentes do poço até a linha de produção. Isso acontece quando o reservatório, no início da sua operação, não possuía uma pressão que consiga desenvolver a ação de transporte do fluido, elevando naturalmente o óleo para superfície, ou tenha sido utilizado o método de surgência anterior e ainda seja economicamente viável manter o poço em operação.

Para um reservatório de óleo pesado é muito provável a necessidade de utilização de um sistema de elevação artificial, pois há uma elevada perda de carga ocasionada pelo atrito devido à alta viscosidade do óleo e pelas altas pressões devido à coluna hidrostática (Blanco, 1999). A seguir serão mostrados alguns métodos mais utilizados de elevação artificial e uma breve explanação sobre cada um deles.

#### 2.2.1. “Gás lift” (GL)

Existem dois tipos de elevação por “Gás Lift”: o “Gás Lift” intermitente e “Gás Lift” contínuo. Tal classificação é feita de acordo com a frequência no qual é injetado o gás comprimido para transmissão de energia para o fundo do poço. No contínuo, o gás é injetado sob pressão pelo anular do poço de forma contínua, com a função de diminuir a pressão hidrostática do interior da coluna de produção, de maneira que a pressão do reservatório

torne-se suficiente para vencer a perda de carga e, assim, o poço passa a se comportar como um poço surgente (Blanco, 1999; Assmann, 2008).

No “*Gás Lift*” intermitente, o gás é injetado por um período de tempo bem definido e normalmente controlado da superfície por um intermitor de ciclo que controla a frequência de injeção e uma válvula controladora, conhecida também por “*motor valve*” (Thomas, 2001). O gás injetado empurra para cima em forma de golfadas o líquido que se acumulou na coluna e quando a injeção é interrompida, permite-se que o líquido se acumule na coluna novamente.

### 2.2.2. Bombeio mecânico por hastes (BMH)

O bombeio mecânico por haste é um dos métodos mais utilizado em todo o mundo e o seu equipamento, o “cavalo mecânico” (equipamento que converte a energia rotacional do motor em movimento alternativo das hastes), é também uma marca registrada comum de identificação para um poço de petróleo.

Ele consiste em uma bomba alternativa, acionada da superfície por um motor elétrico ou de combustão interna, cuja energia rotacional é transformada em movimento alternativo por um equipamento instalado na cabeça do poço. Esse movimento alternativo é transferido à cabeça do poço pela coluna de hastes a qual aciona uma bomba de deslocamento positivo composta por uma válvula de pé e de uma válvula de passeio, como é mostrado na Figura 2. Estas válvulas trabalham de uma forma em que as suas aberturas e fechamentos acontecem em momentos distintos, produzindo uma ação de bombeio.

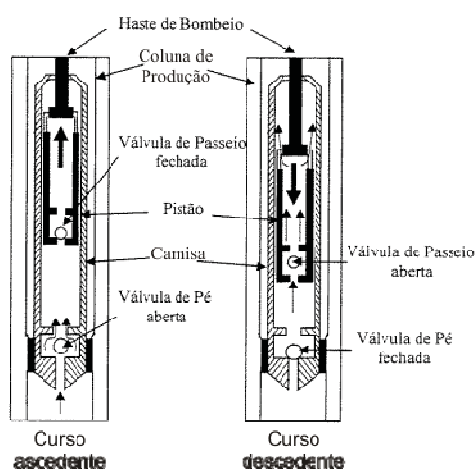


Figura 2: Bomba alternativa para bombeio mecânico por hastes (Blanco, 1999)

---

### **2.2.3. Bombeio centrífugo submerso (BCS)**

Esse método consiste basicamente na transformação da energia elétrica em energia mecânica, essa transformação se dá através de um motor elétrico conectado a uma bomba centrífuga, que irá transmitir para o fluido essa energia na forma de pressão, fazendo com que o fluido seja bombeado para a superfície. A energia elétrica utilizada para acionamento do motor é transferida para o fundo do poço através de cabos elétricos (Thomas, 2001).

A utilização deste tipo de bombeio está diretamente atrelada à resistência a abrasão da bomba, causada pela areia e também as altas temperaturas atuantes no fundo do poço devido ao gradiente geotérmico, contribuindo para a redução da viscosidade do óleo a ser produzido. Ele não é recomendado para poços com fluido de alta viscosidade ou que apresente alta quantidade de areia, pois a areia em excesso provoca abrasão na bomba e o sistema perde eficiência, mas é muito eficaz em poços desviados por não depender de coluna de hastes (Assmann, 2008).

### **2.2.4. Bombeio por cavidades progressivas (BCP)**

Por ser este o foco do trabalho, o sistema de elevação por BCP será descrito em maiores detalhes

## **2.3. Sistema de elevação por BCP**

O sistema de elevação por BCP é composto basicamente de quatro partes: a cabeça de acionamento ou cabeçote, onde reduzem uma rotação de aproximadamente 3000 rpm, proveniente de um motor elétrico ou de combustão interna, para uma faixa de rotação entre 300 a 600 rpm, transmitindo torque à coluna de hastes; a coluna de hastes, esta transfere o movimento rotacional à bomba de subsuperfície denominada de Bomba de Cavidades Progressivas (BCP); e a própria BCP. A rotação do motor que é transferida para a bomba, aciona o rotor, o qual, ao se movimentar, gera regiões com diferenciais de pressões distintos no interior da BCP, desenvolvendo assim o bombeio de fluidos.

### **2.3.1. Componentes geométricos**

A Bomba de Cavidades Progressivas é constituída basicamente por duas partes: um estator, formado por um tubo de aço revestido internamente por uma hélice dupla, podendo esta ser de aço ou de elastômero, e um rotor, uma peça metálica que possui uma forma

semelhante a um parafuso. O centro da hélice é deslocado do centro da seção do rotor. Essa defasagem é comumente conhecida como excentricidade. O rotor possui um passo que é a metade do passo do estator, de maneira que ao ser inserido no interior do estator formam-se cavidades isoladas entre essas duas partes. Na Figura 3 é mostrada a relação de passos entre o rotor e o estator. Quando o rotor é movimentado, o fluido é deslocado axialmente, essas cavidades ganham movimentos, promovendo a ação de bombeio do fluido.

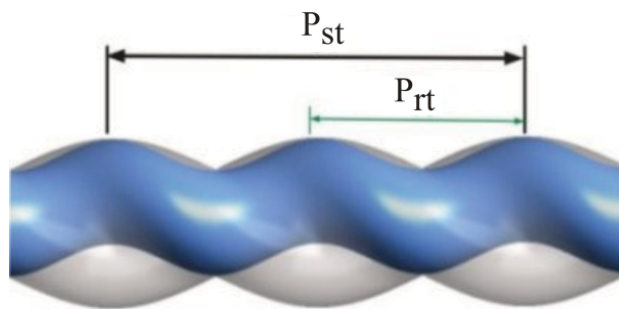


Figura 3: Relação de passos de uma Bomba de Cavidades Progressivas

Na Figura 4 são apresentados os parâmetros geométricos característicos de uma BCP, de um único lóbulos, a partir de sua seção transversal. Os pontos  $P_E$ ,  $P_{HR}$  e  $P_{SR}$  representam os centros do estator, da hélice do rotor e da seção transversal do rotor, respectivamente. De especial atenção reveste-se o círculo com linha traço e ponto, o qual representa o deslocamento do centro da hélice do rotor (ponto  $P_{HR}$ ).

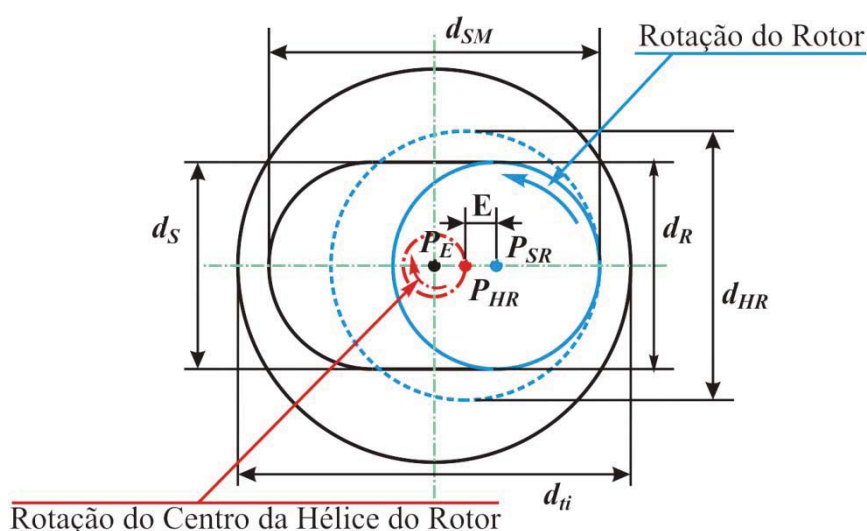


Figura 4: Dimensões características da seção transversal de uma BCP de um lóbulos

---

Os principais parâmetros geométricos que caracterizam uma Bomba de Cavidades Progressivas (BCP) são:

$E$	-	Excentricidade
$d_R$	-	Menor Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Seção do Rotor)
$d_{HR} = d_R + 2E$	-	Maior Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Hélice do Rotor)
$d_S$	-	Menor Diâmetro do Estator
$d_{SM} = 4E + d_S$	-	Maior Diâmetro do Estator
$d_{ii}$	-	Diâmetro do Tubo do Estator (estator com elastômero de espessura variável)

Obviamente, em BCPs que não apresentam interferência ou folga entre o rotor e o estator, tem-se:  $d_S = d_R$

### 2.3.2. Vantagens / Desvantagens

As principais vantagens do sistema de elevação por BCP, em relação a outros sistemas são:

- Elevada eficiência mecânica: entre 50 a 70%;
- Maior aplicação em tipos de fluidos: altamente viscosos, com grande concentração de areia e com alta concentração de gás livre;
- Menor investimento: custo de operação e manutenção;
- Instalação e operação simples;
- Boa resistência a abrasão; e
- Equipamentos de subsuperfície de dimensões reduzidas.

Enquanto que apresenta as seguintes desvantagens são:

- Diferencial de pressão limitada;
- Vazão limitada;
- Desgaste e fadiga em poços desviados; e
- Sensível a composição química do petróleo



---

---

# **CAPÍTULO 3**

---

---

## **GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE PACOTES COMERCIAIS**

---

---

---

## GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE PACOTES COMERCIAIS

Neste capítulo serão apresentadas as simulações computacionais utilizando malhas computacionais desenvolvidas através de pacotes comerciais, destacando as principais dificuldades presentes na sua utilização, como também os resultados obtidos.

### 3.1. Construção do modelo sólido

Nesta etapa, é construído um modelo sólido 3D, o qual representa a geometria da BCP, mostrando as diferentes posições do rotor ao longo de um passo do estator, como também a dinâmica do seu movimento, descrita em forma de equações parametrizadas que serão inseridas no software de geração de geometrias, relacionadas no próximo subitem, e utilizadas na geração de malhas via Fortran que será descrita no próximo capítulo.

Outra importância fundamental do processo de geração de sua geometria seria guiar a geração de malha, pois a mesma será construída a partir da topologia do modelo sólido, isto é, de pontos, curvas e superfícies que indicarão os limites da malha gerada. Como se trata de uma geometria complexa, se faz necessário um estudo mais apurado desta etapa.

A geração das geometrias foi realizada através de “softwares” de CAD (“*Computer Aided Design*”), “*Solid Edge*” e “*DesignModeler*”. Após a análise realizada nos dois geradores de geometrias, decidiu-se utilizar o “*DesignModeler*”, por possuir uma comunicação direta com os geradores de malha e por fazer parte do mesmo pacote comercial “*Ansys*®” que será utilizado nas simulações computacionais, com isso permitindo um maior controle da topologia.

### 3.2. Cinemática da BCP

Para o entendimento do movimento da bomba, foram traçados e identificados os parâmetros que influenciam na cinemática da bomba, como mostrado na Figura 5. Esta parametrização considera um segmento de reta  $\overline{P_A P_B}$ , traçado imaginariamente, que liga os centros das duas hélices do estator ( $P_A$  e  $P_B$ ). É observado que o centro da seção do rotor ( $P_{SR}$ ) se desloca exclusivamente sobre a direção deste segmento, de maneira periódica, enquanto o centro da hélice do rotor ( $P_{HR}$ ) se desloca realizando a trajetória de um círculo com comprimento de raio igual a sua excentricidade. A rotação da hélice do rotor se dá no sentido

contrário ao movimento do centro da seção do rotor, como é indicado através das setas da rotação da hélice do rotor e a da rotação do centro de sua seção, representadas na Figura 5.

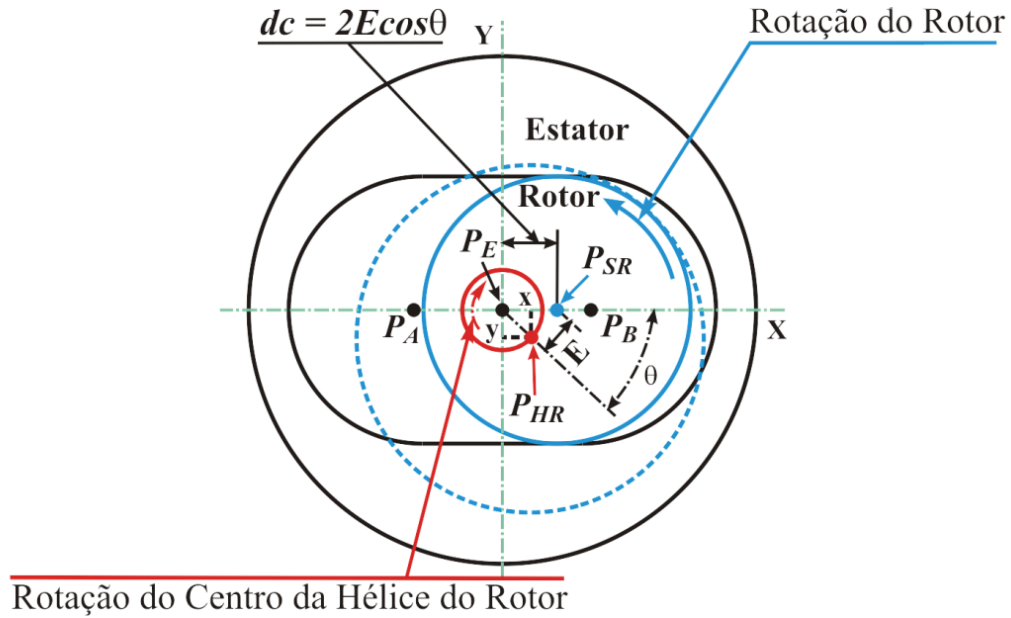


Figura 5: Parâmetros de rotação da bomba

A posição do centro da hélice do rotor, ou seja, as coordenadas  $x$  e  $y$  do ponto  $P_{HR}$ , são descritas em termos de uma variação de um ângulo  $\theta$ , o qual está associado ao movimento de rotação do rotor. Da Figura 5, tais coordenadas são dadas por:

$$x = E \cos \theta \quad (3.1)$$

$$y = -E \sin \theta \quad (3.2)$$

Esta é a forma parametrizada da equação do círculo com centro na origem,  $P_{HR}$ , e representa a trajetória do centro da hélice do rotor, como função do ângulo de rotação,  $\theta$ . A distância entre o centro da seção do rotor e o centro do estator  $\overline{P_E P_{SR}}$  é, de uma maneira geral, dada por:

$$dc = \overline{P_E P_{SR}} = 2E \cos \theta \quad (3.3)$$

As expressões dadas pelas Equações (3.1) – (3.3) serão utilizadas como condições de contorno e condições iniciais (sistemas de coordenadas que se movem segundo tais expressões) para o “*software*” de CFD. As Figuras 6 a 10 ilustram a posição do rotor, em relação ao estator, durante uma volta completa do rotor, para diferentes posições angulares do rotor discretizadas de 45 em 45 graus.

Destas figuras pode-se também observar a posição relativa da hélice do rotor em função de uma posição angular.

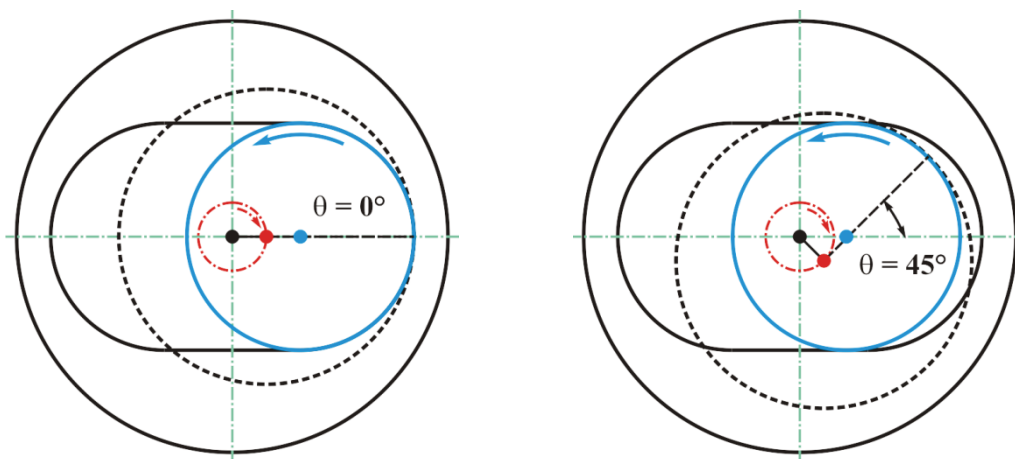


Figura 6: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 45^\circ$

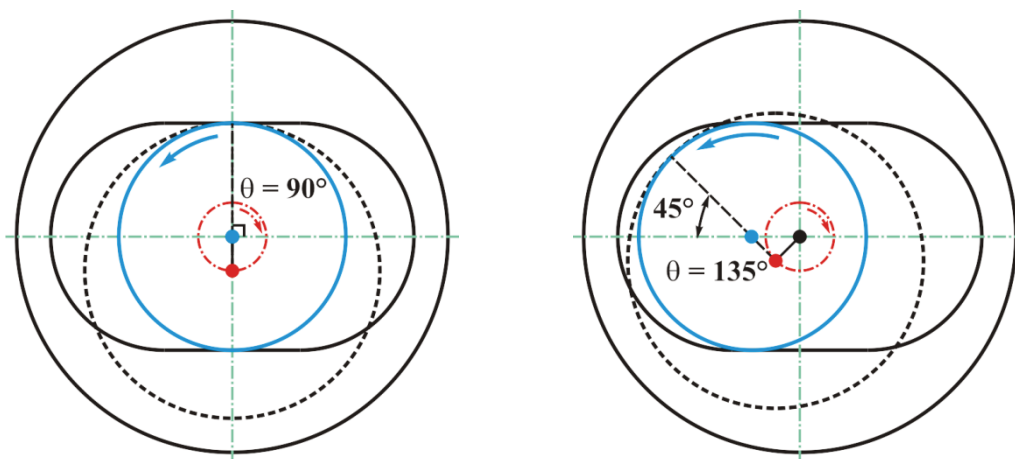


Figura 7: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 135^\circ$

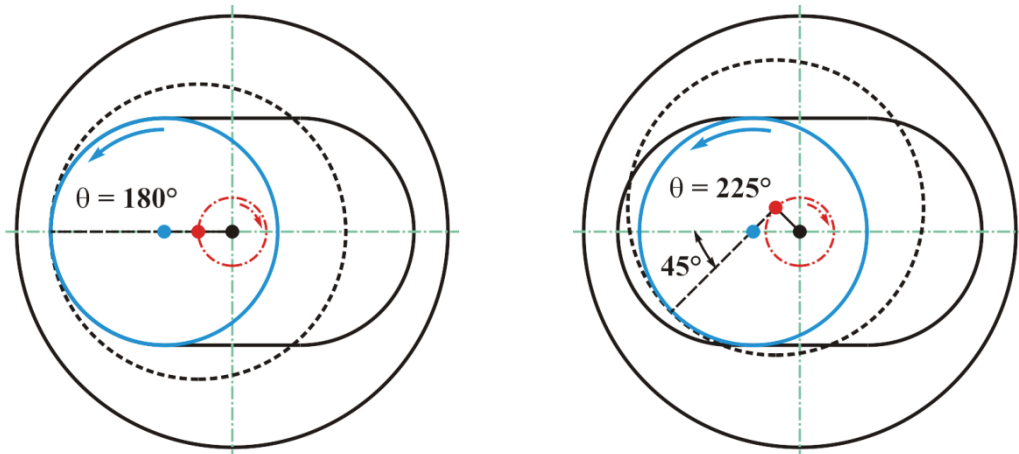


Figura 8: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que  $\theta = 180^\circ$   $\theta = 225^\circ$

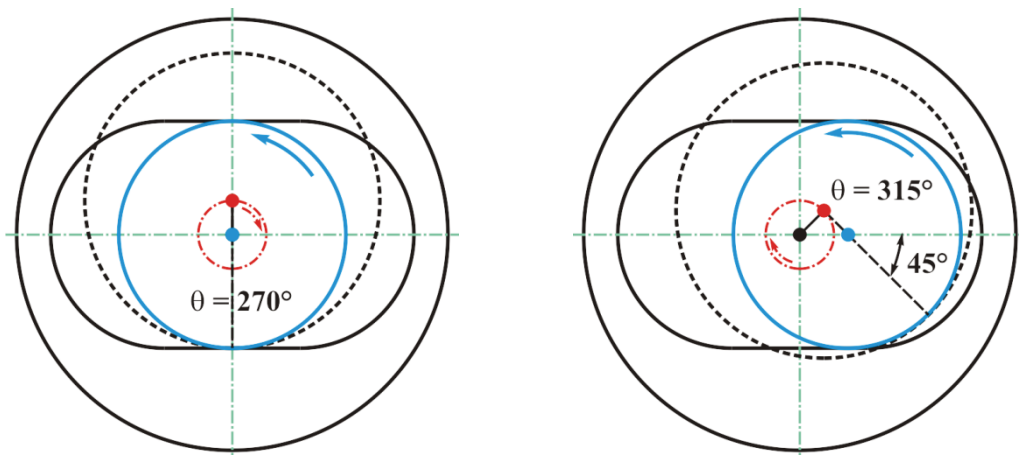


Figura 9: Posição do rotor, em relação ao estator, nos instantes em que  $\theta = 270^\circ$   $\theta = 315^\circ$

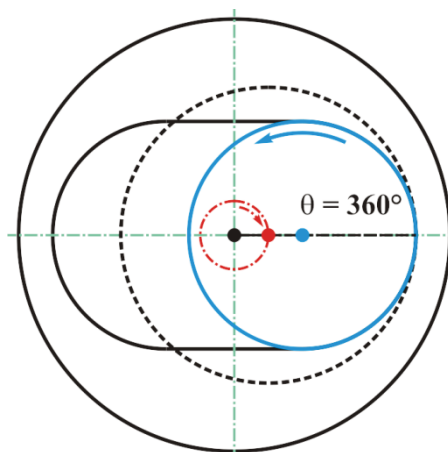


Figura 10: Posição do rotor, em relação ao estator, no instante em que  $\theta = 360^\circ$

---

Através do correto entendimento da cinemática da BCP, juntamente com os parâmetros geométricos da bomba, foi possível direcionar melhor o estudo da geração da malha, economizando-se tempo para geração de novas geometrias com posições diferentes do rotor e também o desenvolvimento de um programa computacional próprio para geração das malhas, a partir destes parâmetros geométricos, que será mostrado no capítulo 4.

### 3.3. Geração da malha

É considerada uma das principais etapas da simulação computacional, pois representará o domínio contínuo de maneira discreta, através de pontos interligados, onde serão resolvidas as equações governantes do fenômeno de acordo com a metodologia numérica escolhida.

Após a geração da geometria, os princípios para a geração da malha foram desenvolvidos a partir do estudo da forma de importação dessa geometria para o “*software*” gerador de malha. Inicialmente, para este trabalho, foi utilizado o CFX-Mesh (Ansys), um gerador de malhas que comporta apenas malhas não estruturadas.

Em uma segunda etapa foi utilizado o gerador de malha ICEM, que também é comercializado pela “*Ansys* ®”. Este “*software*” comercial possibilita geração de malhas hexaédricas estruturadas, possibilitando um maior controle sobre as malhas a serem geradas.

Adicionalmente, as malhas computacionais das regiões, sólida e fluida devem ser construídas em forma separada devido às diferentes características das equações governantes dos fenômenos que se desejam estudar em cada domínio. Desta forma, as características das malhas computacionais, quanto ao tipo de elementos e refino, foram definidas de forma independentes.

#### 3.3.1. Problemática

A complexidade geométrica inerente às bombas de cavidades progressivas (BCPs) proporciona dificuldades de representação do domínio do escoamento e da descrição cinemática do movimento da malha, dificuldades essas também relatadas por Gamboa *et al.* (2003), que atribuiu o insucesso da simulação realizada por ele à dificuldade na geração da malha computacional dinâmica. Além disso, produzem uma forte distorção dos elementos da malha computacional causada por uma fronteira que possui movimentos de translação e de rotação. Esta distorção dos elementos, angular e linearmente, e o aumento da razão de aspecto

dos elementos (relação entre os comprimentos das arestas do elemento) (ANSYS, 2010) produz mal-condicionamento da matriz (matrizes com número de diagonais indefinido) de coeficientes do sistema linear resultante da discretização das equações governantes do fenômeno.

Para obter uma malha computacional que possibilite a representação da física do problema, as diversas metodologias de criação, foram testadas através de dois “*softwares*” comerciais que usam metodologias diferentes para geração de malhas.

### 3.3.2. Malhas não-estruturadas

As malhas não estruturadas podem ser compostas por elementos 3D (prismáticos, tetraédricos, hexaédricos e piramidais), e são caracterizadas por não apresentarem uma sequência na numeração dos volumes e o número variável de volumes adjacentes, dando origem a matrizes não-diagonais (Maliska, 2004; Batista, 2005), na Figura 11 é mostrada uma representação de um exemplo de malha não-estruturada.

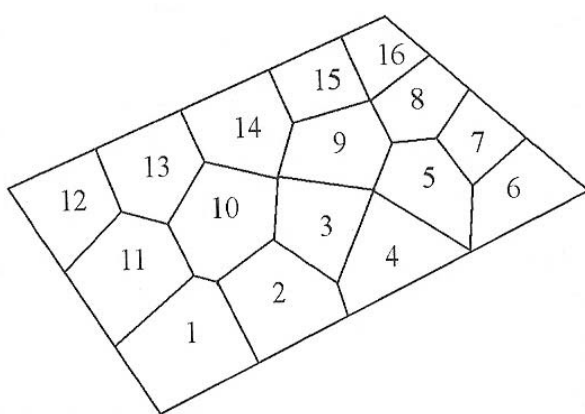


Figura 11: Malha Não-Estruturada (Maliska, 2004)

O CFX-MESH é um software comercial da ANSYS que produz malhas computacionais não estruturadas com um formato que é lido diretamente no CFX-Pre (extensão gtm). As malhas podem ser geradas a partir de elementos prismáticos, tetraédricos, hexaédricos e piramidais ou mistos contendo elementos de diversos tipos.

Ao gerar a malha computacional da BCP através do CFX-MESH, foi observado no decorrer do movimento cinemático da bomba, ou quando a folga era extremamente pequena, que a presença de elementos tetraédricos proporciona grandes distorções nos elementos,

gerando volumes negativos que impossibilitam a simulação do problema físico. Estas distorções podem ter ocorrido devido à limitação do usuário de não intervir neste software de geração. Na Figura apresentam-se os detalhes da malha deformada, para o instante que o rotor está mais próximo do estator.

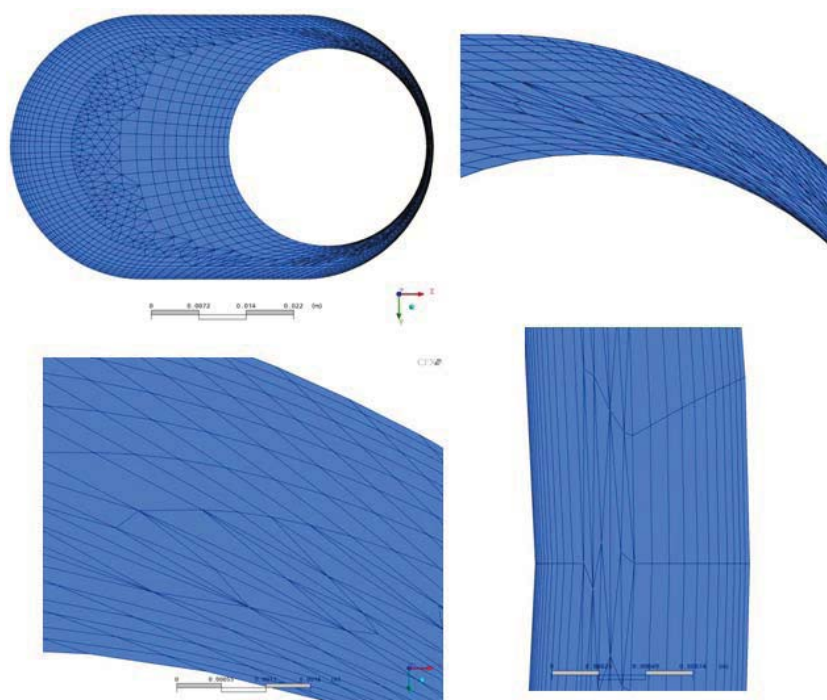


Figura 12: Malha gerada no CFX-Mesh

Observa-se que, nas regiões onde a malha é tetraédrica, as deformações angulares causadas pelo movimento da bomba são maiores, impossibilitando a simulação computacional através das malhas geradas por este “*software*”.

### 3.3.3. Malhas estruturadas

As malhas geradas nesta metodologia são formadas totalmente por elementos hexaédricos estruturados que são caracterizados por apresentarem número constante de elementos adjacentes e uma sequência na numeração dos volumes (Maliska, 2004; Batista, 2005), como é mostrado na Figura 13. Além disso, as malhas estruturadas permitem melhor controle da quantidade e espaçamento dos nós por parte do usuário, o que permitirá o refino da malha nas regiões onde se prevêem maiores deformações, controlando desta forma a qualidade da malha deformada. Estas permitem também um melhor controle sobre a distorção de malhas móveis ao longo do seu movimento (Maliska 2004; Ferziger & Peric 2001).



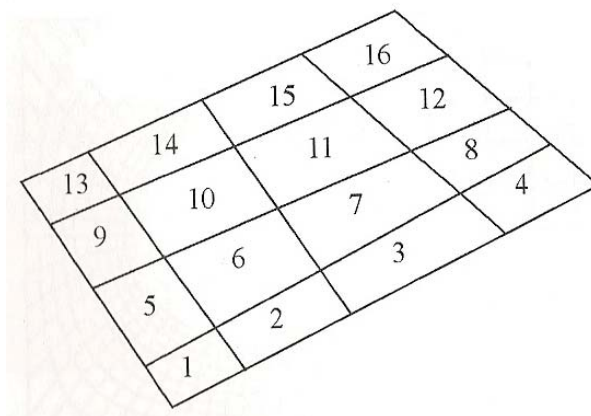


Figura 13: Malha Estruturada (Maliska, 2004)

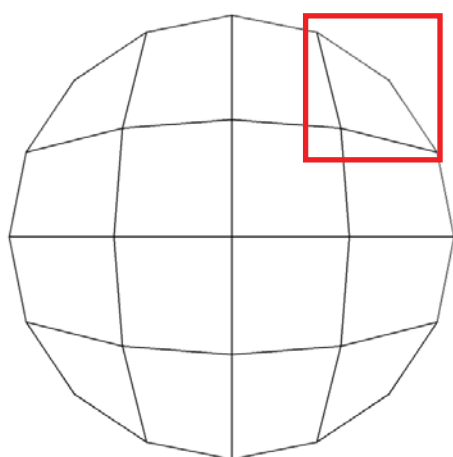
Na geração de malhas estruturadas, foi utilizado o módulo Hexa do ICEM que consiste em um gerador de malhas estruturadas. Neste pacote a geração da malha se dá através de associações da geometria com um ou mais blocos criados para conter a malha.

A criação do bloco terá que representar a geometria do problema, de maneira que são associados vértices e arestas do bloco com pontos e curvas existentes na geometria. Se a geometria não contiver pontos e/ou curvas que possibilitem essa associação, deve-se alterar a sua topologia, de modo a se criar tais entes geométricos, para que o bloco seja associado de forma a representar o meio contínuo a ser simulado (na próxima seção será mostrado o estudo das topologias geométricas utilizadas). Depois dessa associação as próximas etapas mais importantes seriam a discretização das arestas com a quantidade desejada de nós, seguindo a região de interesse de maior refino de malha e, por fim, a exportação da malha para um formato lido no CFX (.CFX5).

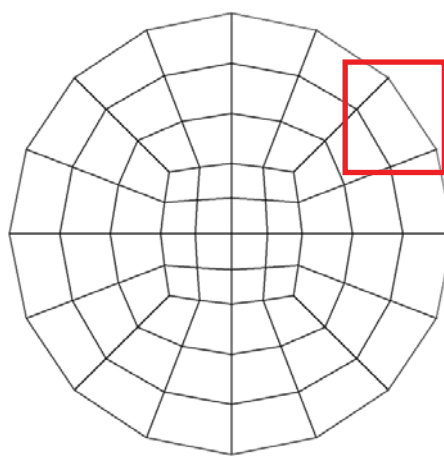
Através do ICEM, foram utilizadas duas metodologias de geração de malhas hexaédricas estruturadas, a primeira, através de associações de blocos comuns e, a segunda, através de associações de blocos com o-grid (blocos onde as linhas da malha são distribuídas radialmente). A diferença entre estas metodologias de geração de malha é que antes das associações os blocos criados são transformados em blocos o-grid, para que só a partir desse passo sejam associados às arestas e os vértices dos blocos. Os blocos o-grid possibilitam a geração de uma malha com elementos que se adaptam melhor a geometrias cilíndricas ou de formas semelhantes, como acontece com a BCP.

Na Figura 14 são mostradas duas malhas geradas com as diferentes topologias, que auxiliam na compreensão da disposição dos elementos. Na Figura 14 (a) foi utilizado a metodologia com blocos comuns e na Figura (b) o bloco é o mesmo utilizado na metodologia

anterior com a presença do “o-grid”. Evidente que o bloco central do “o-grid” é removido, pois o rotor é ocupado pelo rotor da bomba. Nota-se que a malha da metodologia sem o “o-grid” apresenta elementos muito distorcidos, isto é, elementos com ângulos distantes de  $90^\circ$  graus, enquanto na com “o-grid” os ângulos são mais próximos de  $90^\circ$  graus, como são mostrados nas Figuras 14 e 15. Portanto, a malha gerada sem o “o-grid” não se mostrou adequada no decorrer do movimento cinemático da bomba ou quando a folga era extremamente pequena, como também percebido nas malhas não-estruturadas.

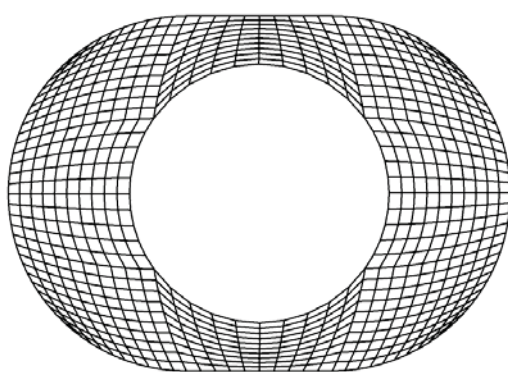


(a) Utilizando bloco comum

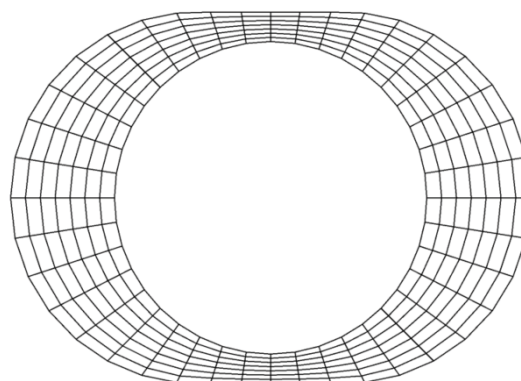


(b) Utilizando bloco tipo “O-Grid”

Figura 14: Exemplo de malhas geradas utilizando o ICEM



(a) Utilizando bloco comum



(b) Utilizando bloco O-Grid

Figura 15: Malha da BCP gerada no ICEM

### 3.4. Topologias geométricas

Conforme comentado anteriormente, para que os blocos possam ser associados à geometria original, a topologia geométrica necessita conter pontos e/ou curvas que possibilitem a associação dos vértices e/ou arestas do bloco onde será gerada a malha. Portanto, em cada topologia citada a baixo, existem diferentes possibilidades de geração/distribuição destes parâmetros geométricos (pontos e curvas). Com a modificação da topologia também se tem uma modificação no posicionamento dos blocos associados, interferindo-se diretamente na geração da malha.

#### 3.4.1. Topologia de duas retas

A malha computacional constituída/gerada segundo essa topologia se baseia na criação de blocos a partir da interseção das diagonais,  $\overline{AB}$  e  $\overline{CD}$ , de um retângulo circunscrito ao estator com as linhas de base do rotor e do estator. De acordo com a Figura 16 (a), os arcos laterais  $\widehat{IF}$ ,  $\widehat{KL}$  e  $\widehat{MN}$ ,  $\widehat{OP}$  obtidos pela interseção dessas retas com as partes circulares do rotor e do estator, são divididos em partes igualmente espaçados, para a formação de mais blocos. Os arcos superiores e inferiores, do rotor,  $\widehat{JN}$  e  $\widehat{IM}$  são também divididos em pontos igualmente espaçados, em números iguais ou diferentes dos arcos laterais, respeitando-se, todavia, os pontos já presentes no estator, devido às suas partes retas,  $\widehat{EF}$  e  $\widehat{GH}$ . Assim, para a geração de, por exemplo, 3 blocos no arco  $\widehat{JN}$  (e  $\widehat{IM}$ ) deve-se inserir apenas mais 2 pontos, uma vez que para o estator, os pontos E e F (G e M) já estão presentes.

Os blocos (e por sua vez, a malha) assim criados, irão se deformar conforme ilustra a Figura 16 (b) para uma outra posição do rotor no interior do estator.

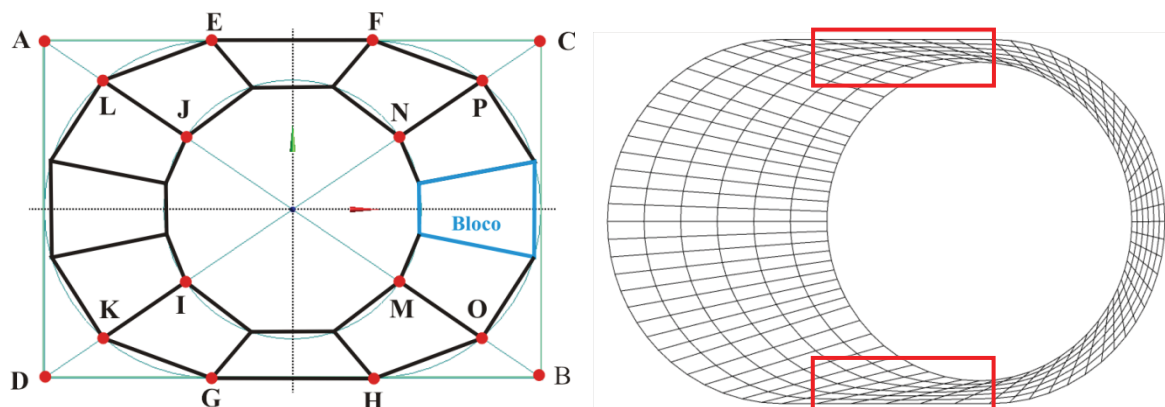


Figura 16: Topologia de duas Retas: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional

Nota-se que uma região de forte distorção dos elementos é criada com o movimento do rotor. Verifica-se posteriormente que essa topologia só funciona bem para BCPs com grandes folgas, em torno de 5 mm.

### 3.4.2. Topologia de quatro retas

Esta topologia é semelhante à anterior. No entanto, as divisões do rotor são também guiadas pela criação de blocos a partir da interseção das diagonais  $\overline{EH}$  e  $\overline{FG}$ , relativos aos pontos já presentes no estator, devido as suas partes retas  $\overline{EF}$  e  $\overline{GH}$ . De acordo com a Figura 17 (a), os arcos laterais  $\widehat{IJ}$ ,  $\widehat{KL}$  e  $\widehat{MN}$ ,  $\widehat{OP}$  obtidos pela interseção das diagonais,  $\overline{AB}$  e  $\overline{CD}$  do retângulo circunscrito do estator, com as partes circulares do rotor e do estator, são divididas em pontos igualmente espaçados. Superior e inferior,  $\widehat{QR}$  e  $\widehat{ST}$  são também divididos em pontos igualmente espaçados, em número igual ou diferente dos arcos laterais. Note que agora novos blocos, e ELJQ, FPRN, DGIS e HOMT, são naturalmente criados entre as quatro diagonais  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CD}$  e  $\overline{EF}$ ,  $\overline{GH}$ . Dependendo da geometria, estes blocos poderão ser divididos para melhorar uniformidade da malha final. Observa-se também que, sob determinadas condições de divisão das partes, esta topologia pode coincidir com a anterior.

A Figura 17 (b) ilustra como os blocos/malha irão se deformar/deslocar para uma nova posição do rotor no interior do estator. Pode-se perceber destas figuras que, dependendo da geometria (relação  $P_s$ ,  $E$ ,  $d_s$  e  $d_r$ ) esta topologia pode apresentar menos distorção dos elementos. Por outro lado, com a topologia anterior ela só pode ser aplicada para BCP's com folga grande.

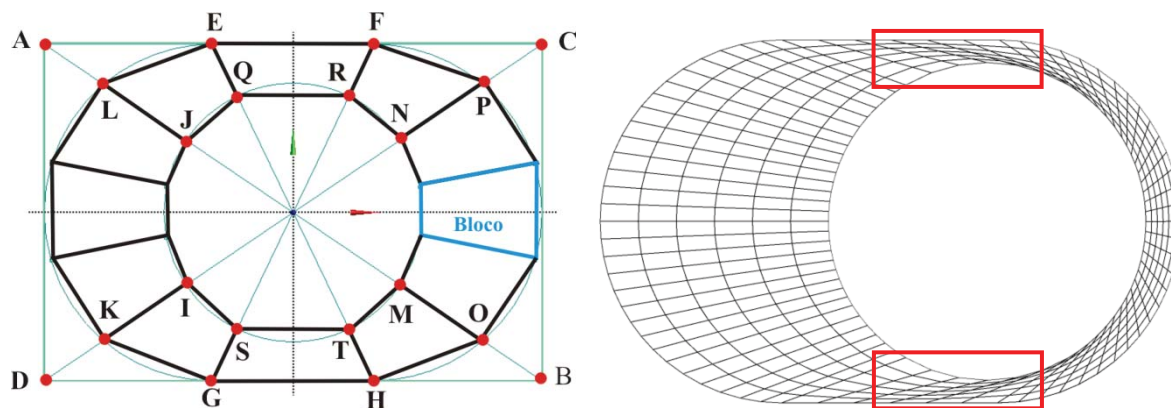


Figura 17: Topologia de quatro Retas: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional

### 3.4.3. Topologia de retângulo e quadrado

A topologia mostrada na Figura 18 (a) ainda segue a linha de raciocínio das topologias anteriores. No entanto, agora, as diagonais,  $\overline{AB}$  e  $\overline{CD}$ , do retângulo circunscrito ao estator servem de base para a geração dos vértices do bloco, sobre o estator, enquanto as diagonais,  $\overline{UV}$  e  $\overline{WX}$ , do quadrado circunscrito ao rotor servem de base para a geração dos vértices restantes do bloco, sobre o rotor. Assim, os blocos são formados, de tal maneira que os pontos formados pela interseção das diagonais com as partes curvas (rotor e estator) são conectados, criando-se assim as linhas de base dos blocos ( $\overline{LJ}$ ,  $\overline{KI}$ ,  $\overline{PN}$  e  $\overline{OM}$ ). As partes circulares superiores ( $\widehat{JN}$ ) e inferior ( $\widehat{IM}$ ) do rotor são divididos em três partes iguais para a criação de 2 pontos em cada curva, os quais serão unidos aos pontos E, F, G e H para fechamento dos blocos originais. Após a criação dos blocos de base, novos blocos poderão ser criados pela sub-divisão destes blocos.

A Figura 18 (b) ilustra como a malha criada com essa topologia irá se deformar, após um deslocamento máximo do rotor. Pode-se perceber um ganho de qualidade dos elementos, pela menor distorção sobre os mesmos. Apesar da melhora, as mínimas folgas permitidas entre o rotor e estator ainda eram elevadas para a finalidade desejada da simulação de BCP sem folga.

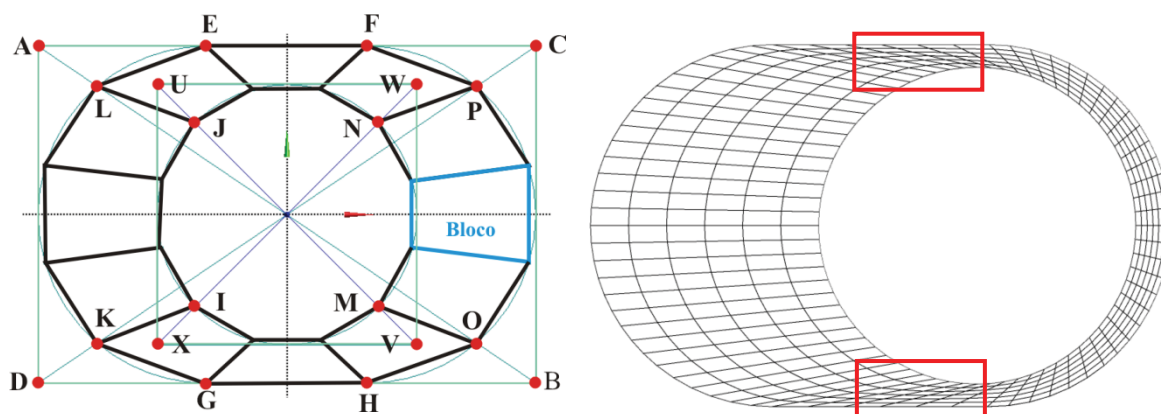


Figura 18: Topologia de retângulo e quadrado: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional

Observando as topologias propostas até o momento, foi percebido que as regiões próximas ao segmento retilíneo do perímetro interno da cavidade do estator é a mais problemática na geração de malha, de maneira que um menor espaçamento entre os pontos nessa região se fazia necessário.

### 3.4.4. Topologia tal que posição radial dos pontos internos diferente dos externos

Como se pôde perceber a região crítica, limitante, do processo de geração da malha computacional e na caracterizada pelas cavidades/região fluida próxima à parte retilínea do estator, cujas divisões eram atreladas as divisões da parte curva correspondente sobre o rotor.

Durante a fase de construção das malhas através das topologias anteriores, percebeu-se que se podia minimizar o efeito da distorção da malha nessa região crítica através da desassociação parcial do número do número de pontos sobre a curva do rotor do número de pontos sobre as linhas do estator, isto é, o numero de pontos, para a formação dos blocos sobre as linhas do rotor, não precisa ser necessariamente o mesmo sobre a linha do estator.

A diferença entre o número de pontos entre as curvas possibilita associar os vértices dos blocos em uma configuração que apresente menores distorções, pois na região identificada como crítica concentra-se uma maior quantidade de blocos enquanto que nas outras regiões a associação é realizada sem que todos os pontos sejam utilizados.

Na Figura 19 (a) é mostrada a disposição dos nós distribuídos, onde cada curva foi seccionada em várias partes iguais, sendo em 24 nós no segmento externo e 48 no segmento interno e na Figura 19 (b) é mostrada a malha computacional gerada através desta topologia.

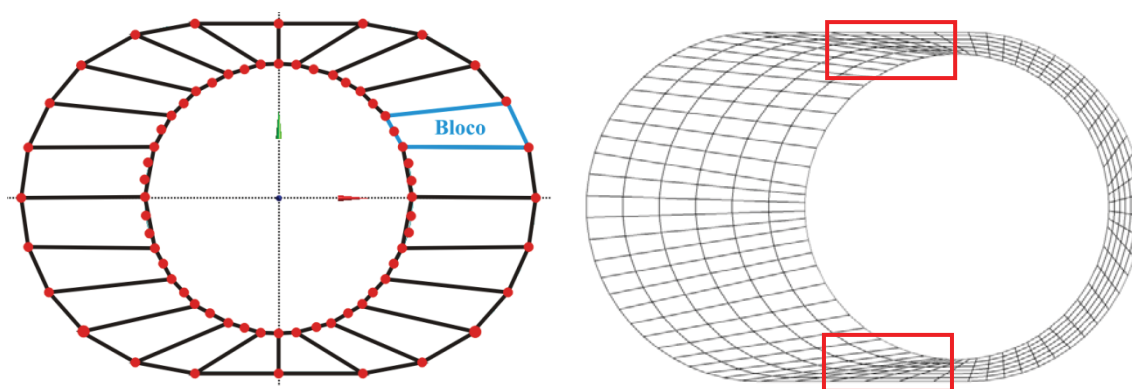


Figura 19: Topologia de 24 pontos externos e 48 pontos internos: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional

Esta metodologia apresentou ganhos (elementos menos distorcidos) significantes em relação às anteriores, mas ainda se verificaram problemas na região crítica identificada acima, principalmente com a redução da folga entre o rotor e o estator para aproximadamente 0,37 mm. Seguindo a mesma linha de raciocínio foi aumentado o número de nós em cada curva da geometria, seccionando agora em 26 nós no segmento externo e 96 no segmento interno,

como é mostrado na Figura 20 (a) e na Figura 20 (b) é mostrada a malha computacional gerada através desta topologia.

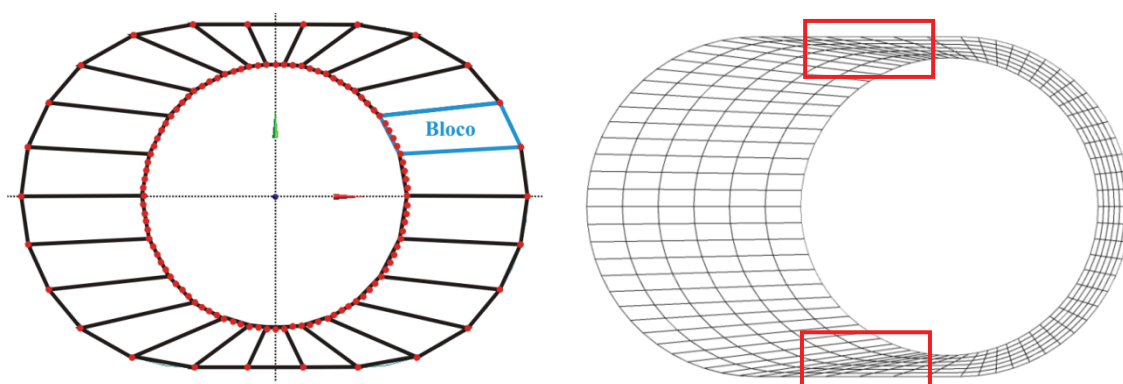
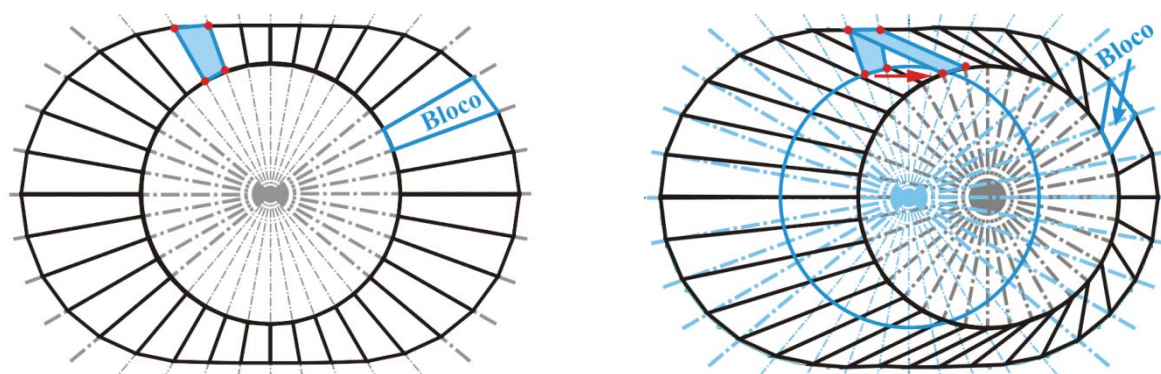


Figura 20: Topologia de 26 pontos externos e 96 pontos internos: (a) Associação dos Blocos, (b) Malha computacional

### 3.4.5. Topologia radial centrada nas seções do rotor e do estator

Apesar de todo o esforço despendido para desenvolvimento das topologias anteriores, e de relativo sucesso para algumas delas, nenhuma delas se apresentou como uma topologia ótima, apropriada para a geração de malhas para BCP com folgas muito pequenas (0,1 mm), ou de várias possibilidades geométricas. Assim, buscou-se um processo de geração de malha que tentasse reproduzir ao máximo as características cinemáticas da BCP. Assim, foi proposta esta topologia que ao contrário de todas anteriormente testadas, utiliza-se de linhas puramente radiais com origem no centro da seção do rotor e na seção do estator para distribuir os pontos ao longo dos perímetros (rotor e estator).

A distribuição dos pontos no rotor é guiada pelas linhas radiais concêntricas na seção do rotor, enquanto nos pontos do estator, é guiada pelas linhas radiais concêntricas na seção do estator, como mostrado nas Figuras 21 (a) e (b). Também é mostrado na Figura 21 (b), o deslocamento dos nós do bloco e a nova configuração causada pelo movimento da bomba. Note que, para uma seção transversal qualquer, o movimento dos nós se dá de maneira paralela ao eixo horizontal,  $x$ .

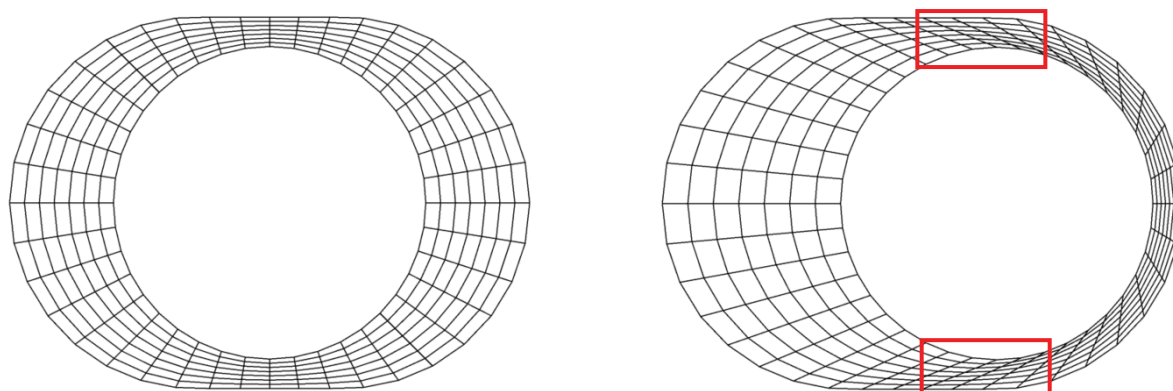


(a) Linhas radiais para o rotor no centro

(b) Linhas radiais para o máximo deslocamento do rotor

Figura 21: Ilustração das linhas de base para distribuição dos pontos (centrada na seção do rotor e do estator)

As Figuras 22 (a) e (b) ilustram as malhas geradas para as duas posições limites do rotor no interior do estator, utilizando esta topologia de geração de malhas.



(a) Linhas radiais para o rotor no centro

(b) Linhas radiais para o rotor no seu deslocamento máximo

Figura 22: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do rotor e do estator)

Nesta nova distribuição foi observado que os elementos da região crítica apresentaram uma redução na distorção durante a simulação, conseguindo-se uma malha mais robusta com baixa distorção para uma geometria com folga de 0,185 mm entre o rotor e o estator (folga da bomba utilizada por Gamboa *et al.*, 2002). No entanto, uma topologia otimizada ainda se fazia necessária.



Nas Figuras 23 (a) e (b) são mostradas duas malhas 3D, uma na forma de “grid” e outra na forma volumétrica, respectivamente. Usando-se a topologia em que as linhas radiais são centradas nas seções do rotor e do estator. Note-se que a coordenada  $z$  é discretizada seguindo-se os ângulos de hélice do rotor e do estator.

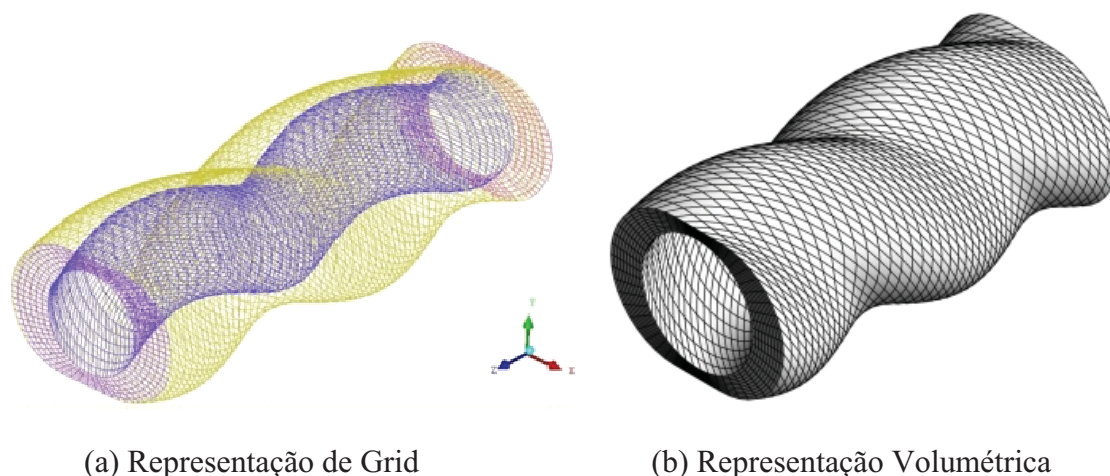


Figura 23: Malha numérica representando a região fluida, topologia baseada na construção de linhas helicoidais

#### 3.4.6. Topologia centrada na seção do estator

As deformações dos elementos da malha, provocadas com o movimento do rotor no interior do estator, de cada topologia anteriormente empregada, indicaram a direção para a geração otimizada das malhas para uso na simulação de BCP's.

Baseando-se nas informações implícitas obtidas destas topologias, foi proposta uma topologia baseada em linhas radiais fixas, centradas na origem da seção do estator. Os nós/vértices extremos da malha/bloco computacional (sobre as superfícies do estator e do rotor) são obtidos a partir de interseções destas linhas radiais com as superfícies (linhas) do estator e do rotor, para qualquer posição do rotor.

As Figuras 24 (a) e (b) ilustram o traçado permanente das linhas radiais segundo a metodologia. Com essa, evitam-se as grandes distorções angulares (os ângulos dos elementos hexaédricos são deformado minimamente), em favor de deformações lineares, mais facilmente tratadas com um refino na malha. Nesta figura também mostra o movimento dos nós no perímetro da seção circular do rotor devido ao movimento da bomba e como se apresenta o bloco em sua nova configuração.

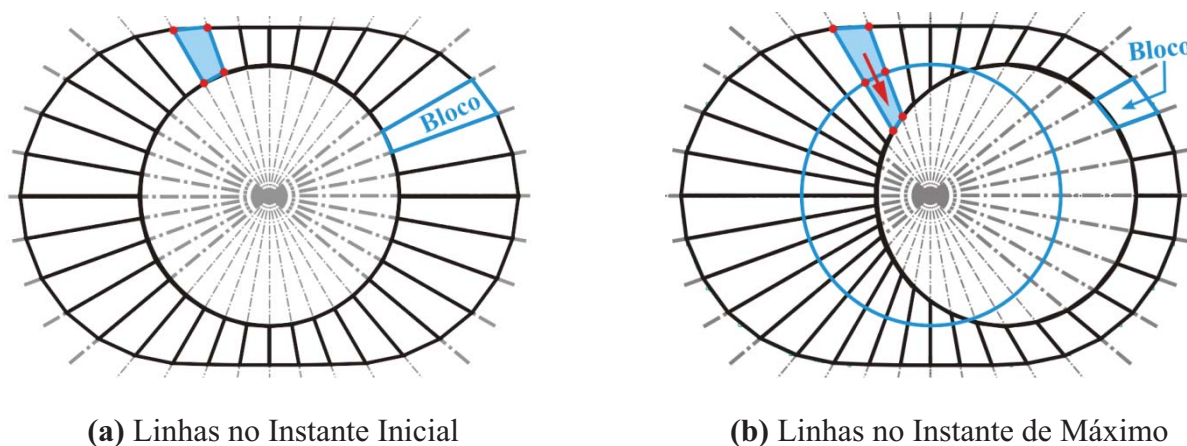


Figura 24: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluida (centrada na seção do estator)

Nas Figuras 25 (a) e (b), são mostradas as malhas utilizando esta topologia, para duas posições distintas do rotor, destacando as regiões de maiores distorções dos elementos, as quais são as menores possíveis, entre todas as topologias analisadas.

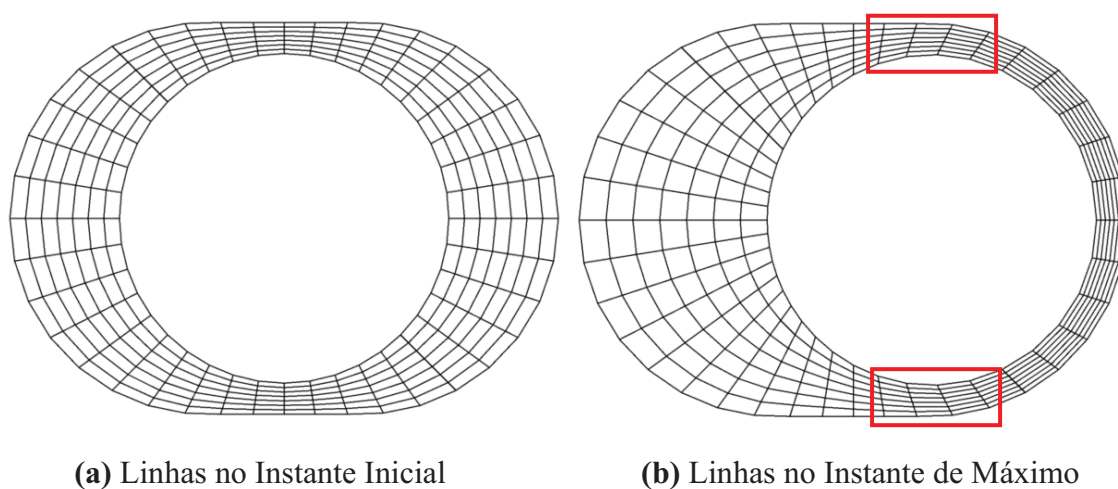


Figura 25: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do estator)

Para que os elementos se aproximem da forma hexahédrica, o máximo possível, possibilitando assim a simulação para geometrias com pequenas folgas entre o estator e o rotor, a coordenada  $z$  é discretizada de maneira retilínea, sem o acompanhamento das linhas de hélice do rotor e do estator.

Nas Figuras 26 (a) e (b) são mostradas duas distribuições da malha 3D da região fluida: na primeira uma distribuição de “grid” e na segunda uma apresentação volumétrica para uma melhor visualização dos elementos ao longo da coordenada  $z$ .

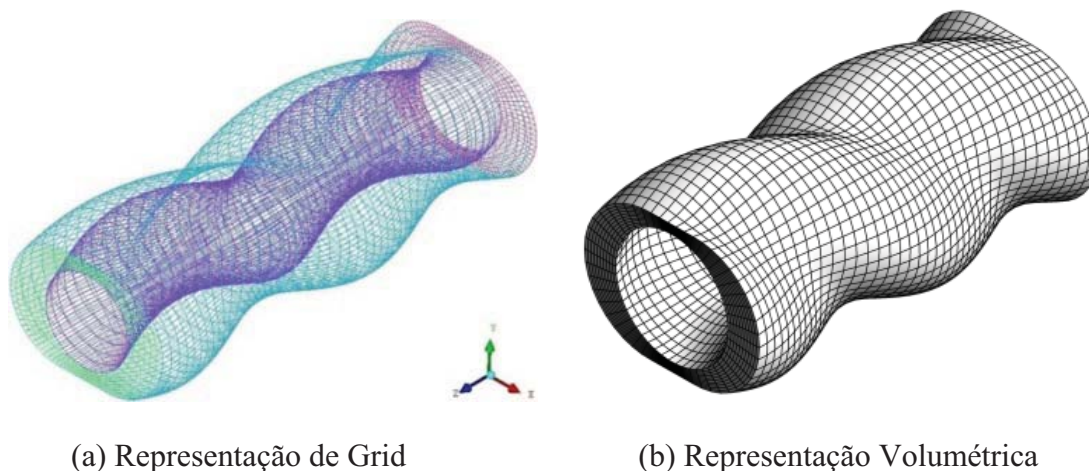


Figura 26. Malha numérica representando a região fluida, topologia baseada na construção de linhas retas longitudinais

Note-se, agora, que o emprego dessa metodologia de geração de malhas torna mínimas as distorções angulares dos elementos. Em adição, também se percebe dessas figuras que, essa topologia tenta preservar a ortogonalidade inicial entre as linhas radiais e longitudinais “circulares”, uma característica buscada em malhas de métodos numéricos.

### 3.5. Implementação Computacional

Para especificação e uso das malhas geradas de acordo com as topologias desenvolvidas previamente, duas formas de implementação computacional disponíveis no CFX/ANSYS foram empregadas: implementação via CEL dos nós sobre a superfície do rotor (*CFX Expression Language*) implementação via “*Junction Box*” de leituras de arquivos de malha para cada passo de tempo.

O modelo matemático, associado às malhas especificadas pelas duas formas de implementação, é resolvido através da discretização via Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos, EbFVM, e implementado no CFX/ANSYS.

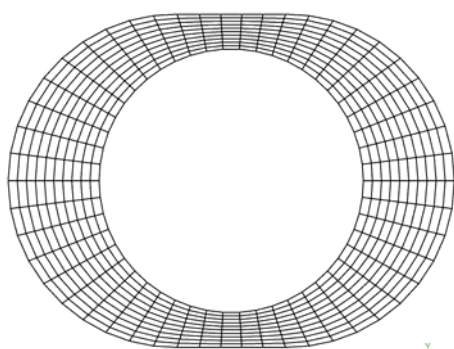
### 3.5.1. Especificação, via CEL, dos nós sobre a superfície do rotor

Essa forma de implementação da malha computacional foi o primeiro passo dado para a resolução do problema. CEL é um acrônimo de “*CFX Expression Language*”, uma linguagem interna do CFX que possibilita a introdução de variáveis e funções, através de sua interface.

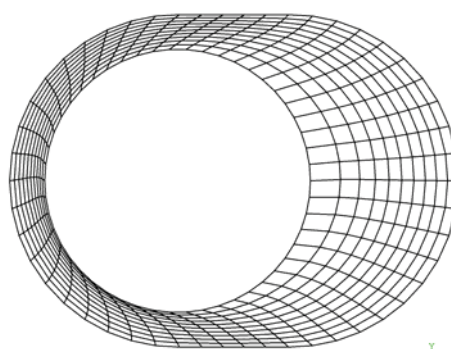
Assim, o movimento da malha é caracterizado através da imposição, via CEL, dos nós sobre a superfície do rotor apenas, isto é, as posições dos nós da parede do rotor são especificadas para cada passo de tempo, e a nova posição dos nós internos são calculadas internamente pelo CFX/ANSYS considerando uma deformação elástica linear da malha, resolvendo uma equação de Poisson para cada coordenada (Ansys, 2010). A posição dinâmica do rotor (logo, dos pontos sobre a sua superfície) é obtida diretamente das equações que descrevem a cinemática da BCP (Equações 3.1 a 3.3).

Essa forma de implementação mostrou-se inadequada, uma vez que é observado efeito indesejado no cálculos dos nós internos da malha: uma deformação residual é introduzida nos elementos com maiores deformações ao longo do passo de tempo, levando a um processo de histerese com a rotação do rotor e, conseqüentemente, divergência do processo de solução devido ao mal condicionamento da matriz jacobiana, relacionada ao movimento dos elementos, depois de alguma revoluções do rotor.

Para contribuir para um maior entendimento do efeito de histerese do deslocamento dos nós da malha, as Figuras 27 e 28 mostram o movimento discreto da malha, em quatro instantes de tempos para a mesma posição angular do rotor (o início, Figura 27 (a)  $t = 0$  s, um instante intermediário, Figura 27 (b)  $t = 0,25$  s, em um tempo  $t = 0,75$  s, Figura 27 (c), e no tempo  $t = 2$  s, Figura 27 (d), ilustrando o efeito do acréscimo de rigidez da malha ao longo do tempo de simulação pelas elevadas distorções introduzidas nos elementos.



(a)  $t = 0$  s



(b)  $t = 0.25$  s

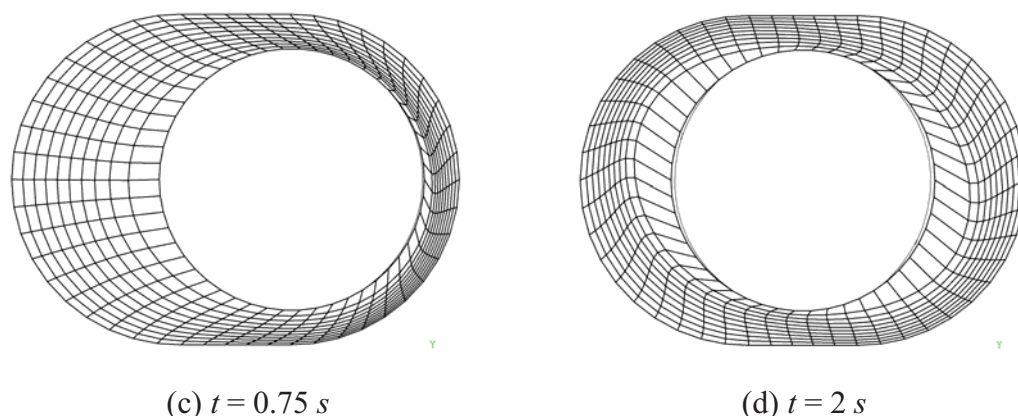


Figura 27: Malha ilustrando grandes distorções ao longo do tempo causadas pela rigidez artificial, para os tempos (a)  $t = 0.75 s$ , (b)  $t = 2 s$ , (c)  $t = 0.75 s$  e (d)  $t = 2 s$ .

### 3.5.2. Leitura de arquivos de malhas

Após a identificação dos problemas que impossibilitaram a utilização da alternativa anterior, foi utilizada uma segunda alternativa, que se mostrou mais adequada à descrição do movimento da bomba, a utilização de sub-rotinas em Fortran (`upd_crdrv_x_user.F`, `update_crdrv_x_user.F`, `update_mesh_user.F` e `set_mesh_user.F`) presentes no pacote ANSYS/CFX\_v11, as quais fazem a leitura de  $n$  arquivos contendo informações das malhas computacionais previamente geradas no ICEM para a topologia escolhida, para diferentes posições do rotor distribuídas ao longo de uma rotação da BCP.

Esta alternativa, embora computacionalmente inadequada, representa adequadamente o escoamento no interior da BCP. Foram realizadas simulações do escoamento para diferentes situações operacionais (diferença de pressão através da bomba, diferentes viscosidades e diferentes rotações), procurando entender o comportamento da bomba e verificar se os resultados obtidos a partir do modelo computacional desenvolvido seguem as tendências físicas esperadas, procurando desta forma, uma validação qualitativa do modelo computacional desenvolvido.

Apresentam-se a seguir alguns resultados que indicam as tendências gerais do escoamento para as diferentes situações operacionais. Nas Tabelas 1 e 2 são mostrados os parâmetros geométricos e as propriedades dos fluidos utilizados por Gamboa *et al.* (2002 e 2003).

Tabela 1: Parâmetros geométricos da BCP dos experimentos de Gamboa *et al.* (2002 e 2003).

Número de Lóbulos	<b>1</b>
Excentricidade – <b>E</b>	<b>4,039 mm</b>
Diâmetro da Seção Rotor – <b>d<sub>R</sub></b>	<b>39,878 mm</b>
Menor Diâmetro do Estator – <b>d<sub>S</sub></b>	<b>40,248 mm</b>
Folga/Interferência – <b>w</b>	<b>- 0,185 mm</b>
Passo do Estator – <b>Ps</b>	<b>119,990 mm</b>
Nº de Passos do Estator – <b>NPST</b>	<b>3</b>

Tabela 2: Propriedades dos fluidos usados nos experimentos de Gamboa *et al.* (2002 e 2003).

PROPRIIDADE	ÓLEO	ÁGUA
Massa Específica $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	868	1000
Viscosidade Dinâmica $\mu$ [Pa.s]	0,042 [42 cp]	10 <sup>-3</sup> [1 cp]

Nas Figuras 28 e 29 é apresentado o comportamento da vazão volumétrica com a pressão diferencial através da bomba ( $\Delta P$ ) e comparado com os resultados experimentais desenvolvidos por Gamboa *et al.* (2002). Foram consideradas diferentes rotações (100 rpm e 300 rpm) e diferentes fluidos (água e óleo), cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2. A bomba analisada possui um comprimento total equivalente a 3 passos do estator, conforme Tabela 1.

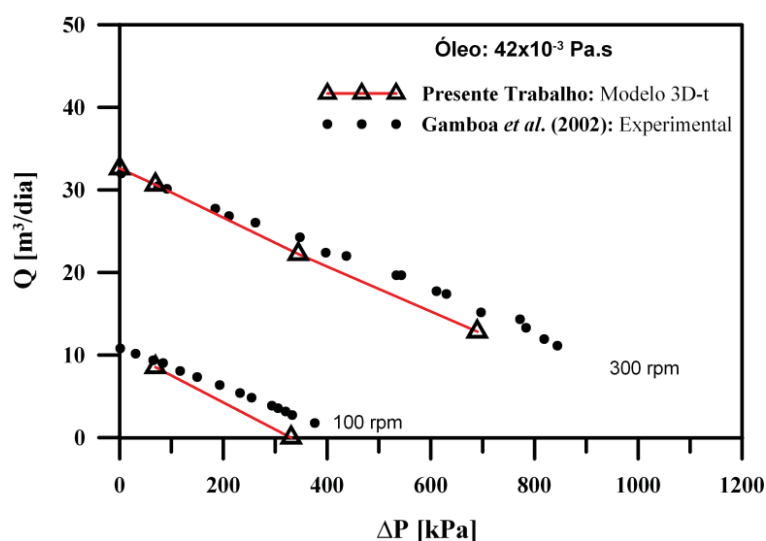


Figura 28: Comparação da vazão volumétrica versus diferencial de pressão para óleo

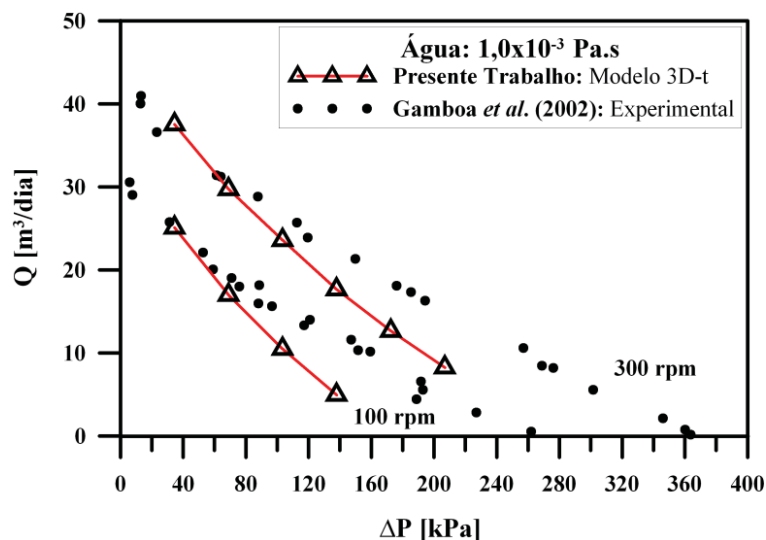


Figura 29: Comparação da vazão volumétrica versus diferencial de pressão para água

Numa rápida comparação entre as duas figuras, percebe-se que para baixas viscosidades, a capacidade de selagem entre as cavidades diminui rapidamente com a diferença de pressão aplicada, diminuindo também a eficiência de bombeamento.

Na Figura 30 é mostrada a distribuição de pressão ao longo do estator para as condições dadas nas Tabelas 1 e 2, limitando-se entretanto ao óleo e a 100 RPM. Esta informação é muito importante, pois permite obter, em qualquer local da bomba, os valores de pressão que posteriormente serão utilizados no modelo FSI, o qual será descrito no capítulo 6.

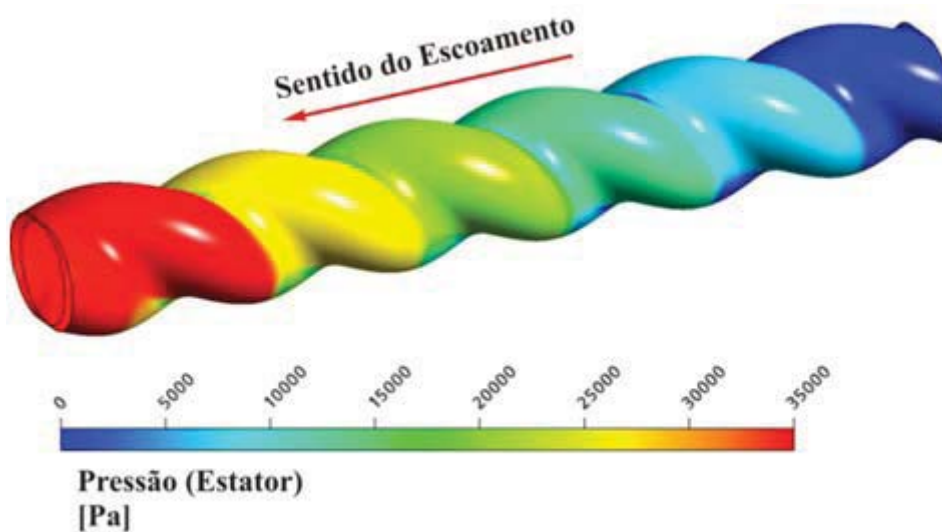


Figura 30: Distribuição de Pressão ao longo do estator da BCP

---

Esta alternativa permitiu uma melhor representação do escoamento, mas ainda trazia um forte entrave, que era o custo computacional muito elevado, devido ao tempo gasto para a geração e leitura das malhas geradas. Também, a discretização do movimento de rotação estava fortemente atrelada e limitada a quantidade das malhas com posições diferentes, ao longo de uma rotação, dificultando assim a simulação futura de casos mais realísticos, como: geometrias com folga muito pequena, casos com contato perfeito entre o rotor e o estator (folga nula) e casos com interferência.

Para se amenizar a dificuldade de tal processo, foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran, denominado **REPLAYMESH.F**, que interagiu com o ICEM/CFD. A função deste programa era exclusivamente gerenciar os processos de importação do modelo sólido e a geração da malha no ICEM/CFD através de um comando denominado “*replay command*”, o qual automatizava grande parte do procedimento.

No entanto, essa rota não era livre de erros, pois ela associava automaticamente os elementos topológicos do bloco aos da geometria, de maneira que, em determinados locais da geometria, onde a tolerância utilizada pelo “*software*” se confundia com as distâncias das curvas da geometria, essa associação poderia não ser realizada de forma adequada, gerando-se elementos negativos ou distorcidos, que impossibilitariam a simulação.

No próximo capítulo será descrita uma metodologia desenvolvida para suprir as deficiências deste processo, uma vez que não será necessária a geração da geometria e a malha associada a cada posição do rotor é gerada através da linguagem de programação FORTRAN em cada passo de tempo da simulação, com total controle da posição de cada nó da malha. As coordenadas ( $x, y, z$ ) de cada nó da malha associada a cada posição do rotor será diretamente transferida via memória do computador, reduzindo brutalmente o custo computacional.



---

---

# **CAPÍTULO 4**

---

---

## **GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE METODOLOGIA PRÓPRIA**

---

---

---

---

## GERAÇÃO DE MALHA ATRAVÉS DE METODOLOGIA PRÓPRIA

Neste capítulo será apresentada a descrição do processo de geração de malha através de uma metodologia própria alternativa, destacando as principais vantagens presentes na sua utilização, como também os resultados obtidos.

### 4.1. Topologias geométricas

Como foi descrito no capítulo anterior, a complexidade geométrica existente nas bombas de cavidades progressivas (BCPs) junto à cinemática do movimento da malha, produzem uma forte distorção dos elementos da malha computacional. Baseando-se nestes problemas, se fez necessário desenvolver uma metodologia para suprir as necessidades não suportadas pelas metodologias diretas de geração de malhas citadas no capítulo anterior.

Para a geração das malhas utilizando a metodologia própria, duas alternativas foram empregadas seguindo os princípios topológicos já descritos no capítulo anterior e repetidos abaixo por conveniência.

#### 4.1.1. Topologia radial centrada nas seções do rotor e do estator

Esta topologia descrita no capítulo anterior, para utilização no Icem através de uma estrutura de blocos, também foi utilizada na geração de malhas através da metodologia própria utilizando uma linguagem de programação Fortran.

Nas Figuras 31 (a) e (b) são mostradas as linhas de base da topologia no instante inicial e no instante em que o deslocamento do rotor é máximo, juntamente com o deslocamento puramente horizontal do ponto móvel da malha sobre o rotor. Para o rotor posicionado no instante inicial, as linhas de base guiarão a construção dos elementos da malha, como é mostrado na Figura 32 (a). Conforme pode ser observado, grandes distorções dos elementos da região considerada problemática são demarcadas na Figura 32 (b). Também é mostrado nesta figura, que no instante em que o rotor está posicionado no seu deslocamento máximo, as linhas que guiarão a construção dos elementos serão formadas a partir dos pontos produzidos no rotor (pontos móveis) e no estator (pontos fixos).

A malha numérica é gerada de maneira que as linhas radiais centradas na seção do estator produzem os pontos, fixos, sobre a aresta do estator, enquanto que as linhas radiais centradas na seção do rotor, móveis, produzem sempre os mesmos pontos sobre a aresta do rotor.

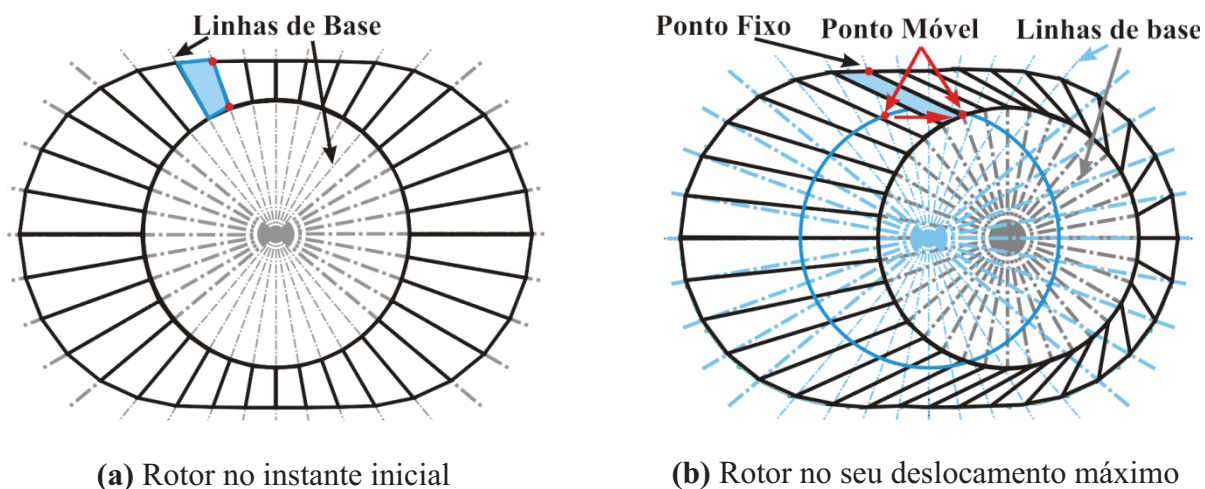


Figura 31: Ilustração das linhas de base para distribuição dos pontos (centrada na seção do rotor e do estator)

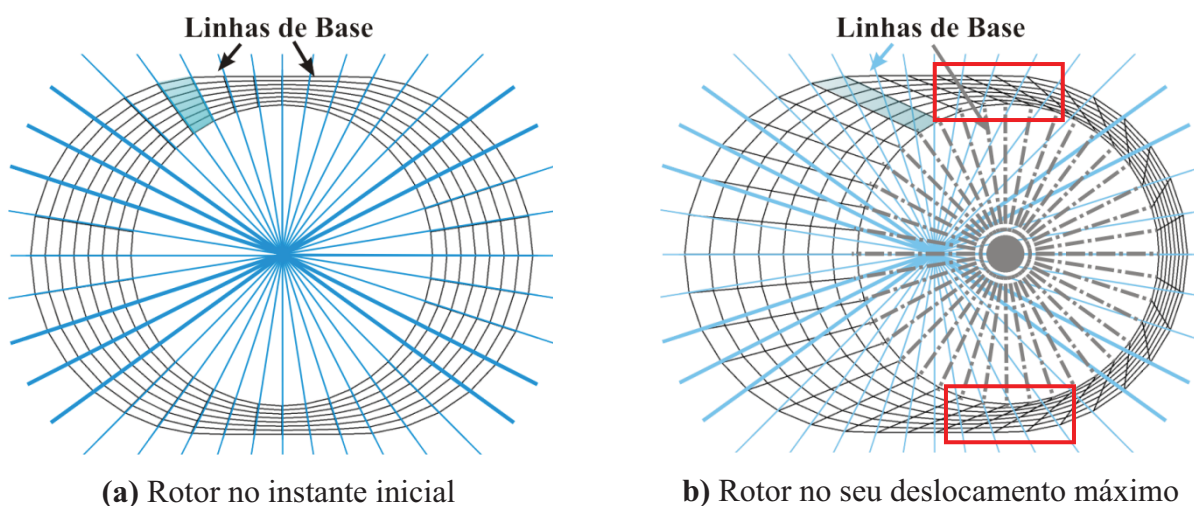
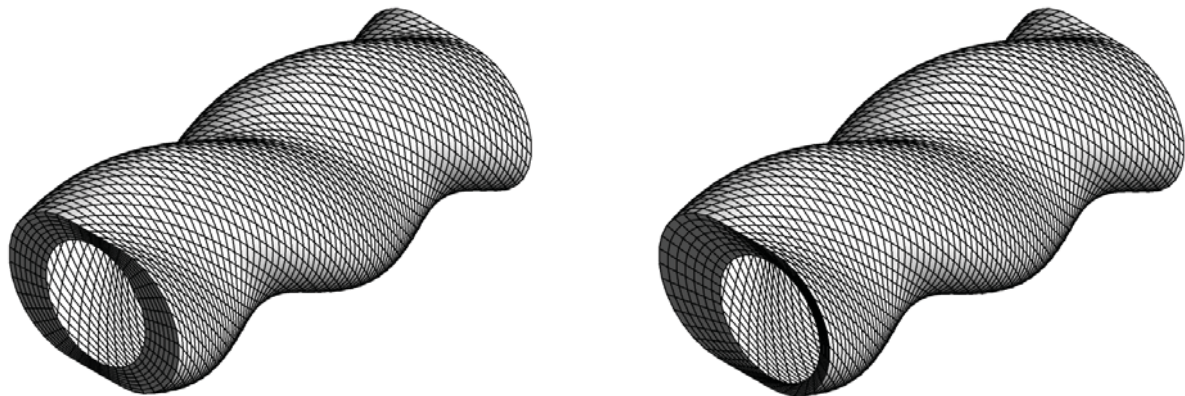


Figura 32: Ilustração das malhas computacionais (centrada na seção do rotor e do estator)

De acordo com a Figura 32 (b), pode-se observar a ocorrência de elementos angularmente distorcidos na região em destaque, não possibilitando assim, a simulação para geometria da bomba com pequenas folgas entre o estator e o rotor. Nas Figuras 33 (a) e (b) são mostradas duas malhas 3D, para o instante inicial e posicionado no deslocamento máximo do rotor. Note-se ainda que a discretização ao longo da coordenada longitudinal  $z$ , segue as linhas de geração da geometria.



(a) Rotor no instante inicial

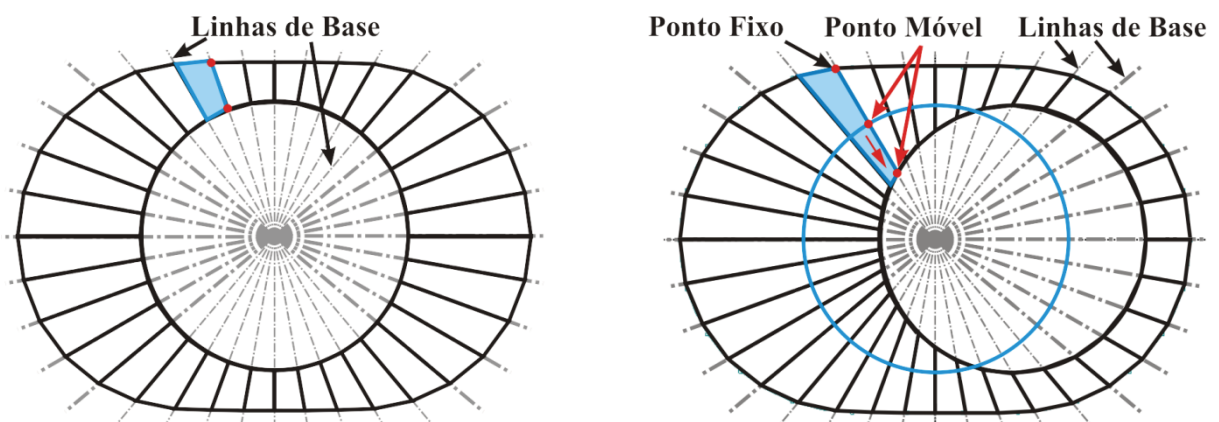
(b) Rotor no seu deslocamento máximo

Figura 33: Ilustração das malhas computacionais 3D (centrada na seção do rotor e do estator)

#### 4.1.2. Topologia centrada na seção do estator

Neste tipo de topologia para geração da malha, consideram-se, exclusivamente, linhas puramente radiais com relação a uma seção transversal da BCP, com origem no centro do estator. Os pontos obtidos sobre a superfície do estator são fixos, enquanto os pontos sobre a superfície do rotor são obtidos pela interseção das linhas radiais de base com a aresta do rotor, móvel.

As Figuras 34 (a) e (b) ilustram as linhas de base para traçado da malha nas duas posições limites do rotor. Com essa topologia, evitam-se as grandes distorções angulares, em favor de deformações lineares, mais facilmente tratadas com um refino na malha.



(a) Rotor no instante inicial

(b) Rotor no seu deslocamento máximo

Figura 34: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluido  
(centrada na seção do estator)

Nesta topologia, as linhas de base puramente radiais guiarão a construção dos elementos da malha como é mostrado nas Figuras 35 (a) e (b), possibilitando maior controle sobre a posição dos nós em relação à seção transversal, pois estas linhas são determinadas pelas equações das retas centradas no estator.

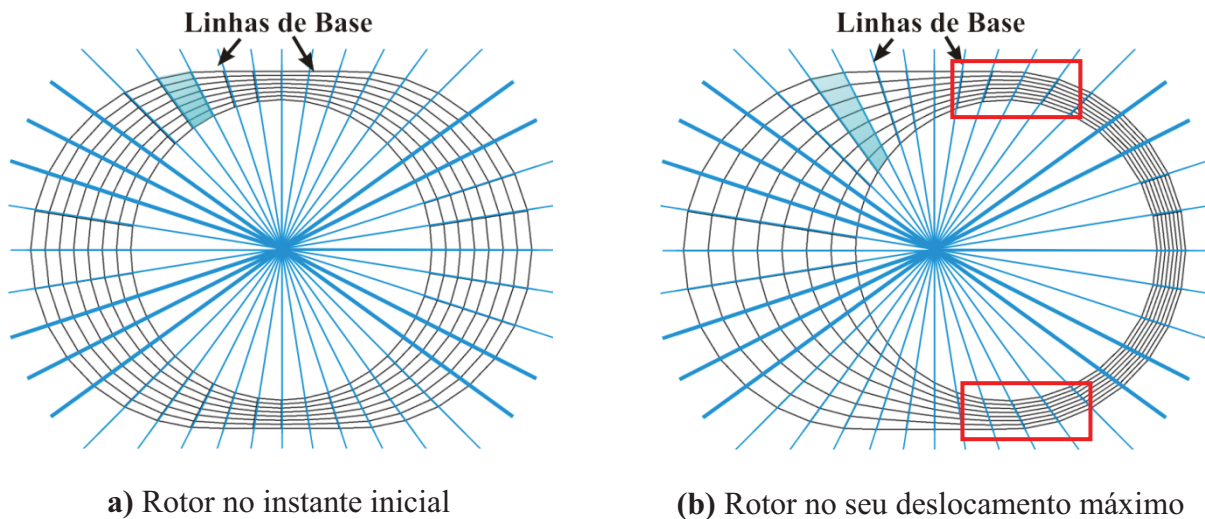


Figura 35: Ilustração das malhas computacionais sobpostas as linhas de base (centrada na seção do estator)

Nas Figuras 36 (a) e (b) são mostradas duas distribuições da malha 3D da região fluida: a primeira com o rotor na posição no instante inicial e a segunda com o rotor na posição no instante máximo. A discretização ao longo da coordenada longitudinal  $z$ , é retilíneo, não seguindo as linhas geratrizes da geometria (hélices).

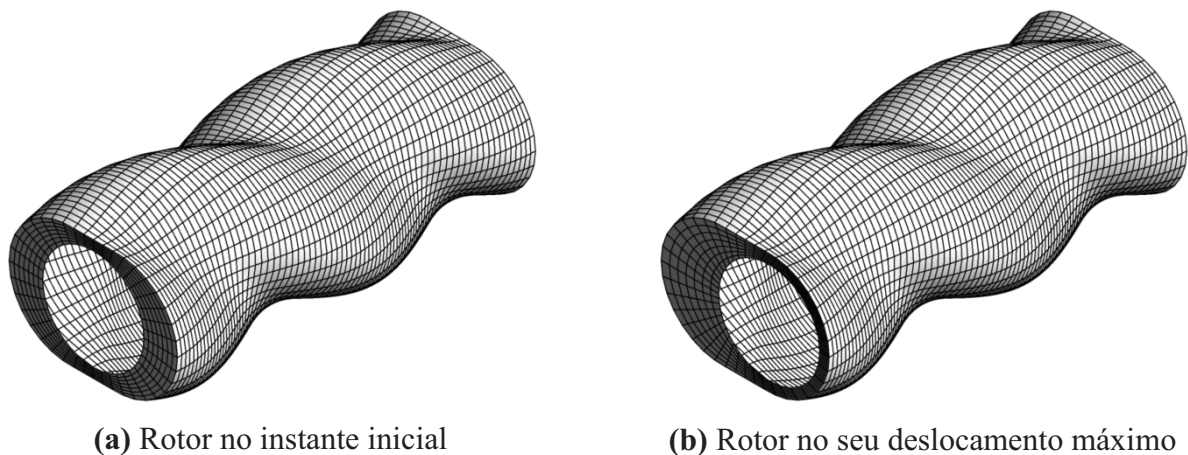


Figura 36. Ilustração das malhas computacionais 3D (centrada na seção do estator)

De acordo com o ilustrado nestas topologias, pode-se observar que apesar dessa topologia apresentar uma melhor distribuição dos nós dos elementos, formando elementos com pequenas e toleráveis distorções, ela apresenta a limitação de geração de malha para geometrias em que ocorra a possibilidade do centro do estator se posicionar fora da seção do rotor, isto é, a excentricidade seja maior ou igual a metade do raio da seção do rotor.

#### 4.2. Geração da malha (metodologia própria)

Um primeiro e importante passo para a geração de uma malha computacional é a organização das informações que a representam.

A conectividade, assim denominada, engloba e conecta as informações das entidades geométricas que constituem a malha, tais como: nós, elementos e superfícies. Além disso, essa conectividade determina o formato do arquivo que será obrigatoriamente suportada pelo “*software*” utilizado no pré-processamento. No presente trabalho foi utilizado um modelo de organização de malha compatível com o formato utilizado no CFX.

A matriz de conectividade é obtida de maneira similar à maioria implementada nos pacotes comerciais, onde o procedimento de numeração e identificação dos elementos segue a regra da mão direita para cada face, com o vetor normal unitário apontando para dentro do volume do elemento.

Como ilustrado na Figura 37, com a presente abordagem é possível a geração de malhas para bombas com estator metálico e/ou elastomérico para as três características geométricas: com folga (interferência negativa), com folga nula (contato perfeito) e interferência positiva (somente para BCP elastomérica) entre rotor e estator.

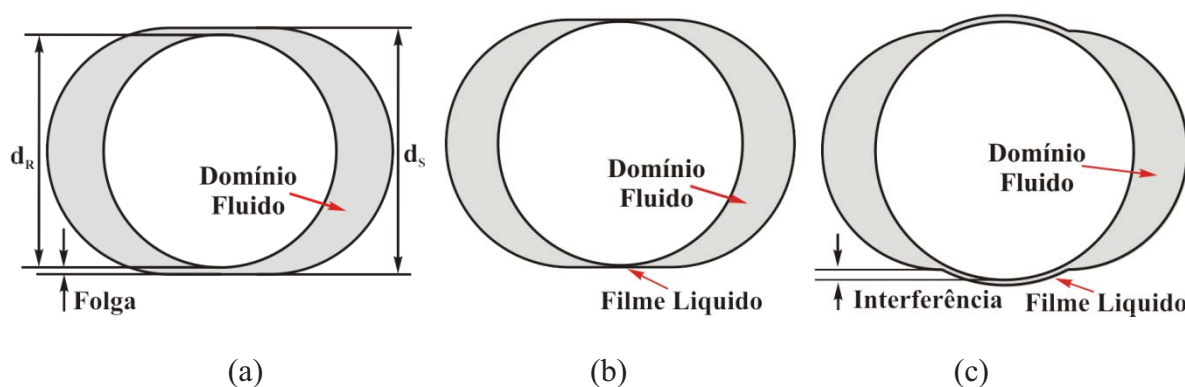


Figura 37: Tipos de geometria/malhas possíveis pela presente metodologia. BCP/Malhas com:

(a) folga ou interferência negativa, (b) interferência nula, (c) interferência positiva

Para contato perfeito e interferência positiva, é assumido um filme fino de líquido que está sempre presente entre o rotor e estator para garantir um domínio fluido contínuo ao longo da bomba, sem cavidades isoladas (é necessário um domínio conexo para discretização numérica do problema). A espessura do filme líquido é controlada através de um parâmetro do usuário podendo ser o menor possível, sem comprometer a qualidade da malha gerada.

Para o desenvolvimento das conectividades da malha, duas, entre tantas, representações de sistemas de coordenadas utilizando a regra da mão direita são ilustradas na Figura 38. Independente da representação empregada, a enumeração cresce primeiro, na direção positiva de  $x$ , em seguida na direção positiva de  $y$  e, finalmente, no coordenado positiva  $z$ . Este procedimento deve também ser seguido para enumeração dos elementos. A restrição se deve à necessidade do vetor unitário na direção  $z$ , apontar para o interior do volume.

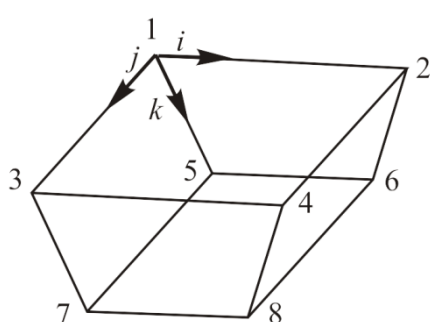
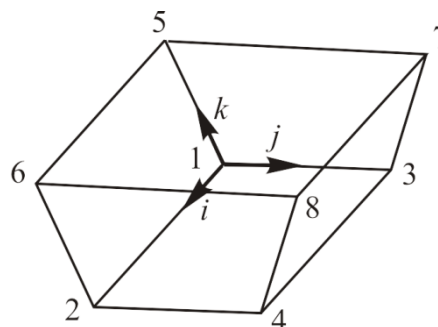
(a) vetor normal  $k$  apontando para baixo(b) vetor normal  $k$  apontando para cima

Figura 38: Numeração de nós produzida de acordo com a regra da mão direita

No arquivo de malha, as coordenadas dos nós estão dispostas em três colunas, contendo os dados referentes às coordenadas, obedecendo à seqüência de  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Em seguida os elementos são organizados em oito colunas (devido aos oito nós de cada elemento), cada coluna corresponde às coordenadas de cada nó pertencente ao elemento, distribuída de acordo com a seqüência da regra da mão direita. Por fim as superfícies relativas aos contornos são formadas relacionando os elementos que fazem parte daquela face/contorno com a discriminação do número da face/contorno, cada face/contorno uma vez que a face/contorno é atribuída de uma numeração.

Finalmente, a matriz de conectividade é inserida de um arquivo inicial do CFX (tempo  $t = 0$  s). As malhas nos outros instantes de tempo são geradas sem tal informação.

As coordenadas espaciais  $X$  e  $Y$  de um nó da malha são avaliadas observando-se as relações ilustradas na Figura 39. Tal figura mostra alguns pontos característicos para duas posições do rotor, em uma determinada posição longitudinal/face  $Z$  (em função da variável angular,  $\theta$ ), e mais especificamente, ao longo de uma linha radial que faz um ângulo  $\gamma$  com o eixo  $X$ . Nessa figura, as variáveis são definidas como:

- $\gamma$  Posição angular da linha radial
- $\theta_s$  Posição angular do estator, caracterizando uma posição longitudinal/face  $Z$
- $R_{SR}$  Raio da seção transversal do rotor
- $d_{CSR}$  Deslocamento do centro da seção do rotor
- $C_0$  Posição do centro da seção transversal do rotor em um instante inicial,  $t_0$
- $C_1$  Posição do centro da seção transversal do rotor em um instante posterior,  $t$
- $P_0$  Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor em um instante inicial,  $t_0$
- $P_1$  Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor em um instante posterior,  $t$
- $P_2$  Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do estator em um instante posterior,  $t$

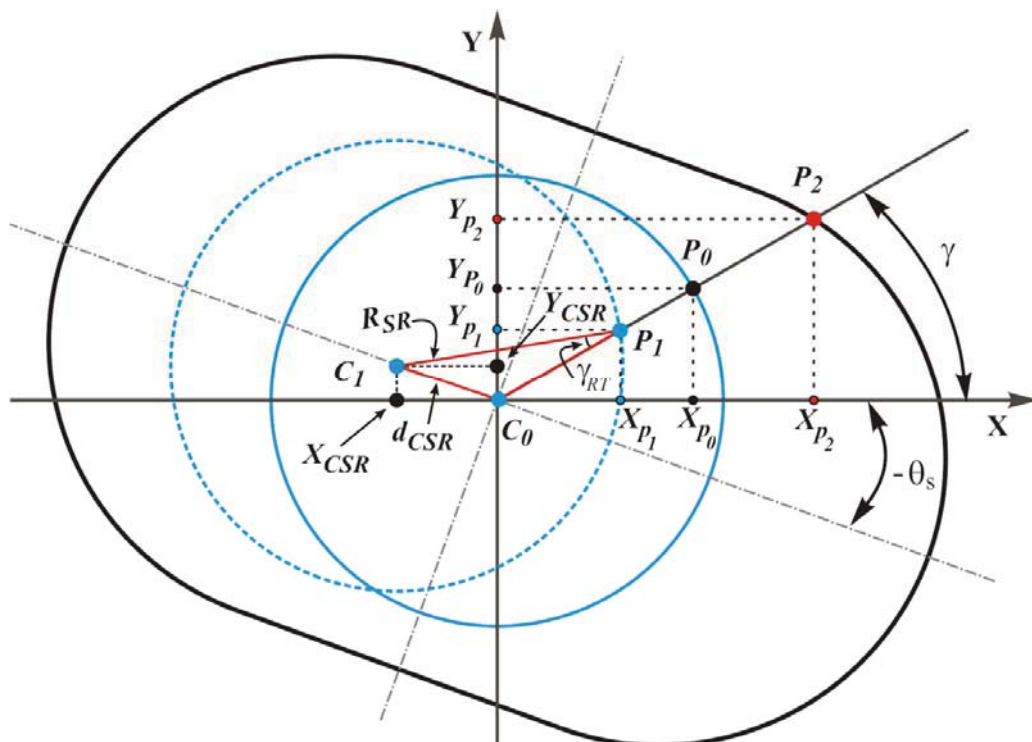


Figura 39: Esquema para Determinação dos Pontos Espaciais da Malha



Pode-se constatar que as coordenadas dos pontos  $P_0$  e  $P_1$ , em relação ao sistema fixo de coordenadas (X,Y), são descritas por:

$$\begin{cases} X_{P_0} = R_{SR} \cos(\gamma) \\ Y_{P_0} = R_{SR} \sin(\gamma) \end{cases} \quad (4.1, 4.2)$$

$$\begin{cases} X_{P_1} = X_{CSR} + R_{SR} \cos(\gamma + \gamma_{RT}) \\ Y_{P_1} = Y_{CSR} + R_{SR} \sin(\gamma + \gamma_{RT}) \end{cases} \quad (4.3, 4.4)$$

Onde, da lei dos senos,

$$\gamma_{RT} = \sin^{-1} \left[ \frac{|d_{CSR}|}{R_{SR}} \sin(\gamma - \theta_s) \right] \quad (4.5)$$

$X_{CSR}$ ,  $Y_{CSR}$  são as coordenadas do centro da seção transversal do rotor,  $\gamma_{RT}$  é o ângulo interno do vértice  $P_1$ . A malha numérica é construída a partir de um algoritmo de inserção de nós entre esses dois pontos, ao longo da linha radial.

Alternativa e adequadamente, a malha de uma BCP pode também ser obtida analiticamente a partir do conceito da interseção entre uma reta (linha radial) e um círculo (nó sobre o rotor), da interseção entre uma reta (linha radial) e outro círculo (nó sobre a parte circular do estator), bem como da interseção entre duas retas (linhas radial e parte reta do estator). Baseando-se na topologia centrada no estator, as retas (linhas radiais e partes retas do estator) são caracterizadas pelas suas respectivas equações. De forma similar, as circunferências do rotor e os pontos circulares dos estator são caracterizados pelas suas respectivas equações do círculo. A Figura 40 ilustra as principais variáveis envolvidas nesse conceito.

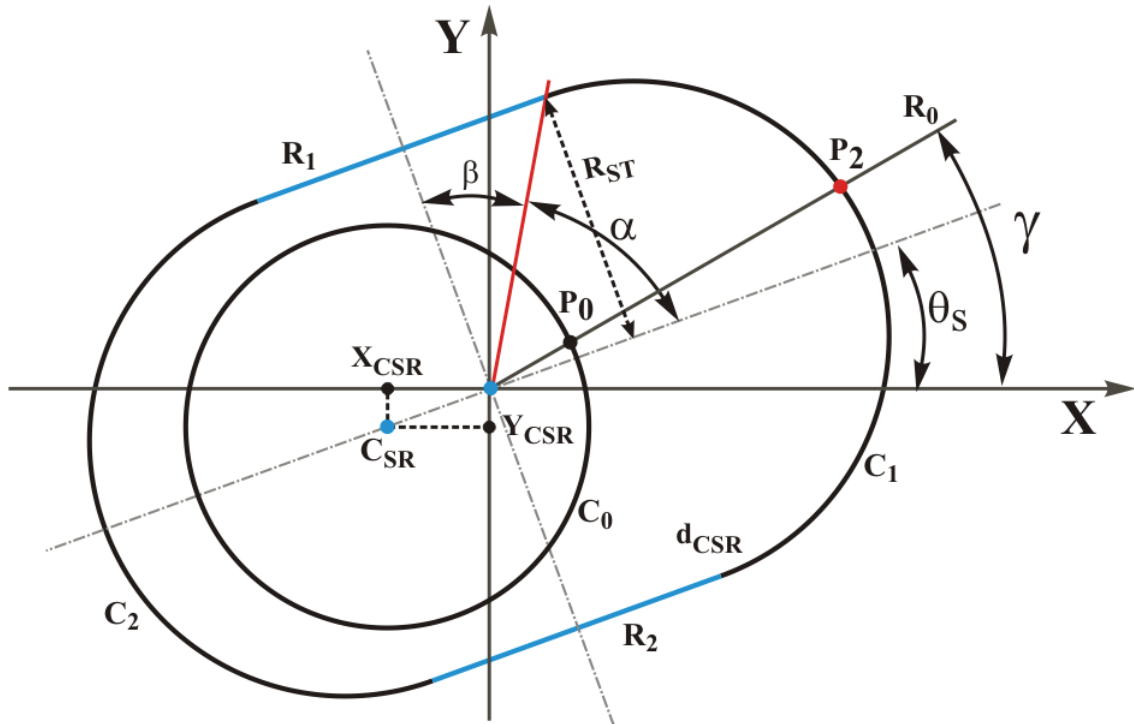


Figura 40: Esquema para determinação analítica dos pontos espaciais da malha

- **Interseção Retas/Círculo**,  $\begin{cases} \text{Nó sobre o Rotor} - P_0 (R_0 / C_0) \\ \text{Nó sobre o Estator} - P_2 (R_0 / C_1 \text{ e } R_0 / C_2) \end{cases}$

Reta Radial -  $R_0$ :

$$\begin{cases} y = Ax \\ A = \tan(\gamma) \end{cases} \quad (4.6, 4.7)$$

Círculo, Rotor e estator -  $C_0, C_1$  e  $C_2$ :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (4.8)$$

Substituindo uma equação na outra, obtém-se a equação de 2º grau:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (4.9)$$

Onde:

$$\begin{cases} a = A^2 + 1 \\ b = -2(x_0 + Ay_0) \\ c = x_0^2 + y_0^2 - R^2 \end{cases} \quad (4.10, 4.12)$$

$$\text{Rotor} \begin{cases} x_0 = X_{CSR} \\ y_0 = Y_{CSR} \\ R = R_{SR} \end{cases} \quad \text{Estator} \begin{cases} x_0 = 2E \cos(\theta_s) \\ y_0 = 2E \sin(\theta_s) \\ R = R_{ST} \end{cases} \quad (4.13, 4.18)$$

A solução dessa equação fornece a coordenada espacial  $x$ , a qual deve ser utilizada na Eq. (4.6) para se obter a coordenada espacial  $y$ .

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (4.19)$$

**OBS:** Quando  $\gamma = \left\{ \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right\}$ ,

Tem-se que:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{cases} \quad (4.20, 4.21)$$

Onde:

$$\begin{cases} a = 1 \\ b = -2y_0 \\ c = x_0^2 + y_0^2 - R^2 \end{cases} \quad (4.22, 4.24)$$

---



---

**- Interseção Reta/Reta,  $R_\theta/R_1$  e  $R_\theta/R_2$  - Nós sobre as retas do estator**

Reta Radial -  $R_\theta$ :

$$\begin{cases} y = Ax \\ A = \tan(\gamma) \end{cases} \quad (4.25, 4.26)$$

Reta do Estator -  $R_1/R_2$ :

$$y = Cx + D \quad (4.27)$$

$$\begin{cases} C = \tan(\theta_s) \\ D = \frac{R_{ST}}{\cos(\theta_s)} \end{cases} \quad (4.28, 4.29)$$

Substituindo uma equação na outra, obtém-se a coordenada espacial  $x$ :

$$x = \frac{D}{A - C} \quad (4.30)$$

Tal equação deve ser substituída na Eq. (4.26) para obtenção da coordenada  $y$ .

**OBS:** Quando as posições da reta angular e do estator forem tais que :

$$\gamma = \left\{ \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right\} \text{ e } \theta_s \neq \left\{ \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right\} \quad (4.31, 4.32)$$

As coordenadas espaciais são dadas por:

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = D \end{cases} \quad (4.33, 4.34)$$

Com base nas equações deduzidas acima, as quais são usadas nas sub-rotinas relacionadas no fluxograma mostrado na Figura 41, a malha inicial é gerada a partir da discretização do número de pontos sobre o segmento de retas entre os pontos  $P_0$  e  $P_2$  e da discretização angular através do incremento/variação angular ( $\Delta\gamma$ ). A discretização na direção longitudinal  $z$  é simplesmente obtida fazendo-se:

$$Z_i = Z_0 + (i-1) \cdot \Delta Z \quad (\text{linhas longitudinais retas}) \quad (4.35)$$

$$Z_i = \frac{P_s}{2\pi} \theta_s \quad (\text{linhas longitudinais que seguem o ângulo de hélice}) \quad (4.36)$$

Algumas particularidades relativas a cada equação de coordenada, por exemplo, as situações de singularidades ilustradas nas observações anteriores, são implementadas diretamente nas sub-rotinas elaboradas para a geração de malha.

Na Figura 41 é mostrado o fluxograma do algoritmo da geração de malhas destacando-se a seqüência de chamada de cada sub-rotina desenvolvida pertencente ao programa **(Malha\_BCP.F90)**.

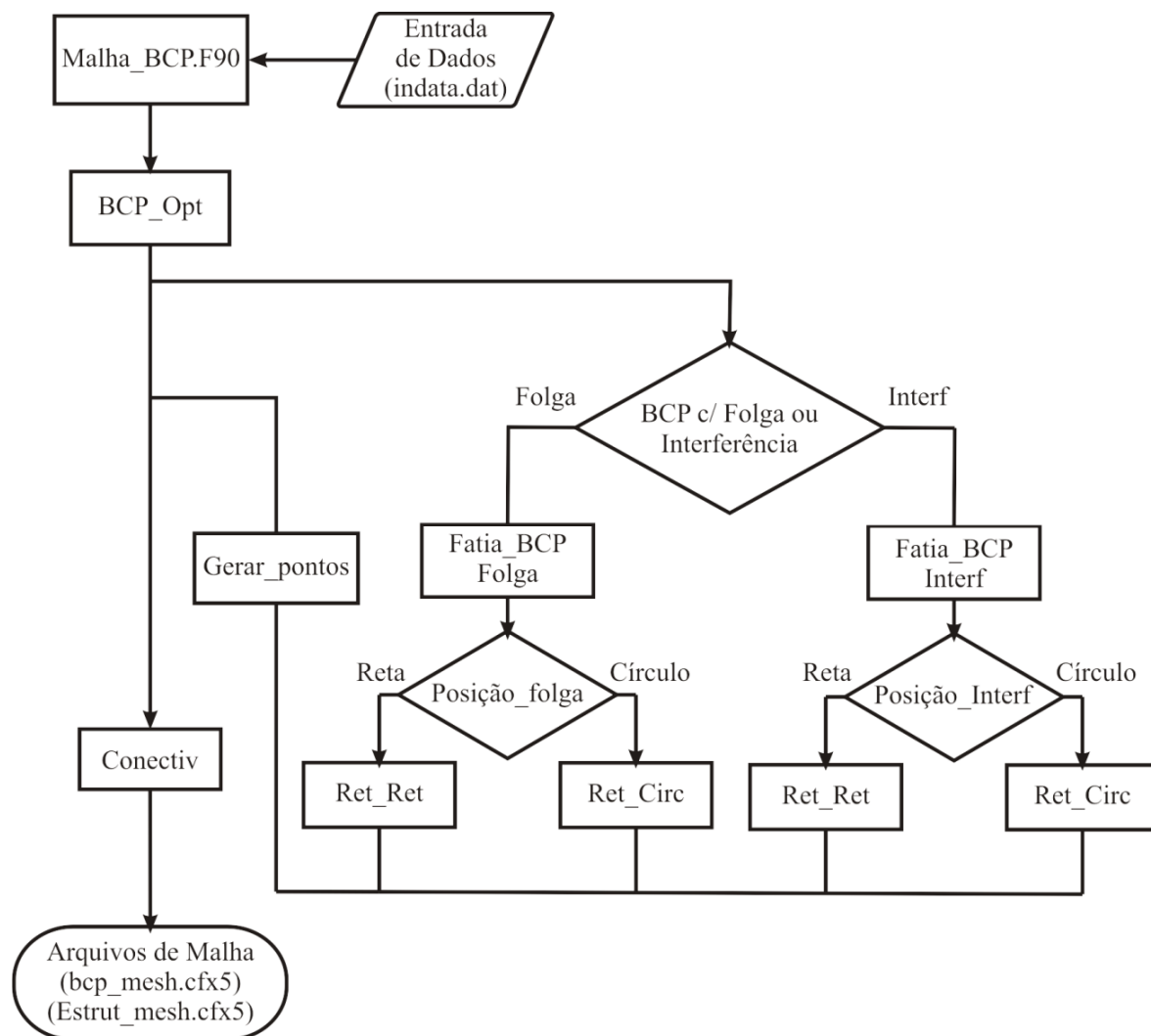


Figura 41: Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas de geração de malhas

Cada sub-rotina acima citada tem sua função no programa principal (**Malha\_BCP.F90**), a qual é sucintamente descrita a seguir.

#### - Malha\_BCP.F90

Este programa é responsável pelo gerenciamento das sub-rotinas e da leitura do arquivo de entrada de dados (indata.dat), para geração inicial da malha do módulo de pré-processamento do CFX. Este programa deve ser executado inicialmente via interface gráfica, ou através do arquivo executável (.exe) do Fortran.

---

---

**- BCP\_Opt**

Esta sub-rotina é responsável pela geração da malha (geração dos arquivos BCP\_mesh.cfx5 e Estrut\_mesh.cfx5 para o tempo  $t = 0$  s) e tomada de decisão se a malha gerada será com folga ou interferência.

**- Fatia\_BCP Folga:**

Nesta sub-rotina são geradas as fatias transversais dos elementos de malha da BCP com folga para cada posição da coordenada  $z$ .

**- Fatia\_BCP Interf:**

Nesta sub-rotina são geradas as fatias transversais dos elementos de malha da BCP com interferência para cada posição da coordenada  $z$ .

**- Ret\_Circ:**

Esta sub-rotina é responsável pela determinação dos pontos de interseção entre a reta e o círculo e entre a reta auxiliar (linha de Base) com o círculo do rotor, através das equações 4.6 a 4.24.

**- Ret\_Ret:**

Esta é responsável pela determinação do ponto de interseção entre a reta auxiliar (linha de Base) e o segmento retilíneo do perímetro interno da cavidade do estator, através das equações 4.25 a 4.34.

**- Posição\_Folga:**

Nesta sub-rotina é realizado o teste das interseções dos segmentos determinadas nas sub-rotinas **Ret\_Ret** e **Ret\_Circ** para uma BCP com folga.

---

---

**- Posição\_Interf:**

Nesta sub-rotina é realizado o teste das interseções dos segmentos determinadas nas sub-rotinas **Ret\_Ret** e **Ret\_Circ** para uma BCP com interferência.

**- Gerar\_pontos:**

É responsável pela geração de pontos sobre uma reta, dados os pontos inicial e final, que foram obtidos pelas interseções determinadas nas sub-rotinas **Ret\_Ret** e **Ret\_Circ**

**- Conectiv:**

Esta sub-rotina é responsável pela geração das conectividades da malha.

Como vantagens oferecidas por essa alternativa, citam-se:

- Não há necessidade de geração de modelos sólidos: não é necessária a utilização de *softwares* de CAD como *Solidedge* ou *DesignModeler/ANSYS* para se representar a geometria da BCP, uma vez que a geometria é representada pelos elementos superficiais e volumétricos da malha.

- Não há necessidade de geração de malhas hexaédricas, para a representação inicial ou a cada vez que se modifique um parâmetro geométrico (diferentes BCPs ou condições de folga). A geração dessas malhas era realizada através do módulo Hexa do ICEM/CFD, sendo um processo extremamente oneroso e complexo. Agora, com a presente metodologia, evita-se o uso do ICEM/CFD.

- A situação de folga nula pode, agora, ser facilmente implementada, bastando fazer a folga tender a zero, por exemplo  $w = 10^{-3} \text{ mm}$ , ou menos. Também, como se verá mais adiante, a geração da malha para a situação de uma BCP elastomérica pode ser realizada.



---

### 4.3. Cálculo, via “*Junction Box*”, das coordenadas dos nós da malha

A forma de interação com o “*software*” citada anteriormente no item 3.5.2, já tinha se mostrado mais adequada à descrição da cinemática da bomba, mas ainda trazia um forte entrave: a quantidade de malhas discretas no tempo, ao longo de uma rotação, era limitada em função do elevado custo para geração e leitura de arquivos das malhas.

Nesta metodologia computacional própria é proposta uma alternativa que reduz os problemas e as limitações acima citadas. Por outro lado, as sub-rotinas para leitura dos arquivos de malha citadas anteriormente no item 3.5.2 possibilitam, a partir de pequenas modificações no código computacional e de adições de outras sub-rotinas, a geração das coordenadas dos nós da malha para cada posição do rotor, discretizada ao longo do tempo, e o seu armazenamento na memória do computador. Isso faz com que o tempo computacional seja reduzido e possibilite uma melhor discretização temporal do movimento do rotor, que antes estava atrelado à quantidade de arquivos de malhas geradas através do Icem e agora somente a uma variável que indica quantas malhas o operador deseja para um período de movimento.

É evidente que um refino temporal implica na geração de um número maior de malhas e a leitura das mesmas. Para malhas maiores (mais refinadas espacialmente) este processo consumiria um tempo de CPU considerável.

Na Figura 42, é mostrado o fluxograma do algoritmo das sub-rotinas da cinemática da bomba. Estas sub-rotinas adicionais permitem a comunicação com as sub-rotinas presentes no CFX/ANSYS, através um sistema de gerenciamento de memória para variáveis compartilhadas (“*MMS- Memory Management System*”), presentes no pacote computacional da CFX/ANSYS.

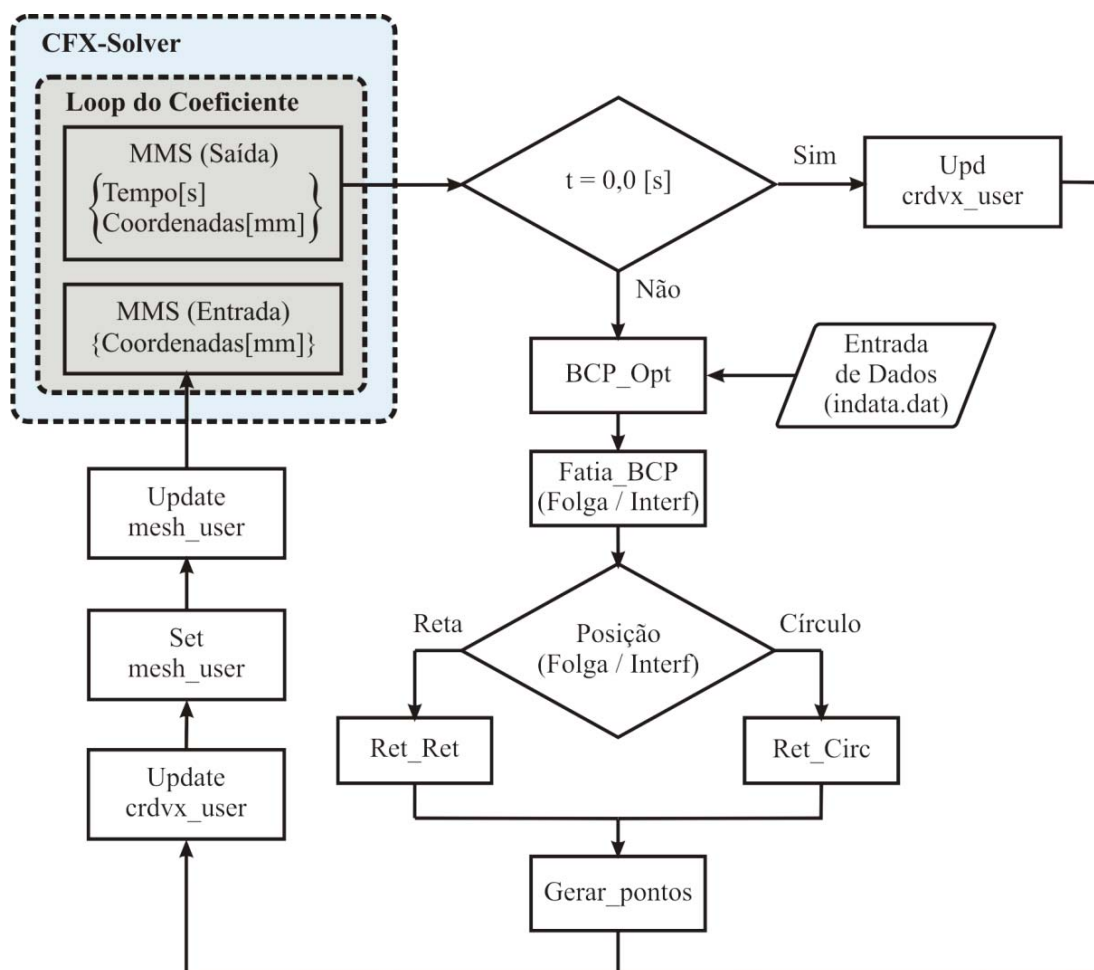


Figura 42: Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas da cinemática da BCP

Além das sub-rotinas citadas no item anterior com a função de geração de malha, as sub-rotinas (upd\_crdvx\_user.F, update\_crdvx\_user.F, update\_mesh\_user.F e set\_mesh\_user.F) que estão sendo utilizadas na descrição da cinemática, fazem parte do pacote computacional ANSYS/CFX\_v11. Maiores detalhes, consultar a referência Ansys (2010)

#### 4.4. Resultados e Discussões

Como produtos do trabalho desenvolvido são comentados a seguir o desenvolvimento de um “software” para geração de malha de BCPs com uma plataforma amigável para o usuário, o procedimento de geração da malha através da metodologia própria desenvolvida, e finalmente os resultados da validação. Assim, é ilustrada a forma de avaliação ou cálculo dos principais parâmetros e a aplicação das malhas no modelo fluido-dinâmico.

#### 4.4.1. “Software” BCP MESHER & CFD

Foi desenvolvido um “software” denominado de BCP MESHER & CFD para auxiliar o usuário a desenvolver uma simulação utilizando as metodologias desenvolvidas neste trabalho, através de um ambiente gráfico muito atrativo. Possibilita ao usuário ter acesso as características importantes na geração de malhas, como: gerar malhas de simples e duplas precisões, determinar a folga entre o rotor e o estator (WMIN – folga mínima, WMAX – folga máxima e TOL\_WF – tolerância da folga), escolher a melhor topologia para o problema (“Mesh Topology” 1 – topologia centrada no centro do rotor e do estator e “Mesh Topology” 2 – topologia centrada no centro do estator) e também executar o software CFX se o mesmo estiver instalado no computador. A Figura 43 ilustra como se apresenta a interface gráfica deste “software” denominado de BCP MESHER & CFD.

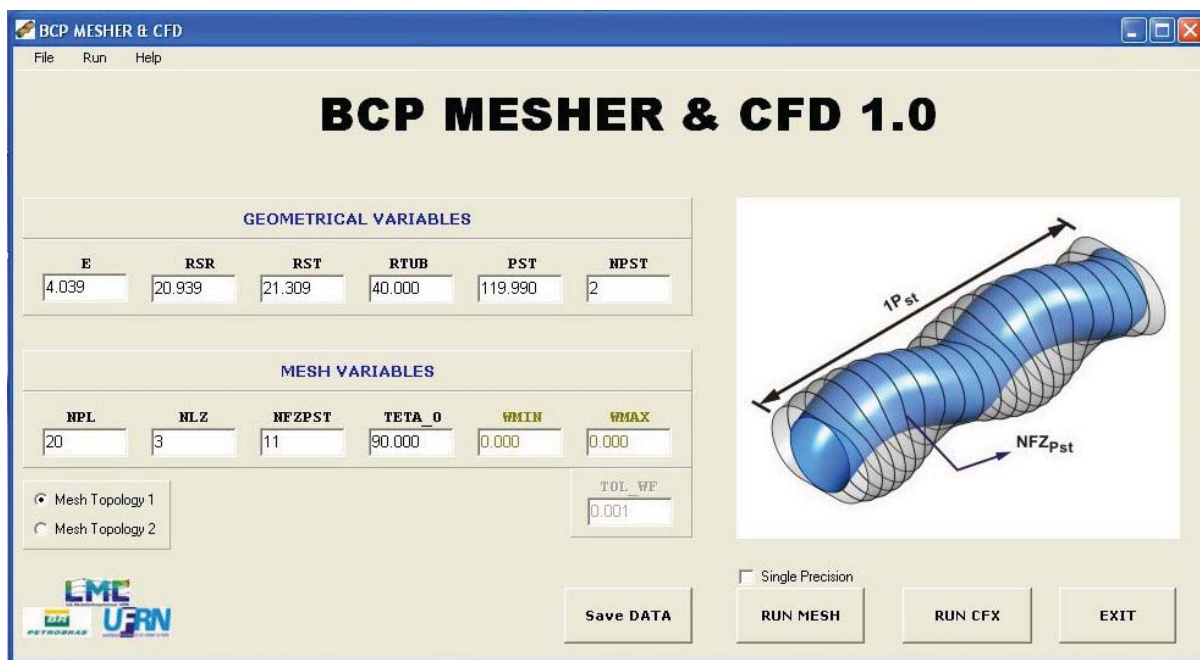


Figura 43: Ambiente Gráfico do BCP MESHER & CFD

#### 4.4.2. Geração da Malha

Na geração da malha computacional se faz necessário fornecer alguns parâmetros geométricos e da malha computacional. Para uma configuração típica, tais parâmetros são fornecidos, conforme as Tabelas 3 e 4, através da leitura de um arquivo de entrada de dados (indata.dat mostrado na Figura 44) ou digitados diretamente no ambiente gráfico desenvolvido para o “software” BCP MESHER & CFD.

Tabela 3: Parâmetros Geométricos

Número de Lóbulos		<b>1</b>
Excentricidade	<b>E</b>	<b>4,039 mm</b>
Raio da Seção Rotor	<b>R<sub>SR</sub></b>	<b>19,939 mm</b>
Menor Raio do Estator	<b>R<sub>ST</sub></b>	<b>20,124 mm</b>
Folga/Interferência	<b>w</b>	<b>- 0,185 mm</b>
Passo do Estator	<b>P<sub>s</sub></b>	<b>119,990 mm</b>
Posição Angular do Rotor no Instante Inicial	<b><math>\theta_0</math></b>	<b><math>\pi/2</math></b>
Número de Passos do Estator	<b>NPST</b>	<b>3</b>

Tabela 4: Parâmetros da Malha

<b>Parâmetros de Entrada</b>		
Número de Pontos ao longo de uma Linha “Circular” em uma Seção Transversal da BCP	<b>NPT<sub>L</sub></b>	<b>200</b>
Número de Linhas “Circulares” em uma Seção Transversal da BCP	<b>NL<sub>Z</sub></b>	<b>11</b>
Número de Seções Transversais, ou Faces, por Passo da BCP	<b>NFZ<sub>PST</sub></b>	<b>101</b>
<b>Parâmetros de Saída</b>		
Número Total de Pontos na BCP	<b>NPT<sub>TOT</sub></b>	<b>662.200</b>
Número de Pontos por Face/Seção Transversal	<b>NPT<sub>FZ</sub></b>	<b>2.200</b>
Número Total de Faces ao Longo da BCP	<b>NFZ<sub>TOT</sub></b>	<b>301</b>
Número de Total de Elementos Hexaédricos na BCP	<b>NEL</b>	<b>600.000</b>
Número de Elementos por Fatia: Estator/Rotor	<b>NEL<sub>CAS</sub></b>	<b>60.000</b>
Número de Elementos por Fatia: Entrada/Saída	<b>NEL<sub>FZ</sub></b>	<b>2.000</b>

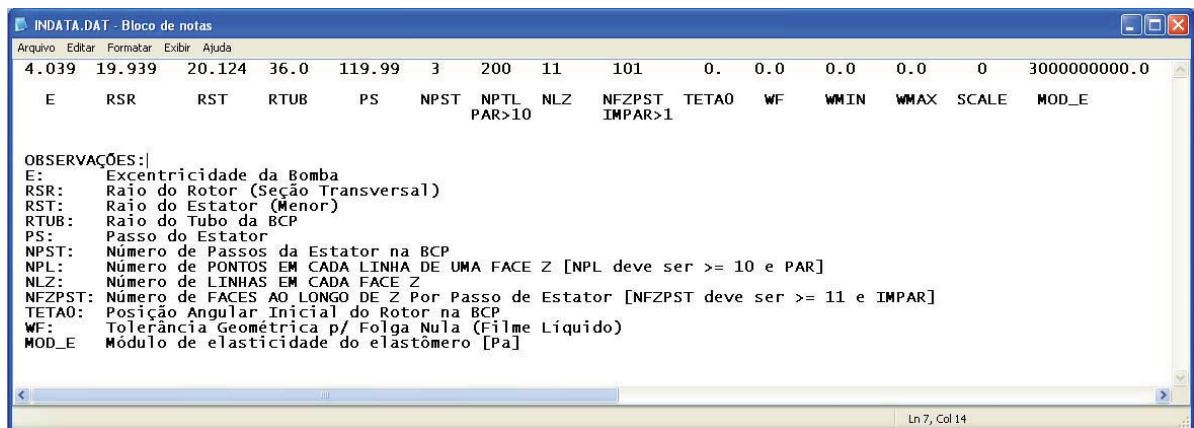


Figura 44: Arquivo INDATA

A forma de entrada do passo temporal está ilustrada na Tabela 5, de acordo com a rotação de operação do rotor e o número de passos de tempo utilizado para rotação por volta do rotor ( $N_{MESHT}$ ). Estes parâmetros também poderiam ser inseridos na interface, mas verificou-se posteriormente ser mais útil informar parâmetros operacionais diretamente no ambiente Pre do CFX.

Tabela 5: Características Numéricas da Malha Temporal Computacional

Número de Passos de Tempo por Rotação do Rotor	$N_{MESHT}$	420
<b>Cálculos</b>		
<b>Rotação</b>	<b>Tempo para Rotor Efetuar uma Rotação/Volta</b>	<b>Passo de Tempo</b>
<b>RPM</b>	$t_{volta}$	<b>dt</b>
100	0,6000	0,0014
200	0,3000	0,0007
300	0,2000	0,0005
400	0,1500	0,0004

A Figura 45 ilustra a tela de execução do programa **Malha\_BCP.F** que faz chamada às sub-rotinas da cinemática da BCP citadas anteriormente, para cálculo das malhas espacial e temporal de uma situação típica.

```

C:\Program Files\ANSYS Inc\v120\CFX\bin\cfx5solve.exe
DOMAIN: FLUIDO
***** MALHA BCP - LMC/DEM/UFRN *****
Time = 0.0052 [s] <---
NMesh = 420
TVolta = 0.2000 [s]
TStep = 0.0005 [s]
NRot = 300.0000 [rpm]
Omega = 31.4159 [rad/s]

NPontosTotais = 440398
NElemntos BCP = 376488
NElem. Casca = 62748
NElem. FaceZ = 996
NPontos/FaceZ = 1162
NPontos/Linha = 166
NLinhas/FaceZ = 7
NFacesZ/PST = 127
NFacesZ TOT = 379
Delta Gama = 2.1687 [graus]
Alf = 68.1289 [graus]
Bet = 21.8711 [graus]
Razao Angular = 3
NPontos Circ = 112
NPontos Reta = 54
Fator Malha = 0.0000

--> BCP FOLGA : Z&W = 0.000E+00 0.185E+00
***** JALIMA - LMC/DEM/UFRN *****

```

Figura 45: Tela de Execução do Programa

Os cálculos dos parâmetros da malha espacial e temporal foram efetuados em função das equações 4.1 a 4.9 relacionadas à abaixo. A nomenclatura destes parâmetros pode ser encontrada nas Tabela 4.

Pontos:

$$NPT_{FZ} = NL_Z * NPT_L \quad (4.36)$$

$$NFZ_{TOT} = NPST * NFZ_{PST} - (NPST - 1) \quad (4.37)$$

$$NPT_{TOT} = NPT_{FZ} * NFZ_{TOT} \quad (4.38)$$

Elementos:

$$NEL = NPST * [(NL_Z - 1) * NPT_L * (NFZ_{PST} - 1)] \quad (4.39)$$

$$NEL_{CAS} = NPST * [NPT_L * (NFZ_{PST} - 1)] \quad (4.40)$$

$$NEL_{FZ} = (NL_Z - 1) * NPT_L \quad (4.41)$$

Tempo:

$$t_{volta} = \frac{60}{RPM} \quad [s] \quad (4.42)$$

$$dt = \frac{t_{volta}}{N_{MESHT}} \quad [s] \quad (4.43)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{60} RPM \quad [rad/s] \quad (4.44)$$

#### 4.4.3. Validação

Para validação do procedimento de geração das malhas computacionais e com o intuito de mostrar a eficiência do procedimento, nesta seção serão mostrados alguns resultados do modelo fluido-dinâmico.

Os resultados desenvolvidos por Pessoa (2009), que empregou a presente metodologia de geração de malha, foram comparados com os obtidos experimentalmente por Gamboa *et al.* (2002), que estudaram o comportamento dinâmico de BCPs metálicas sob diversas condições operacionais.

Os fluidos utilizados para esta comparação foram os mesmos usados por Gamboa et al. (2002), sendo selecionados e empregados na presente simulação apenas dois dos quatro fluidos usados pelos autores. As propriedades físicas de cada um destes fluidos estão relacionadas na Tabela 6.

Tabela 6: Características dos Fluidos. (Gamboa et al., 2002)

PROPRIEDADE	ÓLEO		ÁGUA
Massa Específica $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	868	885	1000
Viscosidade Dinâmica $\mu$ [Pa.s]	0,042 [42 cp]	0,481 [481 cp]	10 <sup>-3</sup> [1 cp]

A malha numérica espacial empregada na simulação possui as características mostradas na Tabela 4, já descrita anteriormente. Tal malha pode ser considerada representativa para as finalidades de validação do modelo computacional em relação aos dados experimentais. A discretização temporal, isto é, o passo de tempo empregado nas simulações, está ilustrado na Tabela 5, também descrita anteriormente.

As Figuras 46 a 48 ilustram uma comparação entre os resultados experimentais de (Gamboa et al., 2002) e os obtidos pela presente simulação, empregando-se a metodologia de malha descrita anteriormente, considerando dois óleos lubrificantes e a água, de (42x10<sup>-3</sup> Pa.s), (481x10<sup>-3</sup> Pa.s) e (1,0x10<sup>-3</sup> Pa.s), respectivamente. A comparação é efetuada para a vazão volumétrica, em metro cúbico por dia, como função do diferencial de pressão aplicado à BCP, em kPa, para as rotações do rotor de 100 rpm, 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm nos casos com óleos e para as rotações do rotor de 300 rpm e 400 rpm nos casos com água (Pessoa, 2009).



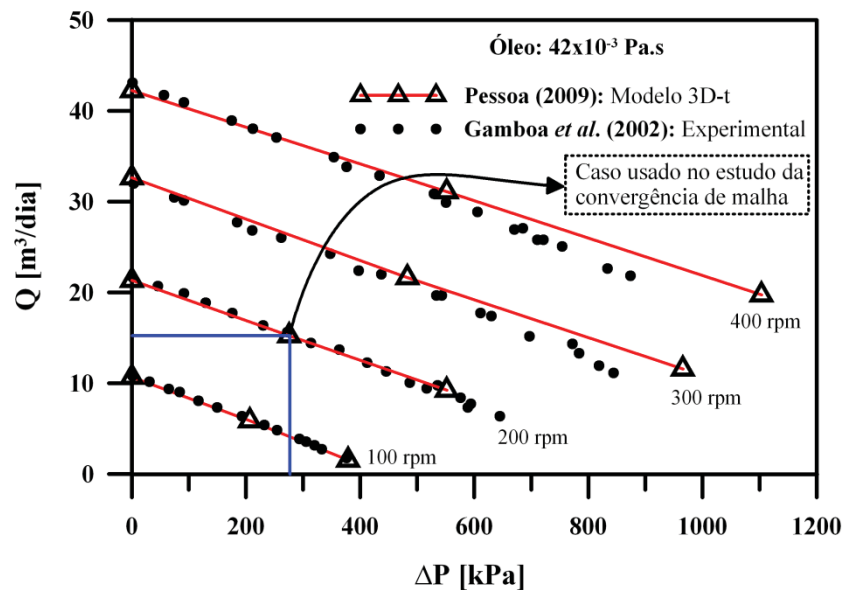


Figura 46: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão,  $Q \times \Delta P$ , ( $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s).

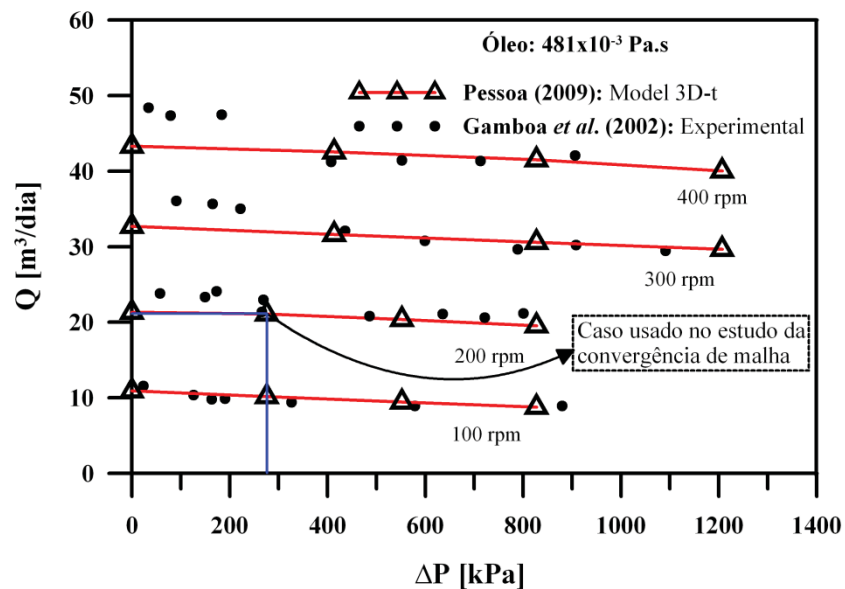


Figura 47: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão,  $Q \times \Delta P$ , ( $481,0 \times 10^{-3}$  Pa.s).

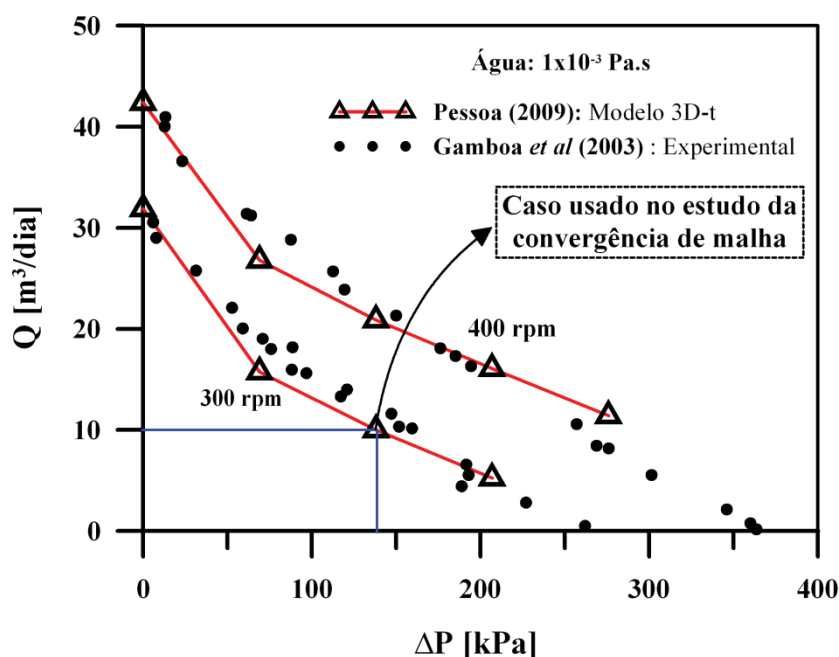


Figura 48: Validação Numérica para Vazão Volumétrica versus Gradiente de Pressão,  $Q \times \Delta P$ , ( $1 \times 10^{-3}$  Pa.s).

Como pode ser observada nessas figuras, a simulação reproduz adequadamente os resultados experimentais para as rotações e as viscosidades dinâmicas estudadas.

Dessa maneira, as simulações computacionais junto com as malhas numéricas computacionais estão, assim, devidamente validadas, mostrando o decaimento linear da vazão volumétrica com o diferencial total de pressão na bomba para uma BCP de estator rígido.

Em (Pessoa, 2009) esta simulação/validação é mostrada em maiores detalhes, inclusive com análises de convergência, estudo do refino de malhas e elaboração de um modelo simplificado calibrado com o presente modelo computacional 3D-t.

Entretanto, quase em sua totalidade, as bombas de cavidades progressivas empregadas na indústria de petróleo são compostas de estator elastomérico. Por isso, no capítulo seguinte será estudada a interação existente entre o escoamento do fluido e as deformações sofridas pelo elastômero, devido à pressão que o fluido impõe sobre a superfície interna do estator. Este fenômeno é denominado de Interação Fluido Estrutura – FSI (Fluid Structure Interaction).

---

---

# **CAPÍTULO 5**

---

---

## **INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA - FSI**

---

---

---

---

## INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA – FSI

As BCPs elastoméricas apresentam um fenômeno acoplado, que é observado na existência de uma forte ligação entre a dinâmica dos fluidos e a mecânica dos sólidos, denominado de Interação Fluido-Estrutura ou, no inglês, “*Fluid-Structure Interaction (FSI)*”. Outros fenômenos classificados como acoplados são: problemas envolvendo sólidos heterogêneos, interação solo-estrutura, poro-elasticidade e poro-plasticidade (Zienkiewicz e Taylor, 2000).

### 5.1. Caracterização do elastômero

Como primeiro passo para uma análise de interação fluido-estrutura (FSI), a caracterização do elastômero se faz necessário.

Com o apoio da Netzsch do Brasil (uma das maiores fabricantes de BCP da América), que é responsável pela produção e comercialização de Bombas de Cavidades Progressivas para as Américas (Norte, Central e Sul), foram realizados alguns testes experimentais em uma amostra de um dos elastômeros empregados na fabricação de BCPs, cujo polímero base é a borracha nitrílica (NBR), pelo laboratório americano **AXEL PRODUCTS INC.**, para a sua caracterização.

Os testes realizados pelo laboratório foram: teste de tração simples, compressão simples, compressibilidade volumétrica e alguns testes dinâmicos de relaxação. Embora nem todos os elastômeros empregados em BCPs possam ser caracterizados pelos resultados disponibilizados nessas amostras, o estudo a seguir demonstra a possibilidade da realização da simulação a partir do conhecimento constitutivo do elastômero.

As Figuras 49 a 52 ilustram as curvas médias obtidas a partir de vários testes realizados pelo laboratório, as quais serão utilizadas para a caracterização do elastômero a ser empregado como a nossa referência para a simulação estrutural. Os testes foram realizados sob uma temperatura controlada de 23 °C.

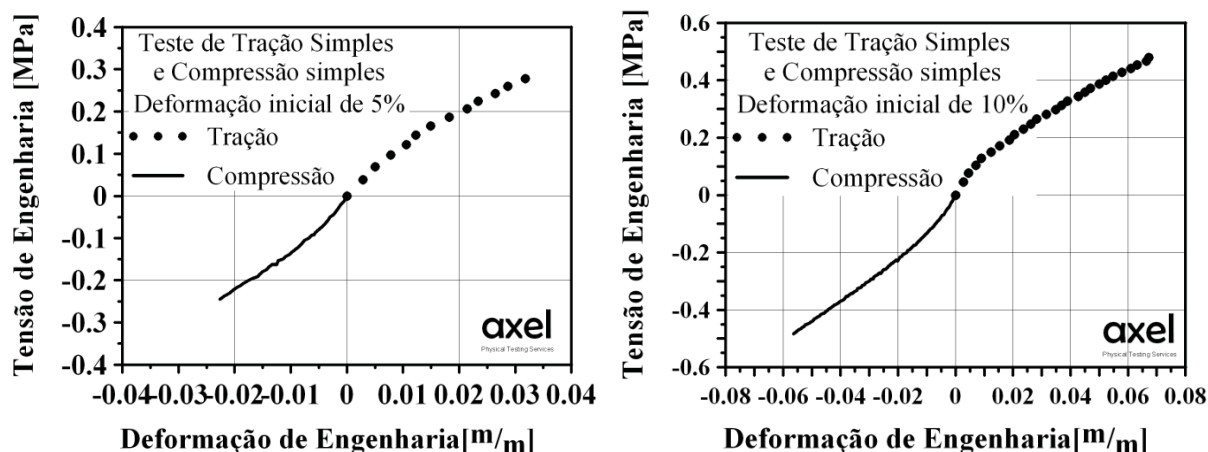


Figura 49: Teste de Tração/Compressão em Amostra com Deformação Inicial de 5 e 10% (Axel, 2008).

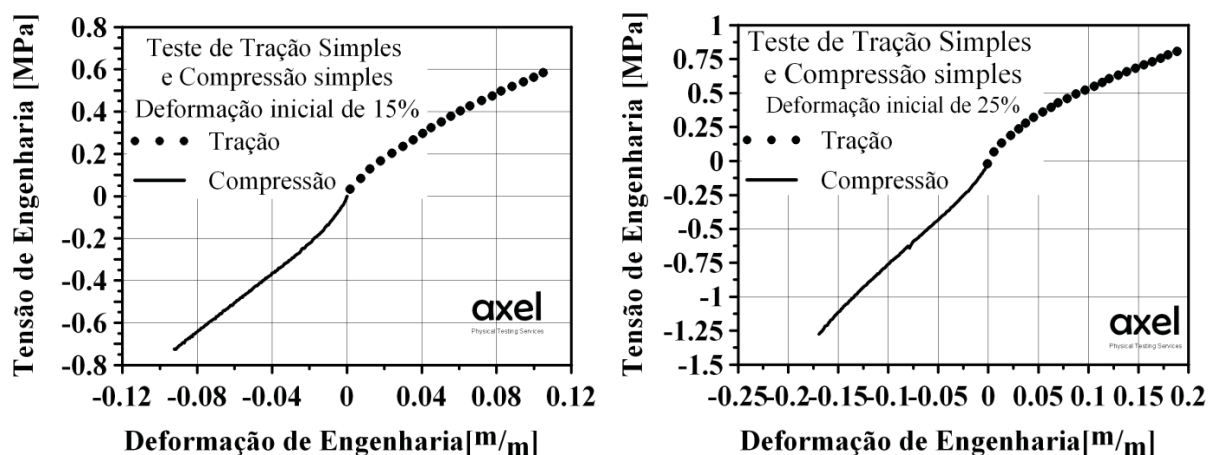


Figura 50: Teste de Tração/Compressão em Amostra com Deformação Inicial de 15 e 25% (Axel, 2008).

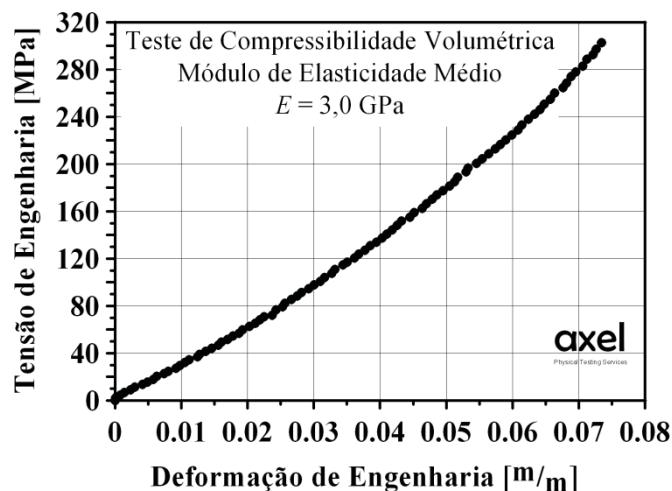


Figura 51: Teste de Compressibilidade Volumétrica (Axel, 2008).

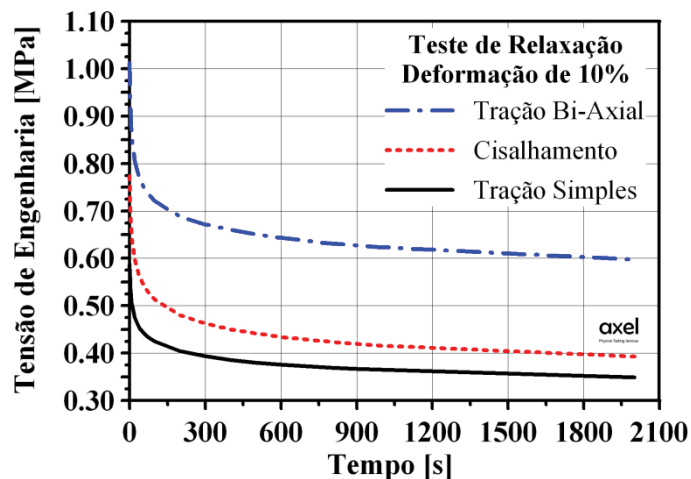


Figura 52: Testes de Relaxação em Amostras com Deformação inicial de 10% (Axel, 2008)

Após tratamento dos dados para eliminação de coordenadas repetidas, os mesmos foram introduzidos no ANSYS para obtenção dos coeficientes que melhor se ajustassem a algum modelo reológico de elastômero disponível neste *software*.

Segundo os ajustes realizados sobre os testes de tração simples, compressão simples e de compressibilidade (número mínimo para se poder caracterizar alguma hiperelasticidade), dos modelos hiperelásticos disponíveis, o modelo reológico que melhor se adequou às amostras elastoméricas estudadas pela NETZSCH foi o modelo de “*Yeoh de 3ª Ordem*” (ANSYS Tutorial, 2010; Axel, 2008), conforme pode ser constatado na Figura 53.

Para uma melhor caracterização constitutiva, recomenda-se que além dos testes citados anteriormente, sejam efetuados os ensaios de extensão bi-axial e o de cisalhamento, e em um número de vezes estatisticamente representativo.

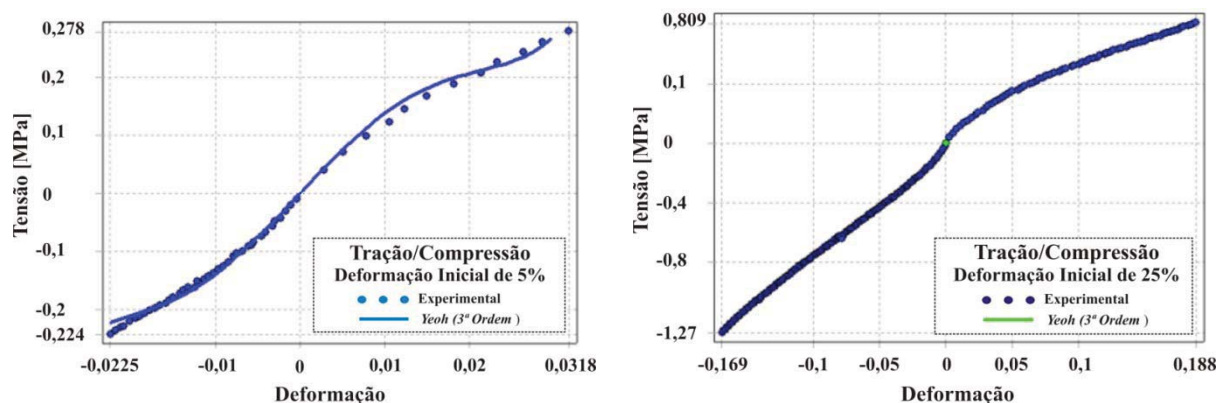


Figura 53: Ajuste dos Dados Experimentais para o Modelo *Yeoh de 3ª Ordem* no Módulo “*Engineering Data*” do ANSYS. Deformação Inicial: 5% e 25%. Temperatura: 23 °C.

O comportamento ilustrado anteriormente é representativo para situações em que o elastômero já se encontra deformado em 25%, isto é, grandes deformações iniciais.

O modelo reológico *Yeoh de 3ª Ordem*, que é aplicado para descrever o comportamento de uma borracha deformável (energia potencial de deformação) é descrito tensorialmente como:

$$W = \sum_{i=1}^n C_{i0} (\bar{I} - 3)^i + \sum_{k=1}^n \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (4.44)$$

onde:

$W$  é a energia potencial de deformação;

$\bar{I}$  é o primeiro invariante do tensor tensão ( $\bar{I} = T_{11} + T_{22} + T_{33}$ );

$J$  é o determinante do gradiente de deformação elástica ( $J = \det [F] = \frac{dV}{dV_0}$ ); e

$C_{i0}$  e  $D_k$  constantes definidas pelas propriedades do elastômero.

As constantes obtidas para o modelo ajustado de *Yeoh de 3ª Ordem* foram, considerando os testes com deformação inicial de 5% e 25%, respectivamente:

- Deformação Inicial: 5%

$$C_{10} = 2,5706 \text{ MPa}$$

$$C_{20} = -472,68 \text{ MPa}$$

$$C_{30} = 70339 \text{ MPa}$$

$$D_1 = 2,5748 \times 10^{-04} \text{ MPa}^{-1}$$

- Deformação Inicial: 25%

$$C_{10} = 1,5451 \text{ MPa}$$

$$C_{20} = -9.5209 \text{ MPa}$$

$$C_{30} = 48.409 \text{ MPa}$$

$$D_2 = -2.8104 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$$

$$D_3 = 9.2773 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$$

## 5.2. Análise da Interação Fluido-Estrutura

A interação fluido-estrutura está dividida em duas metodologias de soluções, a particionada (“one-way”) e a monolítica (“two-way”) (Teixeira e Awruch, 2005).

No método particionado as informações do escoamento fluem em uma única direção, possui uma abordagem mais simplificada, onde as equações governantes de cada fenômeno são integradas de forma desacoplada. Isto é, são obtidos os campos de pressão na interface (fluido-estrutura) da análise fluida, considerando que a estrutura não teve deformação, em seguida esta pressão na interface é utilizada, uma única vez, como a carga para o cálculo da deformação final da estrutura (Teixeira, 2001).

Já no método monolítico, as soluções das equações da análise fluida e da análise sólida ocorrem de forma acoplada. Isto é, estas equações são integradas simultaneamente no mesmo instante de tempo, considerando os efeitos do campo de pressão do fluido sobre a interface da estrutura e também os efeitos decorrentes da deformação estrutural sobre o campo de escoamento fluido, dentro de um “loop” iterativo (Teixeira, 2001).

### 5.2.1. Método particionado (“one-way”)

Este tipo de interação é considerado a mais simples, pois a troca de informações se dá apenas em uma direção, isto é, obtido o campo de pressão exercido pelo fluido na parede, este campo de pressão é usado como condição de contorno para a simulação estrutural. Após a simulação estrutural os campos de deformação e de tensões, desenvolvidas no elastômero são avaliadas em um pós-processador, mas não são utilizadas posteriormente, para uma nova análise fluidodinâmica.

Na Figura 54 é mostrado um fluxograma esquemático da dinâmica da interação “one-way”. A comunicação entre as análises é realizada através das superfícies onde ocorre a interação de ambos os modelos, obedecendo somente a um sentido, o da fluidodinâmica para a estrutural.

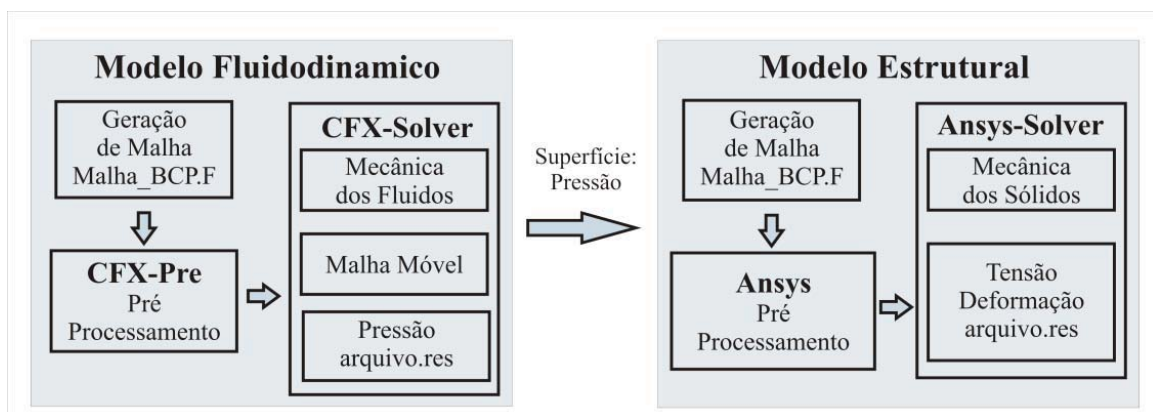


Figura 54: Fluxograma esquemático da interação unidirecional



---

Basicamente, existem duas maneiras de realizar uma interação fluido-estrutura utilizando os pacotes computacionais da *Ansys*. Na primeira, utiliza-se somente o módulo *Ansys-CFX*, onde a parte estrutural é desenvolvida através de movimentos prescritos da malha, que podem ser impostos por *CEL* (*CFX Expression Language*), “*Junction Box*” (descritos anteriormente no capítulo 3) e/ou por valores prescritos pré-definidos; na segunda maneira se utiliza-se do *Ansys-CFX* para a parte fluido dinâmica e o *ANSYS* para a parte estrutural, onde a comunicação entre estes módulos se dá através de exportação e importação automática de arquivos de entrada e saída, como foi relatado acima e esquematizado na Figura 54.

As figuras a seguir ilustram resultados relativos às deformações e tensões desenvolvidas no elastômero da BCP elastomérica com folga inicial de 0,185 mm. As simulações são efetuadas a partir do campo de pressões obtido no modelo fluidodinâmico para o instante de tempo em que o rotor perfaz uma volta em torno do seu eixo.

A Figura 55 ilustra as deformações totais sofridas pelo elastômero em um plano que corta a BCP longitudinalmente. De acordo com essa figura, e como era de se esperar as máximas deformações são desenvolvidas na extremidade final da bomba, onde a pressão é maior. A figura também revela que existe um acréscimo gradual de deformação desde a entrada da bomba até a sua saída (longitudinalmente), além das deformações radiais.

O mesmo padrão de comportamento é visualizado na Figura 56, agora representando as tensões principais de von Mises desenvolvidas no elastômero. A existência de uma deformação longitudinal no elastômero é confirmada pelos níveis de tensões entre cavidades adjacentes.

Pode-se supor que esse tipo de comportamento é mais acentuado em BCPs que possuem elastômero com espessura variável, pois, é exatamente nas regiões de maior espessura elastomérica que as deformações são mais elevadas e/ou ocorre uma maior fadiga por histerese. Tal suposição será futuramente explanada, quando toda a metodologia de simulação computacional estiver plenamente desenvolvida.

A Figura 57 ilustra numa escala ampliada o comportamento da componente longitudinal (direção  $z$ ) da deformação, confirma, através dos valores negativos dessa variável, que as deformações longitudinais realmente ocorrem no interior de uma BCP.

Finalmente, a Figura 58 ilustra a componente longitudinal ( $z$ ) da deformação em parte da superfície que caracteriza o estator.

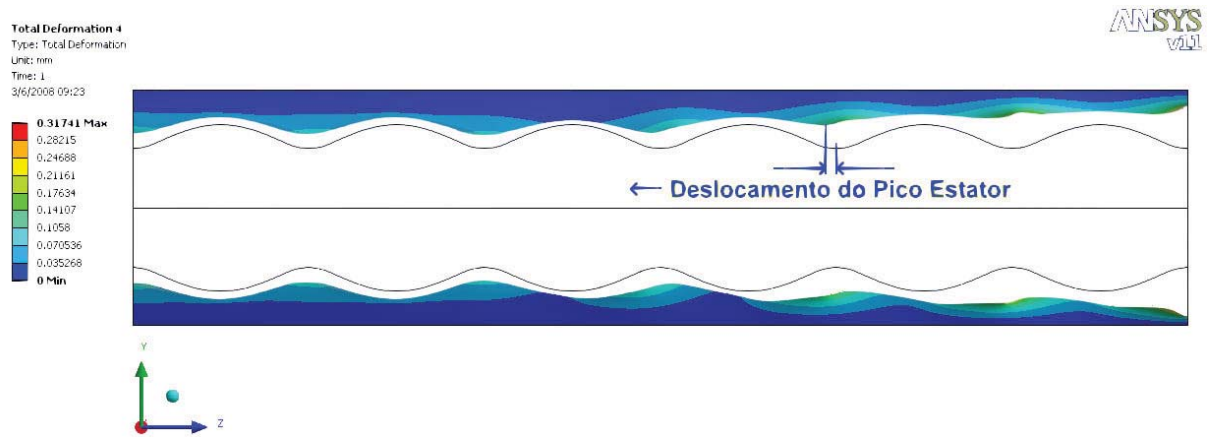


Figura 55: Campo de Deformações em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada)

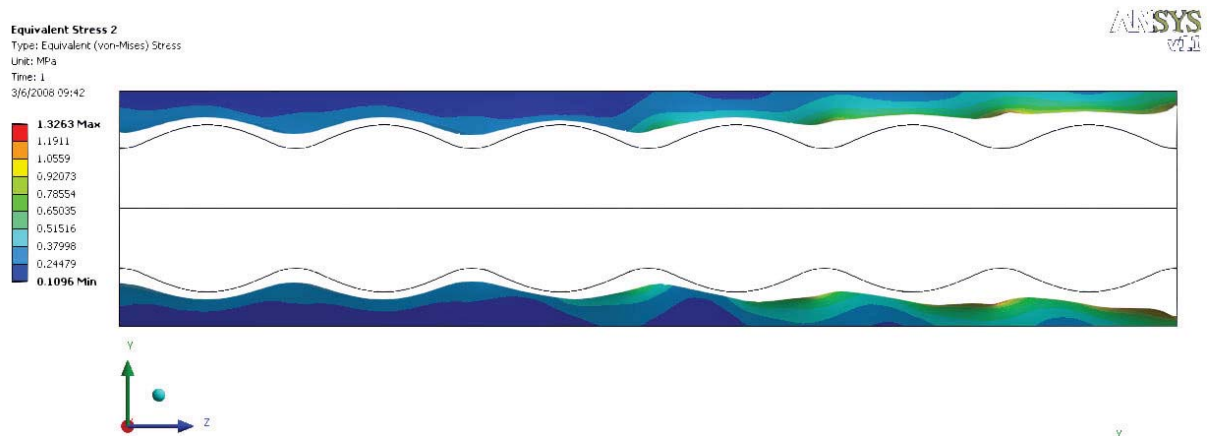


Figura 56: Campo de Tensões em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada)

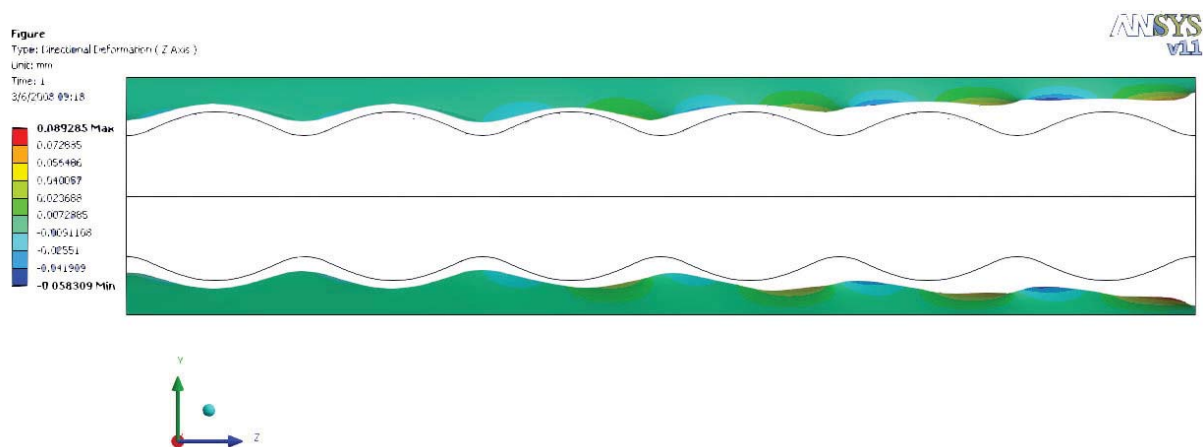


Figura 57: Componente Longitudinal de Deformação em um Plano Longitudinal da BCP (Escala Ampliada)

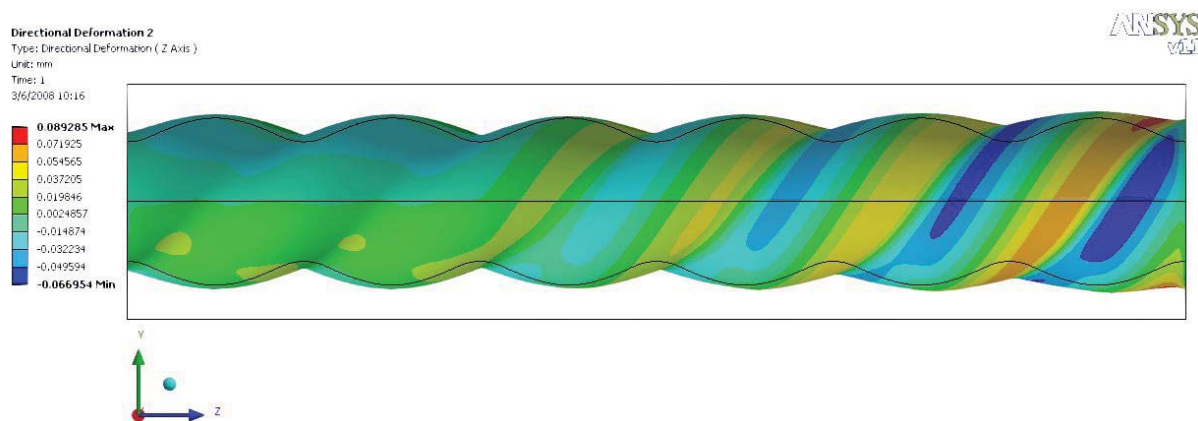


Figura 58: Componente Longitudinal de Deformação Longo da Superfície do Estator da BCP (Escala Ampliada)

Conforme pode ser visto, principalmente na região próximo à descarga da bomba, enquanto uma cavidade localizada acima do rotor apresenta deformações positivas, a outra cavidade, abaixo (ou do outro lado) do rotor apresenta deformações negativas. Esse tipo de padrão e deformação ilustra o quão complexas são as solicitações mecânicas no elastômero.

Também foi observado através destas figuras, que as deformações presentes na BCP são da ordem de grandeza de  $1,0 \times 10^{-1}$  mm. Essas deformações, apesar de visualmente desprezíveis, são da mesma ordem da folga empregada na BCP metálica analisada no capítulo anterior, e certamente, poderão influenciar no desempenho global da bomba.

Os resultados desenvolvidos através deste modelo abordam apenas de forma qualitativa, os efeitos presentes no complexo fenômeno de interação fluido-estrutura existentes na BCP. Portanto, não se pode atribuir quantitativamente os valores de deformação a uma redução da eficiência da bomba. Os efeitos da deformação do elastômero na eficiência volumétrica da bomba, só poderão ser sentidos através de um modelo de interação fluido-estrutura monolítica (“*two-way*”), mostrados nos itens a seguir.

### 5.2.2. Métodos monolíticos (“*two-way*”)

Neste tipo de interação, as físicas da análise fluidodinâmica e da estrutural estão totalmente acopladas no mesmo passo de tempo, trocando informações continuamente, através de um procedimento de comunicação entre as superfícies envolvidas diretamente na interação, as quais foram designadas anteriormente no pré-processamento. A sua principal

característica é o duplo sentido da solução, pois a solução da região fluida depende da solução da região estrutural como também a solução sólida depende da solução da região fluida. Essa interação se dá para cada passo de tempo até que ocorra a convergência de ambos os potenciais, e os potenciais gerados naquele passo de tempo serve como condição inicial para o passo de tempo posterior.

#### a. Interação “two-way” explícita

Em função da dificuldade intrínseca da interação “two way” implícita, como se verá posteriormente, foi utilizada uma alternativa de interação fluido-estrutura, neste trabalho denominada explícita, na qual, a partir do modelo “one-way” desenvolvido anteriormente, são capturadas as deformações radiais médias e em seguida gerada uma nova malha com a mesma topologia, apenas variando-se o raio do estator ao longo da coordenada longitudinal axial conforme a deformação causada pelo gradiente de pressão do fluido. Este processo pode ser executado uma única vez ou em mais de uma iteração, dependendo da influência da deformação sobre o escoamento.

Na Figura 59 é mostrado um fluxograma do processo, onde os modelos (fluidodinâmico e estrutural) são executados separadamente em instantes de tempo diferentes.

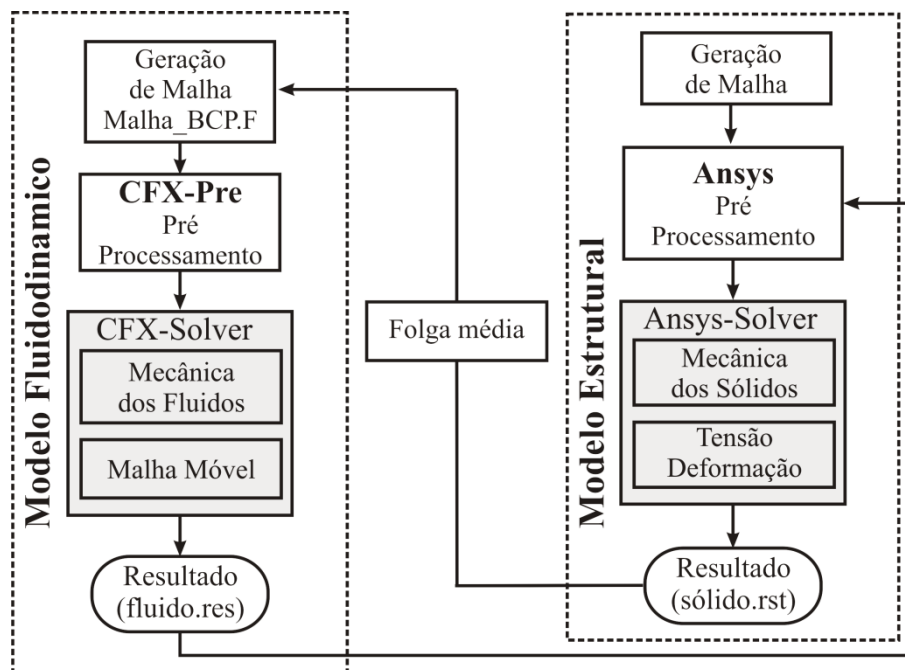


Figura 59: Fluxograma esquemático da interação “two-way” explícito

Nessa metodologia, as folgas são obtidas a partir do modelo estrutural real, em função do campo de pressões para uma determinada configuração inicial. Em seguida essas folgas, causadas pela deformação do elastômero, são somadas à configuração inicial para um novo cálculo hidrodinâmico. Esta abordagem pode também ser utilizada considerando interferência inicial ou até em casos com contato perfeito, devido à flexibilidade da metodologia desenvolvida que facilita a geração de malhas para todos estes casos.

Na Figura 60 é mostrado um gráfico comparando-se a pressão em cada cavidade (1,2,3,4,5 e 6) entre o modelo que utiliza folga constante (BCP metálica) e o modelo que utiliza FSI explícito para calcular a deformação do elastômero. Observa-se que o diferencial de pressão nas cavidades apresenta um comportamento não-linear ao longo da bomba, enquanto que para o caso com a folga constante, o comportamento é linear.

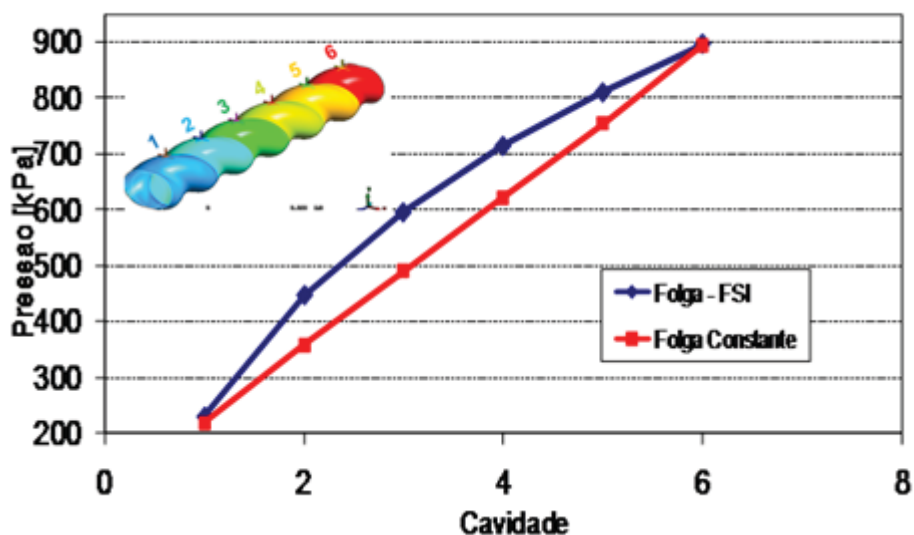


Figura 60: Perfil de pressão axial ao longo da bomba para folga constante e FSI-Explícito

Para o caso de uma BCP com folga inicial, (FSI explícito) a simulação assim efetuada mostra que as pressões desenvolvidas nas cavidades intermediárias são maiores do que as pressões para BCP metálica (sem FSI). Esse comportamento é visualizado na Figura 61.

Na bomba com folga, quando esta é provocada pela interação fluido-estrutura, uma maior pressão nas cavidades intermediárias é obtida quando comparada ao caso com folga constante, é percebido no perfil dinâmico ao longo do tempo, como é mostrado na Figura 61.

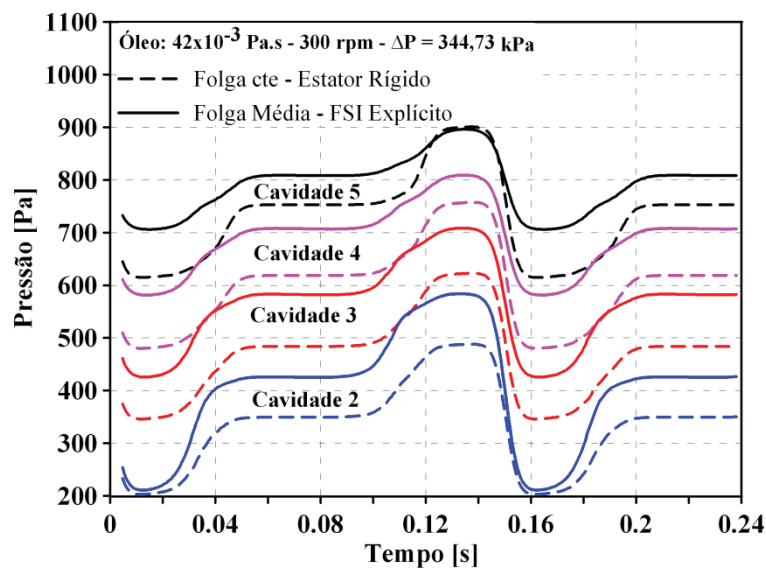


Figura 61: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para BCP metálica e FSI explícito ao longo do tempo

Na Figura 62 são comparadas as vazões em função do tempo, obtida pela presente metodologia, entre duas bombas, uma com estator rígido, com folga constante, e outra de estator deformável com folga variável, ambas apresentando a mesma folga inicial.

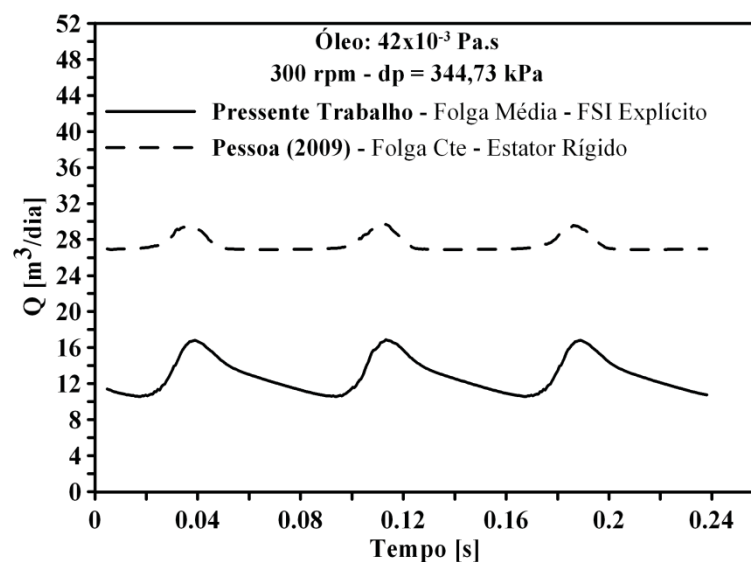


Figura 62: Comparação da vazão entre os casos com folga constante e modelo FSI explícito ao longo do tempo

Comparando as vazões dos dois casos percebe-se que para o caso com folga variável a vazão é inferior ao com folga constante, pois o primeiro apresenta uma menor selagem das cavidades, proporcionando uma menor eficiência da bomba. Isso se deve ao aumento da folga inicial devido a dinâmica do campo de pressão.

Apesar de ser uma alternativa na avaliação dos efeitos da deformação no escoamento da bomba, esta metodologia não permite o acoplamento entre as equações governantes dos fenômenos, fluidodinâmico e estrutural, uma vez que, estas equações são resolvidas em “*loops*” de tempos distintos, isto é, a convergência das equações de um fenômeno não depende da convergência do outro.

#### b. Interação “*two-way*” implícito via *Ansys*

Para se avaliar a real influência da deformação, a comunicação entre a dinâmica fluido, desenvolvida no CFX, e a dinâmica estrutural, desenvolvida no ANSYS, deve ser tal que possibilite o total acoplamento das equações governantes dos dois fenômenos físicos.

Na Figura 63 está sendo mostrado um fluxograma esquemático da interação bidirecional. De maneira similar à interação unidirecional, utiliza-se uma superfície para onde serão transferidas as informações, sendo que nesse caso todas as informações são enviadas e recebidas automaticamente através de arquivos temporários geridos por cada “*software*” responsável.

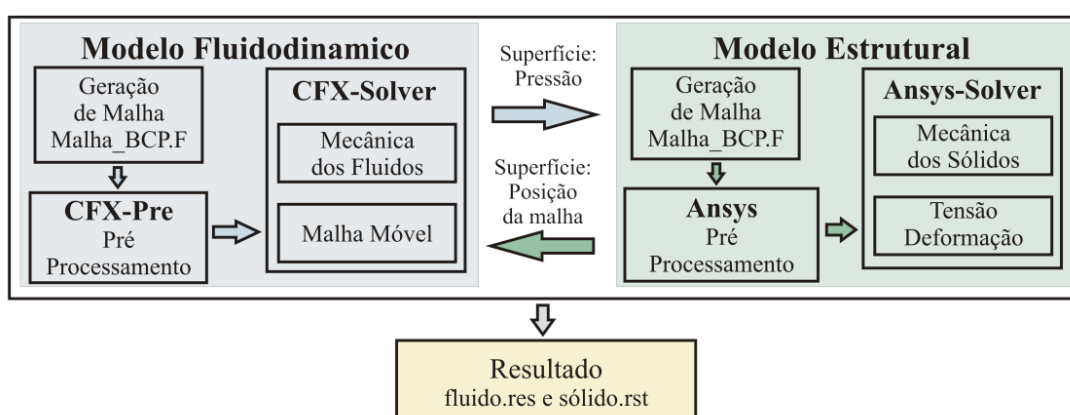


Figura 63: Fluxograma esquemático da interação “*two-way*” *Ansys*

Os resultados convergidos a cada campo são armazenados em arquivos finais com a extensão (.res) para o fluido e a (.rst) para o sólido.

Devido à alta complexidade no gerenciamento da superfície da malha deformada durante as interações no tempo, pois não se conseguiu ainda, introduzir a metodologia própria de geração de malhas no acoplamento total entre o CFX e o Ansys. Portanto, não foi possível desenvolver um modelo computacional que permitisse a resolução do problema de forma adequada. Entretanto, foi proposta um modelo alternativo de interação fluido-estrutura através de um acoplamento implícito simplificado, que será mostrado no próximo subitem.

### c. Interação “two-way” implícito simplificado

Em função da dificuldade do modelo FSI completo, foi proposto um modelo computacional alternativo de interação fluido-estrutura com acoplamento implícito entre o algoritmo da dinâmica dos fluidos e o algoritmo da análise estrutural. Neste modelo, a simplificação consiste em adotar um modelo elástico Hookeano para a deformação estrutural, além de que apenas deformações radiais são levadas em consideração.

Pela hipótese de modelo linearmente elástico não se fez necessário a utilização de um “software” para a análise estrutural, mas apenas inserir através de Fortran uma sub-rotina no próprio CFX que avalie tais deformações. Assim, são capturadas as pressões atuantes na superfície interna do estator, proveniente da análise da dinâmica dos fluidos, e as respectivas coordenadas dos pontos da superfície interna e externa do estator (pontos  $P_2$  e  $P_3$ , respectivamente, da Figura 64), a deformação radial é imposta na malha do domínio fluido, através da mesma topologia utilizada para geração da malha inicial, em cada “fatia” (plano transversal) na direção axial.

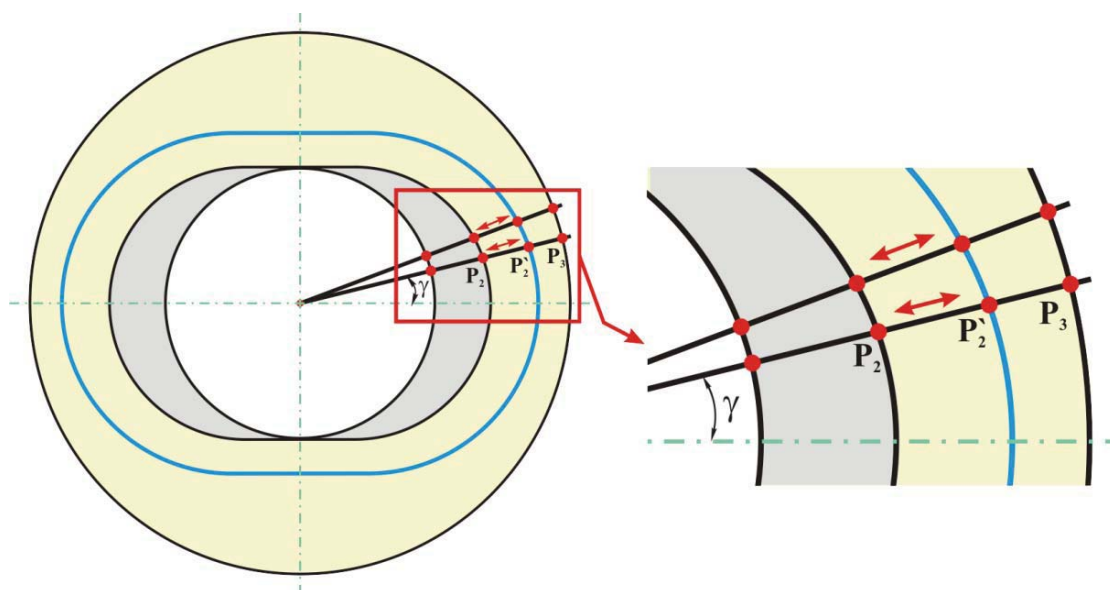


Figura 64: Deformação radial em cada plano transversal da BCP, modelo implícito



O cálculo da deformação do elastômero é efetuado em função das equações 5.1 a 5.8. Estas equações são acopladas ao CFX via sub-rotina em Fortran denominada de “Elast” sendo resolvida no mesmo instante iterativo da solução fluida, carregada dentro do “loop” do coeficiente, que atualiza a matriz de coeficientes devido à não linearidade das equações dentro do passo temporal.

Também é mostrado nesta figura a representação do deslocamento dos pontos da superfície que sofre deformação, representados pelos pontos  $P_2$ , para o ponto sem deformação e  $P'_2$ , para o ponto deformado, seguindo o ângulo  $\gamma$ .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta L}{L} \quad (5.3)$$

Da Figura 64, o comprimento  $L$ /distância entre a superfície interna do estator e a superfície externa do estator sob uma reta de inclinação angular  $\gamma$  é dado inicialmente por:

$$L = \sqrt{(X_{P_3} - X_{P_2})^2 + (Y_{P_3} - Y_{P_2})^2} \quad (5.4)$$

Agora denominado de  $dP$  a diferença de pressão em um ponto  $(x_i, y_i)$  entre as iterações  $k$  e  $k-1$  para o mesmo instante de tempo:

$$dP = P_{i,j}^k - P_{i,j}^{k-1} \quad (5.5)$$

A deformação sofrida por tal aresta será:

$$\delta L = \frac{dP}{E} L \quad (5.6)$$

De maneira que as novas coordenadas da linha/malha deformada serão:

$$X_{P_2}^k = X_{P_2}^{k-1} + \delta L \operatorname{sen} \gamma \quad (5.7)$$

$$Y_{P_2}^k = Y_{P_2}^{k-1} + \delta L \operatorname{cos} \gamma \quad (5.8)$$

Essas coordenadas são iterativa e automaticamente avaliadas até a convergência dos potenciais de escoamento e estrutural para cada passo de tempo.

Na Figura 65 está sendo mostrado o fluxograma esquemático desta interação entre as sub-rotinas de geração de malha, utilizada pela solução fluida, e a sub-rotina responsável pelo modelo estrutural.

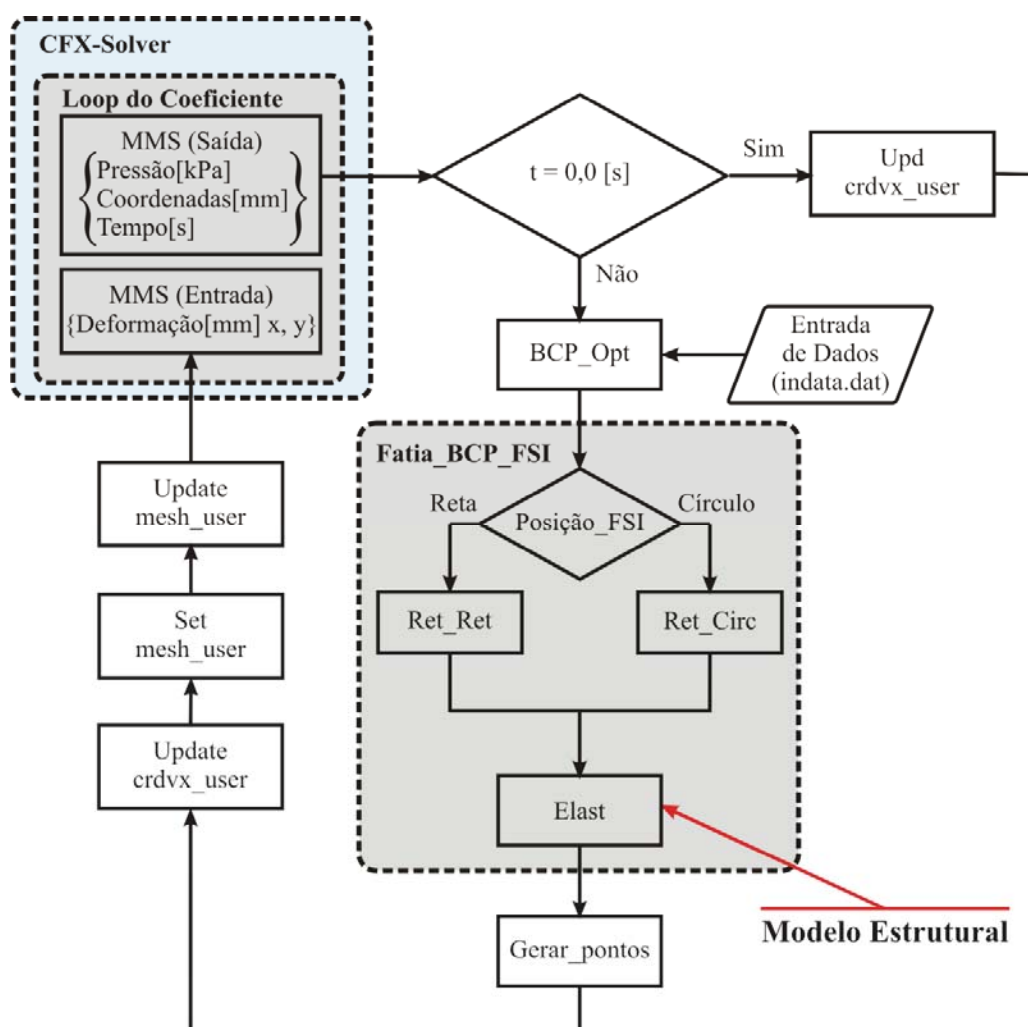


Figura 65: Fluxograma esquemático da interação “two-way” simplificado

Esta sub-rotina é responsável pelo cálculo da nova posição dos nós da malha para um determinado campo de pressão proveniente do campo do escoamento.

Inicialmente calcula-se o comprimento “L” através da equação 5.4, as coordenadas  $x$  e  $y$  dos pontos  $P_2$  e  $P_3$  que são utilizados nesta equação são capturados através do MMS (saída). No próximo passo é calculada a deformação linear ao longo da direção de “L”, sendo necessário o campo de pressão em cada nó exercida pelo fluido, que também é extraída via MMS e o módulo de elasticidade do material. De posse dessa deformação, pode-se então calcular as coordenadas  $x$  e  $y$  do ponto  $P'_2$ , utilizando a posição do ponto na configuração não deformada  $P_1$  mais a deformação aplicada na direção do ângulo  $\gamma$  (ângulo das linhas de base da geração da malha). Por último, as informações dos novos pontos são repassadas para a sub-rotina “Gerar\_pontos” para ser gerada a nova malha com a deformação da estrutura. Este processo é repetido até ocorrer à convergência do campo de pressão, isto é não haver mais alteração da pressão para o passo de tempo em execução, de maneira que o campo de deformação do elastômero também não apresente nenhuma diferença. Entende-se, assim, que não existindo mais diferença de pressão, não haverá também mais nenhuma deformação estrutural em “loops” distintos de iteração (equação 5.5) para o passo de tempo analisado.

A Figura 66 ilustra o comportamento da vazão com o diferencial de pressão da bomba, para um óleo com viscosidade dinâmica igual a  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s para rotações de 100rpm, 200rpm e 300 rpm e pressões de entrada ( $P_{in}$ ) de (206,84, 551,58 e 896,32 kPa). Os resultados desta etapa foram avaliados os efeitos da deformação a partir da BCP estudada por Pessoa (2009).

Nesta figura pode-se observar a influência da deformação do elastômero na vazão da bomba, sendo mais acentuada no caso com a maior pressão de entrada (896,32 kPa) e com maior rotação (300 rpm). Isto está relacionado a uma maior abertura da linha de selagem da bomba causada pela deformação do elastômero.

Também nesta figura, foram selecionadas duas regiões das curvas com aumento na escala, para possibilitar melhor visualização do efeito da deformação do elastômero na redução da vazão. Nas curvas para 300 rpm, no diferencial de pressão igual a 1.310 kPa, foi percebida a redução da vazão volumétrica para a maior pressão de entrada, de  $5,88 \text{ m}^3/\text{dia}$  para  $2,63 \text{ m}^3/\text{dia}$ , enquanto para o caso com 100 rpm e submetido ao diferencial de pressão de 379,21 kPa, a redução foi de  $2,00 \text{ m}^3/\text{dia}$  para  $1,54 \text{ m}^3/\text{dia}$ , representando uma redução de 55,3% e 23,0 % respectivamente.

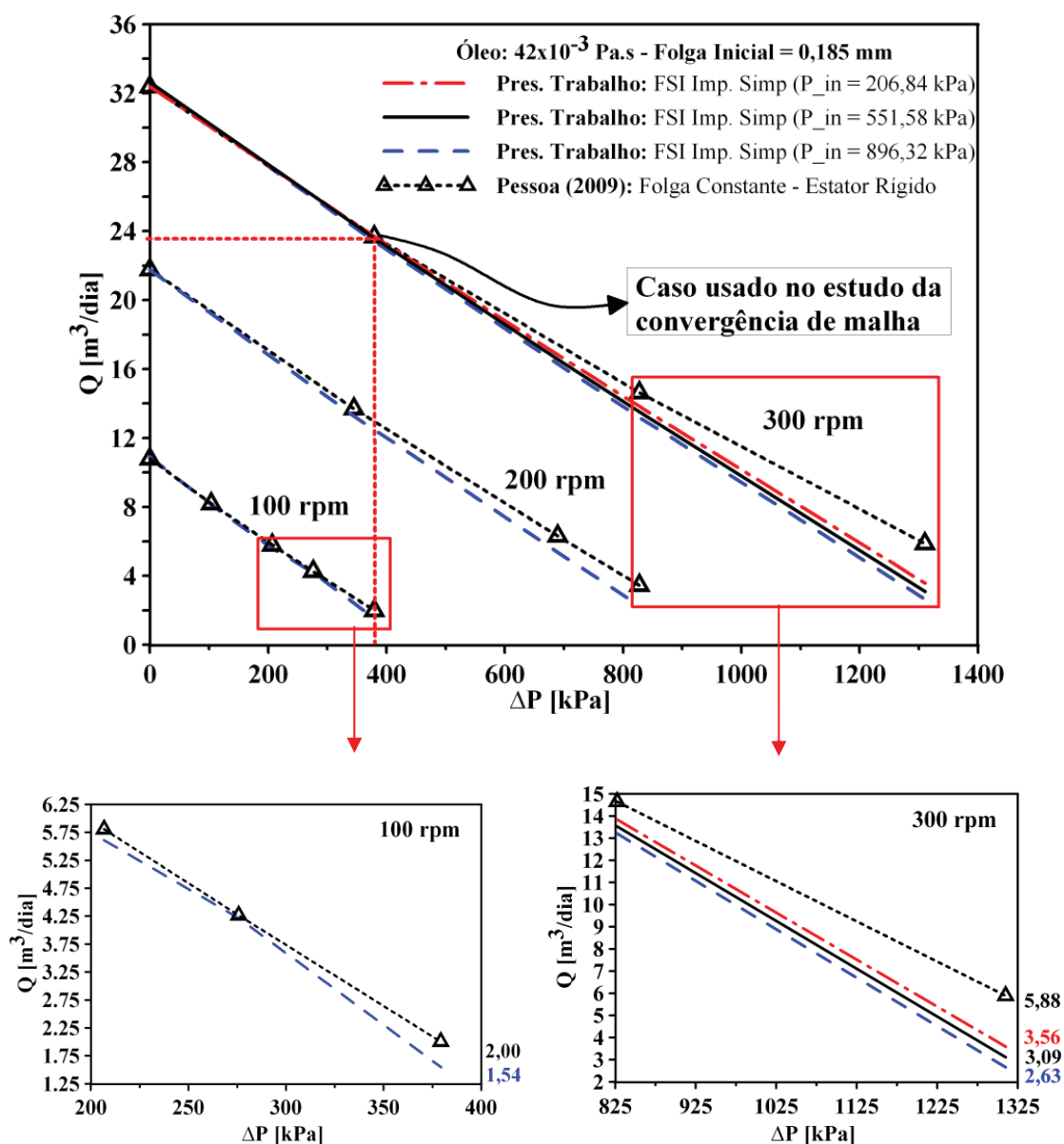


Figura 66: Comparação da vazão entre os casos com modelo, fluido dinâmico e experimental, com folga constante e folga FSI implícito simplificado, versus diferencial de pressão

A Figura 67 ilustra-se o comportamento da vazão com o tempo para um óleo de viscosidade  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s, pressão inicial de 896,32 kPa, rotação de 300 rpm e uma folga inicial de 0,185 mm. O resultado do modelo de interação fluido-estrutural foi comparado com o resultado do modelo fluidodinâmico para a BCP de estator metálico/rígido desenvolvido por Pessoa (2009).

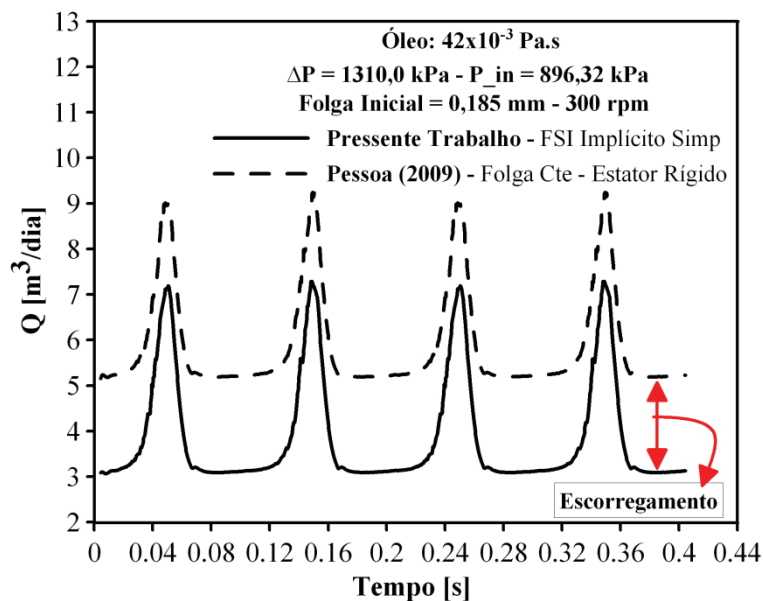


Figura 67: Comparação da vazão entre os casos com folga constante e modelo FSI implícito simplificado ao longo do tempo

De acordo com essa figura, observa-se que o modelo fluido-estrutural, apresenta uma vazão inferior ao modelo fluidodinâmico de folga constante, sendo a de escorregamento (escoamento reverso do fluido causado pela interação fluido-estrutural). Este comportamento é atribuído ao aumento da folga, ocasionado pela deformação do estator elastomérico em presença do campo de pressão.

Na Figura 68 são mostradas as pressões ao longo do tempo para as cavidades internas da bomba, isto é, desprezando as cavidades interligadas com as extremidades de sucção e descarga da bomba. Estas pressões são comparadas com as pressões do modelo fluidodinâmico com folga constante, observando-se que de maneira semelhante ao modelo “two-way” explícito, o modelo implícito simplificado também apresenta um campo de pressão de maior intensidade em fluidodinâmica do que obtido pelo modelo rígido.

Na região destacada na figura, o aumento na escala é necessário para uma melhor visualização da diferença das pressões para os casos comentados. Foram selecionadas as curvas das cavidades 3 e 4 da bomba durante um tempo equivalente a uma rotação do rotor.

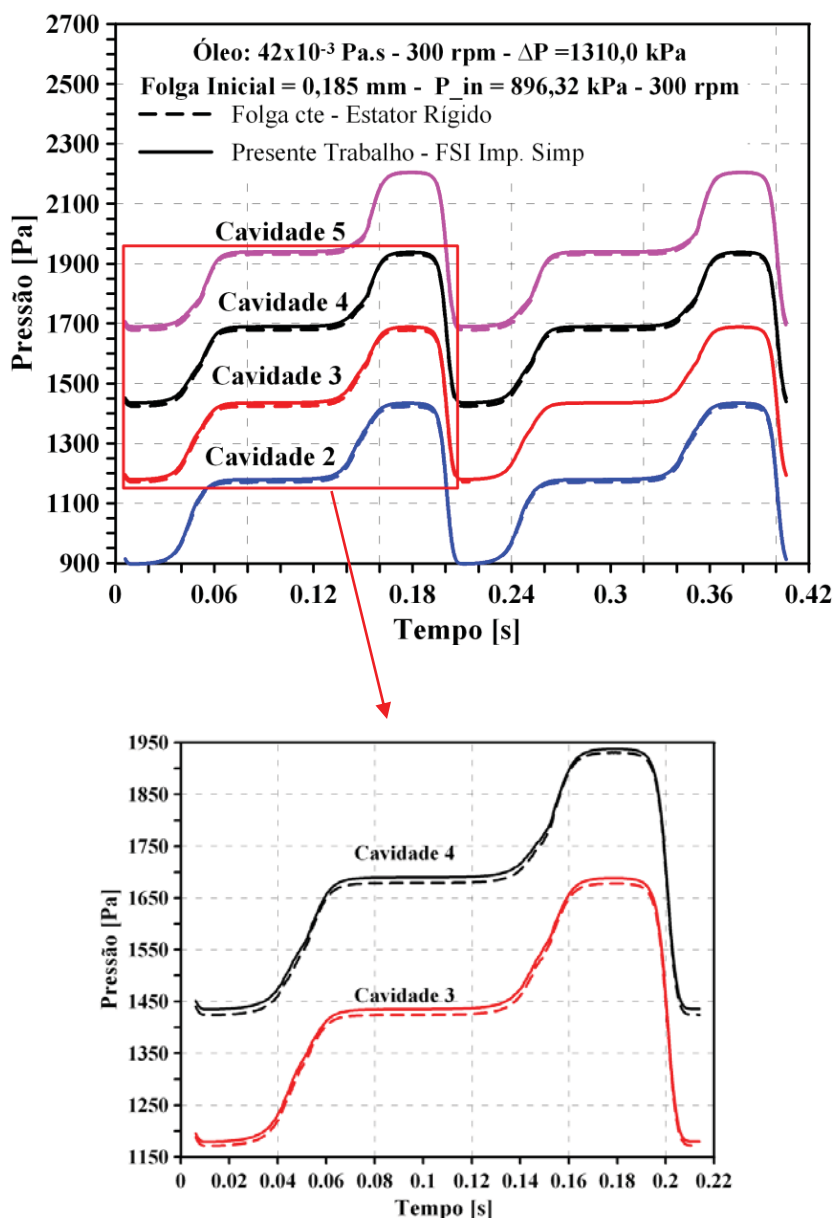


Figura 68: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito simplificado ao longo do tempo

A Figura 69 ilustra-se o comportamento da vazão com o diferencial de pressão da bomba, para um óleo com viscosidade dinâmica igual a  $481,0 \times 10^{-3}$  Pa.s para rotações de 300 rpm e 400 rpm e pressão de entrada ( $P_{in}$ ) de 896,32 kPa.

Nesta figura pode-se observar que, para viscosidades elevadas, o deslizamento é, pelo menos para a faixa de pressão empregada, quase desprezível, indicando que fluidos com viscosidades mais elevadas podem minimizar o efeito do escoamento reverso, causado pela abertura da linha de selo.

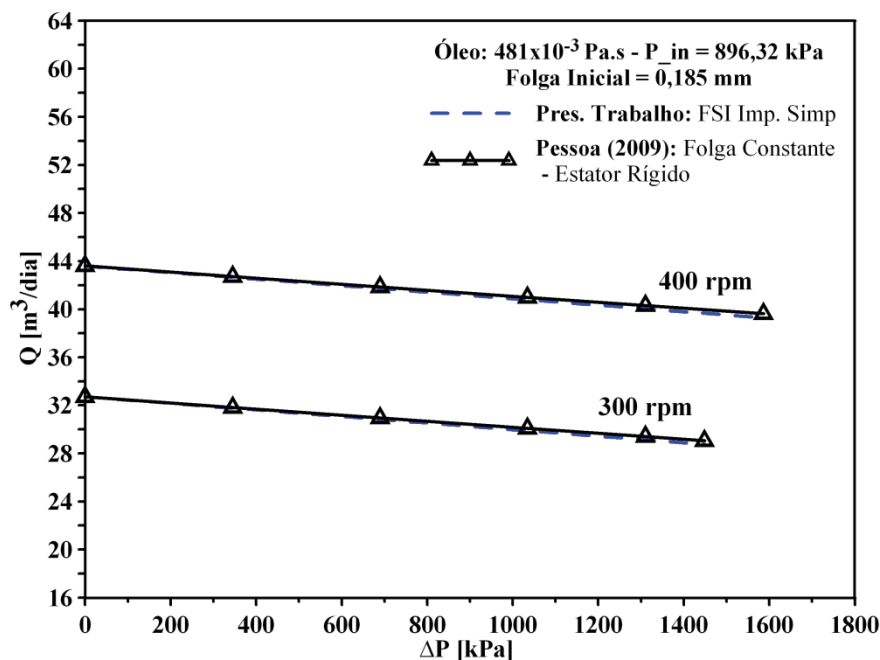


Figura 69: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito

A razão entre a vazão volumétrica produzida por uma BCP elastomérica/deformável pela vazão volumétrica produzida por uma BCP metálica/rígida é ilustrada na Figura 70, para os dois tipos de óleo analisados. Esta figura resume, de maneira mais direta, as observações traçadas anteriormente sobre a influência da viscosidade dinâmica do fluido no escorregamento/deslizamento em BCPs de estator deformável.

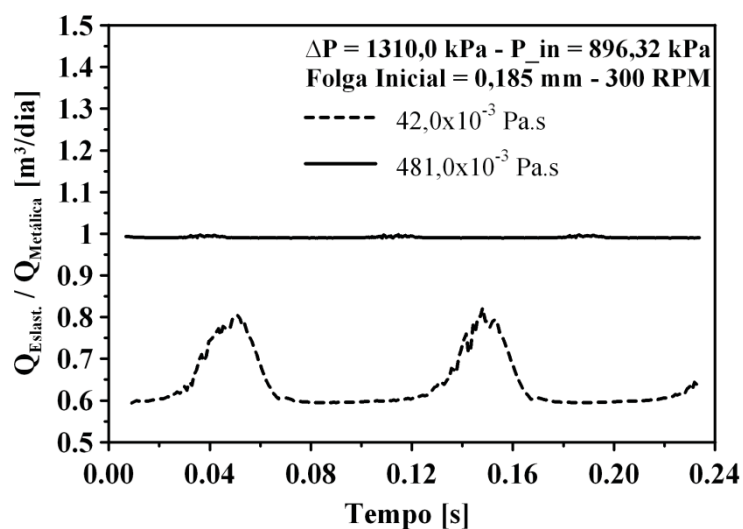


Figura 70: Perfil dinâmico da pressão nas cavidades 2 a 5 para folga constante e FSI implícito

Para auxiliar a visualização do local das medidas das variáveis que serão mostradas nas Figuras 72 a 77, a Figura 71 ilustra a posição das linhas de medidas ao longo da superfície do estator da bomba em relação a superfície do rotor, para as posições angulares  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ , indicando a formação total ou parcial da cavidade ao longo da BCP.

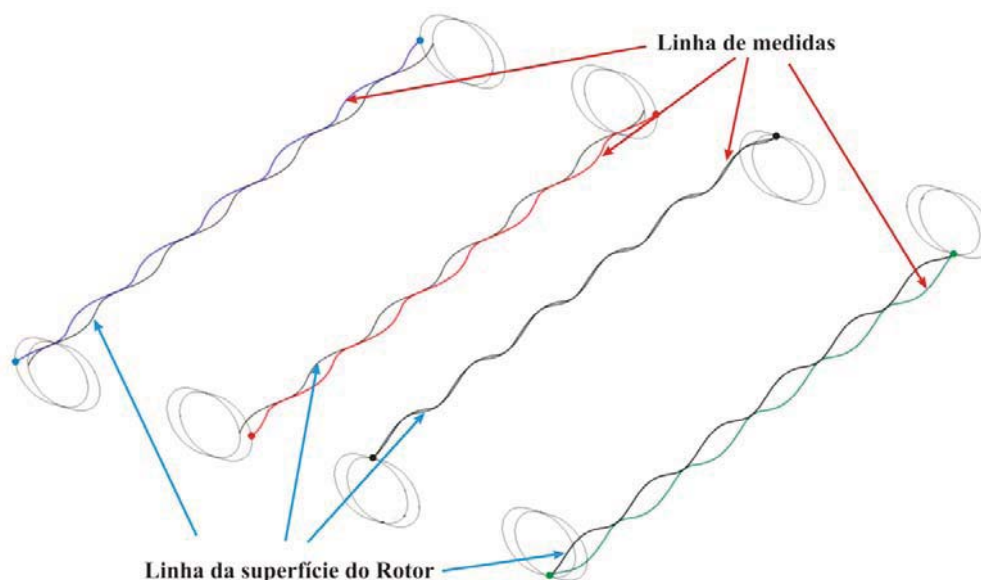


Figura 71: Linhas de medidas ao longo da coordenada  $z$  da BCP

A Figura 72, ilustra as deformações radiais ao longo de uma linha longitudinal da BCP, para diferentes pressões de entrada (206,84 kPa, 551,58 kPa e 896,32 kPa), óleo de viscosidade  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s, rotação de 300 rpm, folga inicial de 0,185 mm no instante tempo de  $4,7619 \times 10^{-4}$  s. É mostrada também nesta figura, a representação da superfície externa da BCP, ilustrando as regiões de maior espessura elastomérica e a linha de medida da variável, que inicia-se na face da região de sucção da bomba e segue uma curva imaginária sobre a superfície de interface entre a região fluida e a estrutura elastomérica, até a região de descarga da bomba localizada na posição máxima em  $z$ , como mostrado na Figura 71.

Observa-se que a maior redução da vazão para o caso com a pressão de entrada de 896,32 kPa em relação aos outros casos estudados, como foi mostrado na Figura 66, é ocasionado por uma maior abertura da linha de selo da bomba, isto é, aumento da folga na região de selagem entre as cavidade.

Para se mostrar que a deformação é função da posição angular da linha de medida da deformação, são mostradas, na Figura 73, as curvas de deformação para as três pressões de entrada versus posição longitudinal  $z$ , para uma posição angular de  $\theta = 90^\circ$ .



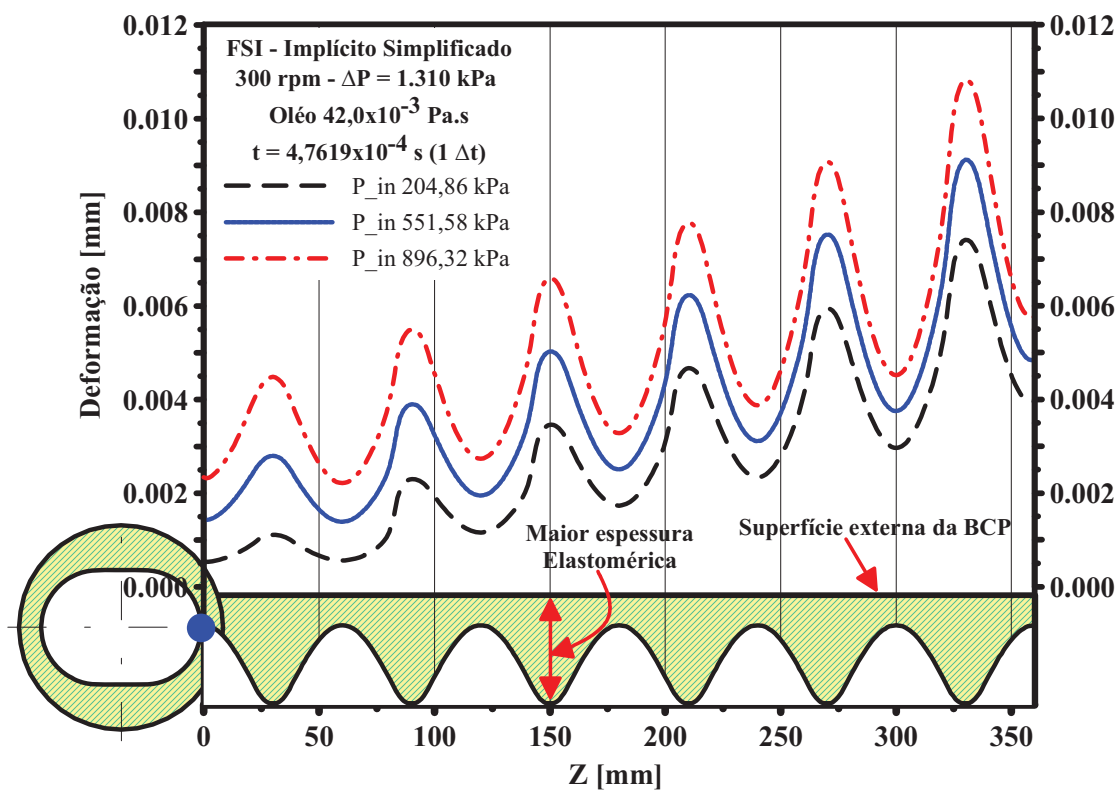


Figura 72: Perfil da deformação radial ao longo da coordenada  $z$  da bomba, em  $\theta = 0^\circ$ .

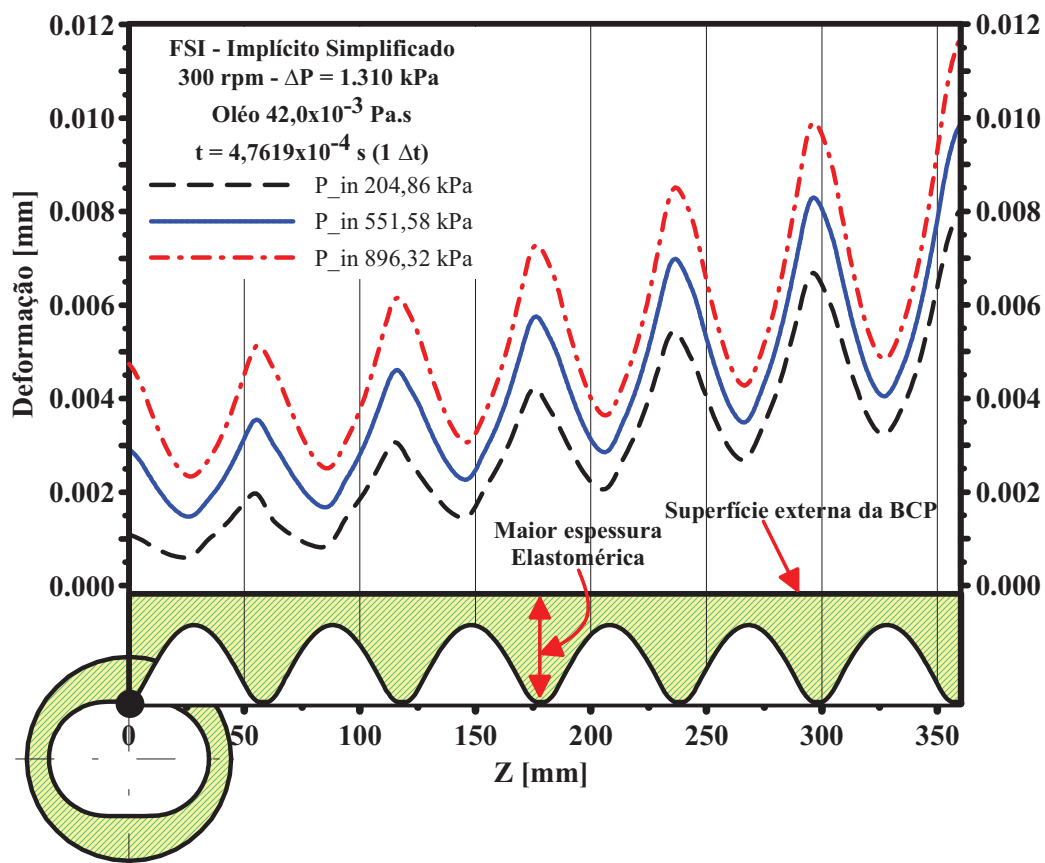


Figura 73: Perfil da deformação radial ao longo da coordenada  $z$  da bomba, em  $\theta = 90^\circ$ .

Pode-se observar da figura anterior que o comportamento da deformação ao longo da coordenada longitudinal  $z$  da bomba nesta posição angular, se assemelha ao mostrado na Figura 73, onde as maiores deformações são visualizadas na região de maior espessura elastomérica.

Na Figura 74, são mostradas as deformações, para as posições da linha de medida da deformação em  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ , submetido a um diferencial de pressão da 1.310 kPa e a uma pressão de entrada de 896,32 kPa.

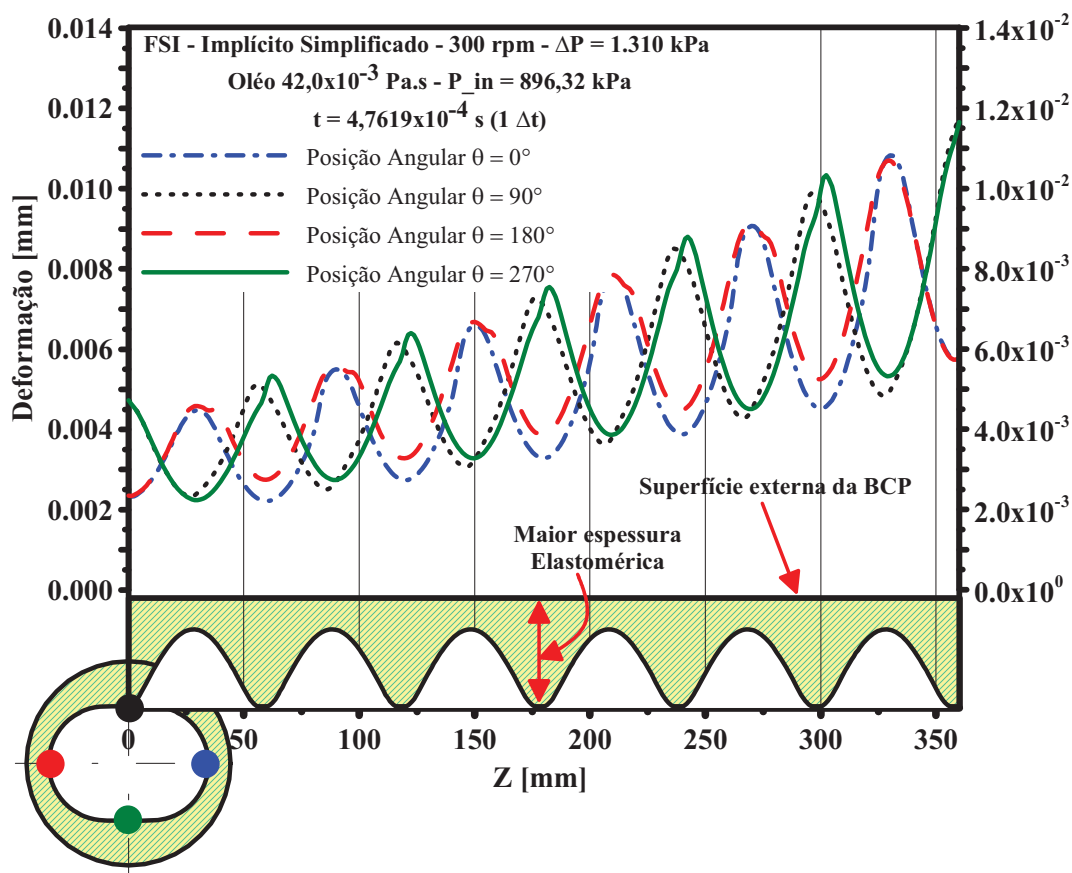


Figura 74: Comportamento da deformação radial ao longo de uma linha em cada posição longitudinal  $z$  da bomba, para a posição angular  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Da Figura 74, pode-se verificar que as maiores deformações ocorrem nas regiões de maior espessura elastomérica e são crescentes no sentido do escoamento (sentido crescente em  $z$ ), região de descarga da bomba, como foi visualizado também através do modelo de interação fluido-estrutura “one-way” relatado anteriormente.

O comportamento das pressões ao longo de uma linha longitudinal da BCP está ilustrada na Figura 75, para diferentes pressões de entrada (206,84 kPa, 551,58 kPa e 896,32 kPa), para um óleo de viscosidade  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s, e rotação de 300 rpm e uma folga inicial de 0,185 mm.

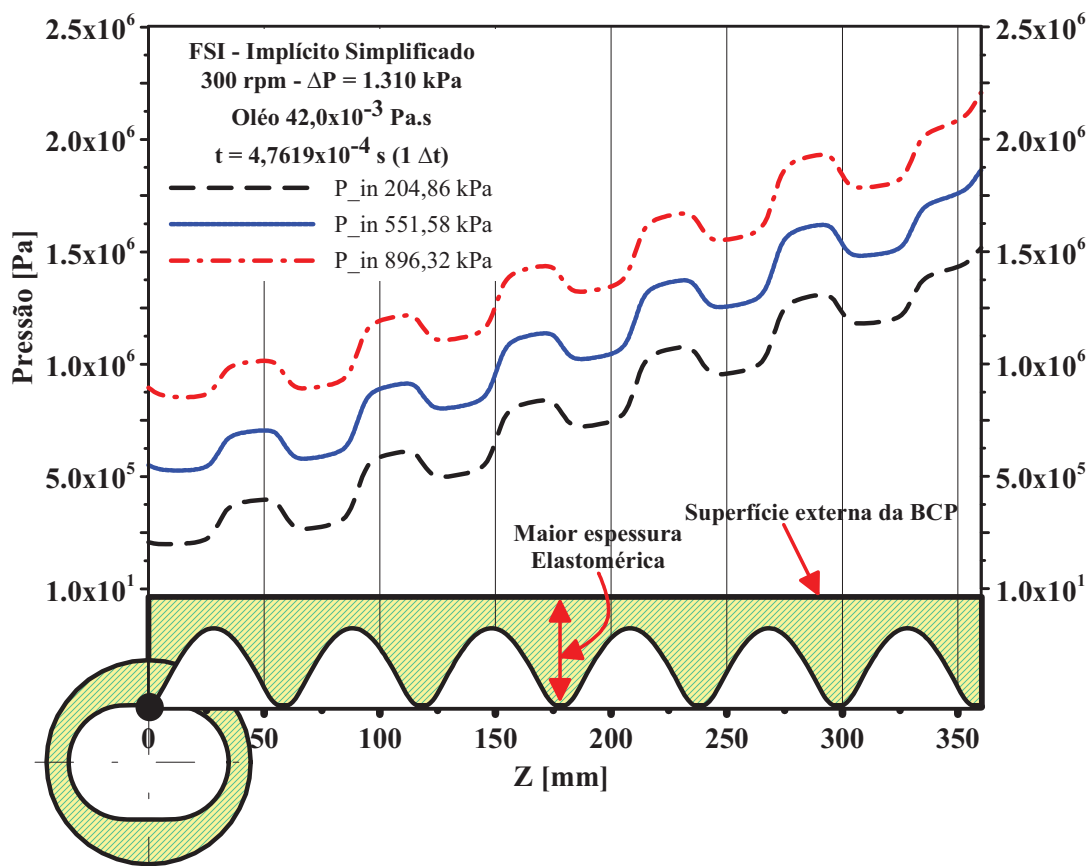


Figura 75: Comportamento da pressão ao longo de uma linha em cada posição longitudinal  $z$  da bomba, para a posição angular  $\theta = 90^\circ$ .

O comportamento pulsante da pressão é de forma semelhante o da deformação, embora não seja influenciado pelas diferentes espessuras e sim pelas cavidades formadas entre a superfície do rotor e a superfície do estator, como é mostrado na Figura 71.

Na Figura 76, são mostradas as curvas de pressão para as posições da linha de medida da pressão em  $\theta = 0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ , submetido a um diferencial de pressão da 1.310 kPa e a uma pressão de entrada de 896,32 kPa no instante  $4,7619 \times 10^{-4}$  s, submetido a uma rotação de 300 rpm e uma folga inicial de 0,185 mm, e também está sendo mostrada a representação da superfície da BCP.

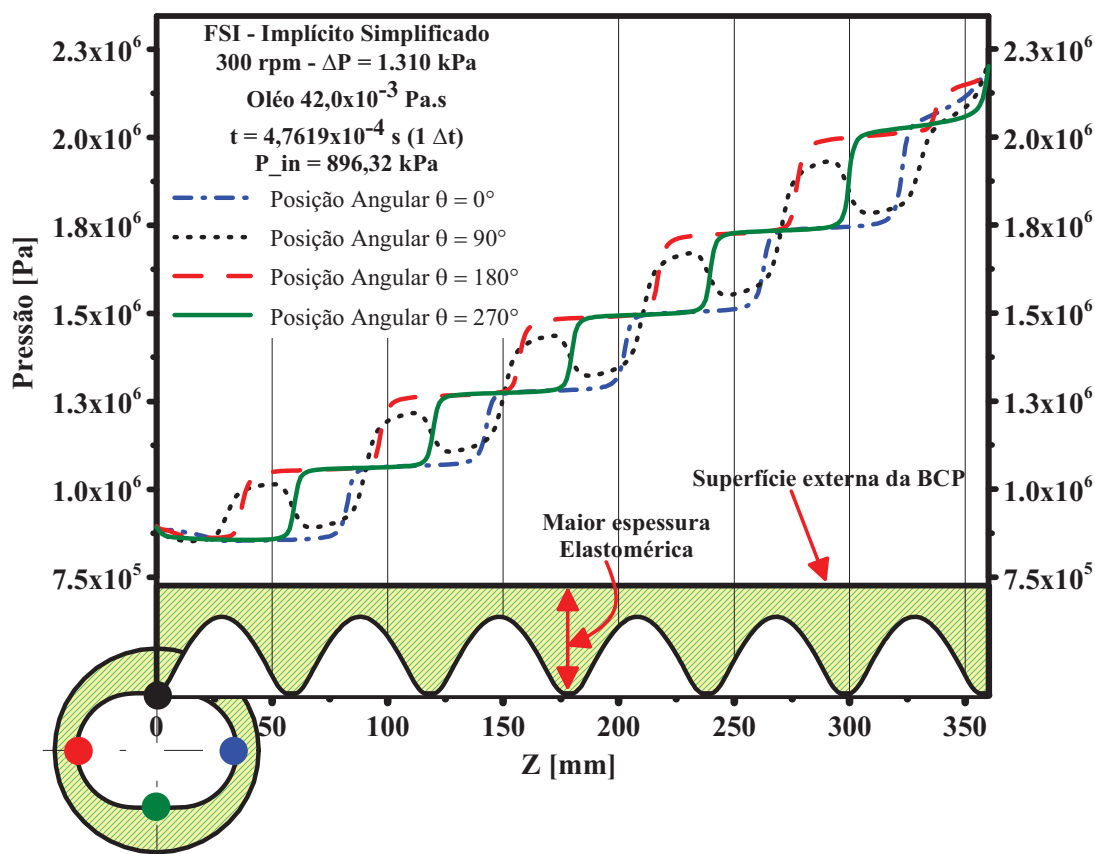


Figura 76: Comportamento da pressão ao longo de uma linha em cada posição longitudinal  $z$  da bomba, para as posições angulares  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Desta figura, observam os diferentes comportamentos do campo de pressão ao longo da bomba. Nas regiões de entrada e saída da bomba as pressões são iguais em todos os casos por estarem em contato com os contornos (entrada e saída) que se encontram à pressão definida como condição de contorno. As variações das pressões, existentes entre as curvas, são devido as posição das regiões de entrada e saída de cada cavidade formada de acordo com a posição do rotor no tempo citado, em relação ao bombeio, se o rotor está se afastando ou aproximando do ponto (Figura 71).

Na posição angular de  $\theta = 90^\circ$ , a linha de tomada de medida não corta nenhuma cavidade formada e sim a região de selagem transversal da bomba, explicando assim o comportamento pulsante da pressão. Enquanto isso, as outras linhas cortam as cavidades formadas, como é mostrado na Figura 71, explicando o comportamento na forma de degrau.

A comparação do comportamento das curvas de deformação e pressão é mostrada na Figura 77, para a posição da linha de medida em  $\theta = 0^\circ$ . Através desta figura observa-se que a curva do campo de deformação aumenta conforme o aumento da pressão, maiores no sentido do bombeio (direção positiva de  $z$ ), e o comportamento ondulatório da curva de deformação é devido a bomba apresentar regiões de diferentes espessuras elastoméricas.

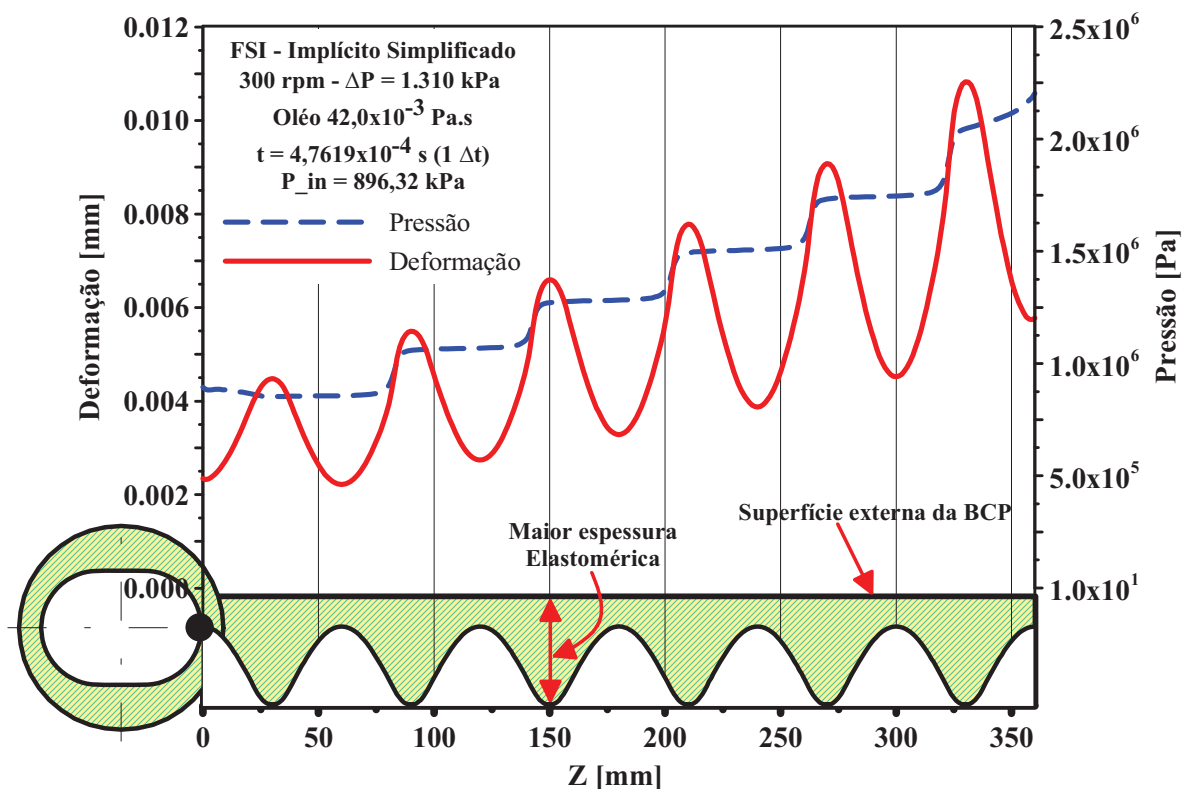


Figura 77: Comportamento da pressão e deformação radial ao longo de uma linha em cada posição longitudinal  $z$  da bomba, para a posição angular  $\theta = 0^\circ$ .

É visualizado também que a pressão aumenta em função do aumento da folga entre o rotor e o estator causada pela deformação do elastômero, esta dependência também foi percebida através da Figura 61 e do FSI explícito.

A Figura 78 ilustra a de convergência gráfica da vazão volumétrica em função do número de nós da malha, para o caso com óleo  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s, para um diferencial de pressão de 379,21 kPa (55 psi), para uma pressão inicial de 896,32 kPa (130 psi) e uma rotação de 300 RPM, mantendo uma razão de aspecto máxima de  $\sim 71,0$ .

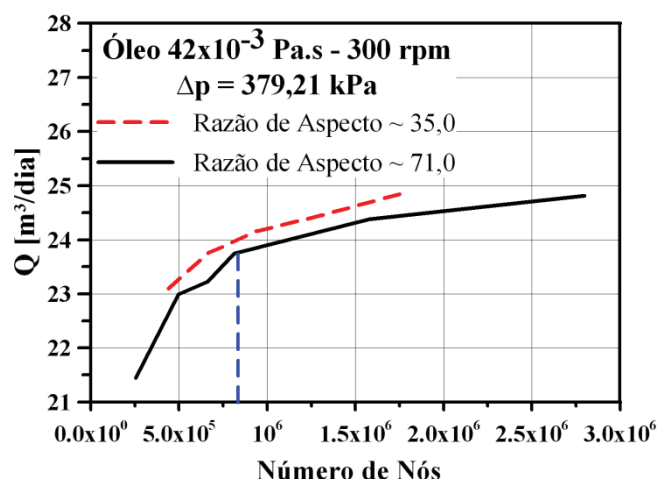


Figura 78: Análise de Convergência (vazão em função da razão do número de nós da malha), para as razões de aspecto máxima de  $\sim 71,0$  e  $\sim 35,0$ .

Desta figura, nota-se uma tendência de uma convergência para uma malha a partir de aproximadamente  $8,0 \times 10^5$  de nós, sendo mais acentuado na malha com raio de aspecto máximo de aproximadamente 71,0. As para malhas com a razão de aspecto de  $\sim 35,0$ , apresentou um leve aumento no valor da vazão. Pode-se atribuir a melhor convergência dos resultados, visto que, a razão de aspecto esta relacionada aos erros de arredondamento e associado também a dificuldades de convergência das equações discretizadas (Ansys,2010).

Na Figura 79 é mostrada a convergência gráfica da vazão versus a razão de aspecto máxima da malha, para o caso com óleo  $42,0 \times 10^{-3}$  Pa.s, para um diferencial de pressão de 379,21 kPa (55 psi), para uma pressão inicial de 896,32 kPa (130 psi) e uma rotação de 300 RPM, mantendo o número de nós da malha de  $665.020 \pm 0,34\%$ .

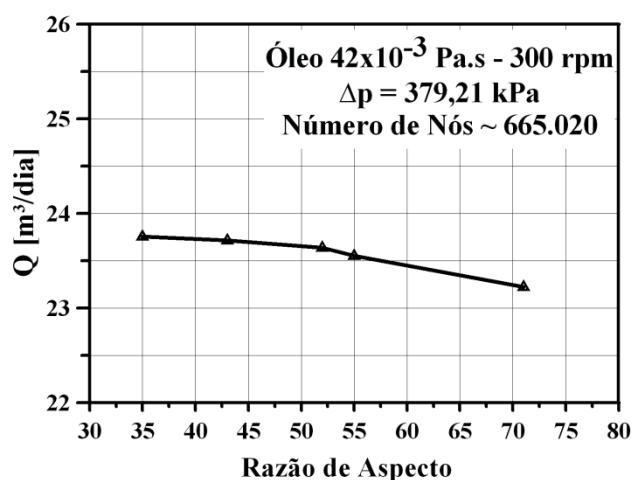


Figura 79: Análise de Convergência (vazão em função da razão de aspecto da malha), para um número de nós de  $\sim 665.020$ .

Através desta figura, pode-se observar uma tendência de convergência para uma razão de aspecto máxima em torno de 50, mas para malhas com razões de aspectos maiores ocorre uma redução da vazão calculada. Esta redução pode ser atribuída à falta de controle na razão de aspecto nas três direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Os campos de pressão na superfície da interface região fluida/superfície do elastômero do estator (interface fluido-estrutura), para as diferentes pressões de entrada e condições operacionais estudadas, citadas acima, estão sendo mostradas nas Figuras 80 a 82.

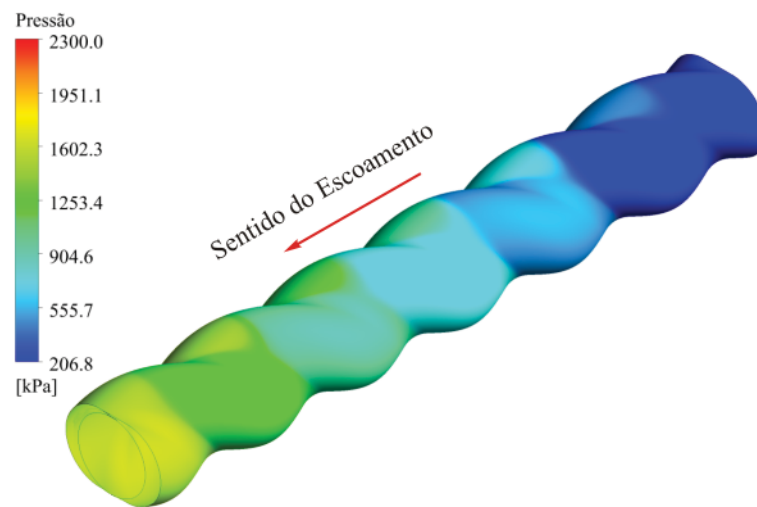


Figura 80: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 206,84 kPa.

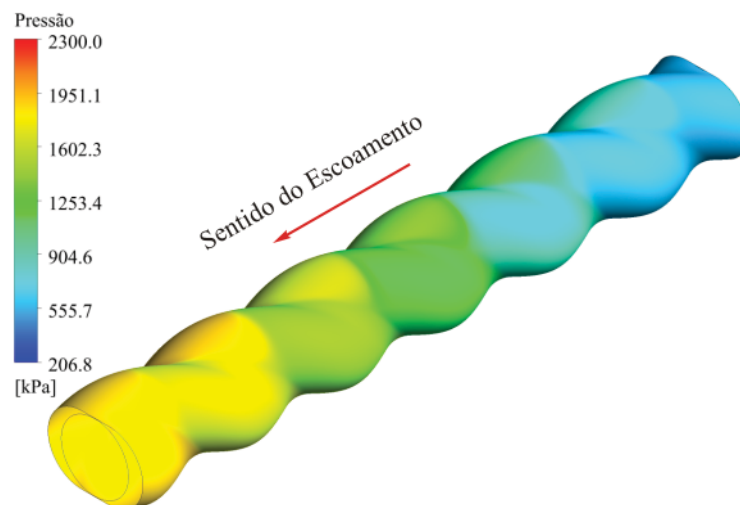


Figura 81: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 551,58 kPa

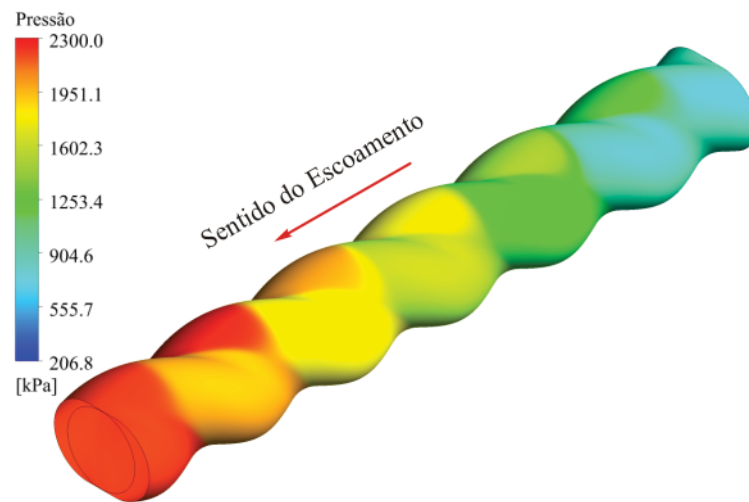


Figura 82: Campo de pressão na interface fluido-estrutura para pressão de entrada 896,32 kPa

De acordo com estas figuras, percebe-se facilmente a diferença entre os campos de pressão para os casos estudados, os quais são mais elevados em relação ao aumento da folga ou deformação do elastômero (ou, de outra maneira, pelo maior valor da pressão da entrada/sucção). Também, como esperado, e de acordo com a Figura 75, as maiores pressões estão associadas à região de descarga da bomba, enquanto que as menores estão associadas à região de sucção.



---

---

# **CAPÍTULO 6**

---

---

## **CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS**

---

---

---

## CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Foi desenvolvida, em linguagem Fortran 90, uma metodologia para geração de malhas computacionais estruturadas aplicadas à simulação fluidodinâmica e/ou fluido-estrutural no interior de bombas de cavidades progressivas (BCP), as quais representaram adequadamente a cinemática/dinâmica do rotor em relação à bomba. Nessa metodologia, os dados característicos da geometria e da malha são informados através de um arquivo de entrada ou, de modo mais automatizado, em um ambiente gráfico no formato de um “*software*” muito atrativo para usuário.

O emprego desta metodologia de geração de malhas possibilitou, assim, a validação do modelo fluidodinâmico para BCPs de estator rígido desenvolvido por Pessoa (2009). Também foi desenvolvido em linguagem Fortran 90, um modelo tridimensional transiente para análise da influência do campo de deformação no escoamento do fluido no interior de BCPs de estator elastomérico. Este modelo fornece, de maneira detalhada, a influência da deformação do estator no desempenho da bomba, sendo elaborado de maneira à complementar os trabalhos já desenvolvidos para BCPs metálicas.

Em razão das grandes dificuldades para realização de uma interação fluido-estrutura completa em BCPs rígidas e/ou deformáveis (geração de malhas computacionais que representassem a geometria, cinemática da bomba, deformação estrutural, entre outras), são descritas a seguir as observações/conclusões mais importantes sobre o desenvolvimento do presente trabalho:

- O modelo desenvolvido para geração de malhas, através da topologia de linhas radiais centradas na seção do estator junto a metodologia de geração via Fortran, foi bastante satisfatório, pois além de otimizar o tempo gasto nesta etapa, devido a não necessidade de geração do modelo sólido e a otimização do tempo gasto na leitura dos arquivos de malha, proporcionou a reprodução dos resultados experimentais desenvolvidos por Gamboa *et al.* (2002, 2003). Observando-se que estes mesmos autores atribuíam o não sucesso de reproduzir computacionalmente os seus resultados experimentais, à dificuldade de elaborar um processo adequado de geração de malhas.

- O primeiro modelo de interação fluido estrutura aplicado, de modo mais simplificado denominado “*one-way*”, possibilita efetuar de maneira qualitativa uma análise sobre os campos de tensão e deformação ao longo da bomba, para um determinado instante de tempo. Estes parâmetros estruturais permitem o entendimento de forma simples da variação da folga ao longo da BCP quando submetida a um campo de pressão, por não possuir um acoplamento das equações governantes de cada fenômeno físico no mesmo instante de tempo.

- Em um segundo modelo, foi proposta uma simulação FSI “*two-way*” de forma explícita, onde se percebeu que a deformação desenvolvida pelo campo de pressão do interior da bomba proporcionava uma distribuição não constante da folga, de maneira tal que o diferencial de pressão varia ao longo da bomba, apresentando um comportamento quadrático, enquanto para o caso com folga constante o comportamento linear.

- O modelo de interação fluido estrutura “*two-way*” implícito simplificado se baseia no emprego do modelo constitutivo Hookeano para a deformação, acoplado ao “*loop*” da solução das equações de Navier-Stokes, que governam o escoamento. Este modelo é capaz de fornecer informações do comportamento do campo de deformação elastomérica, para cada instante de tempo em qualquer ponto da região deformável da bomba. Deve-se lembrar que este campo é um dos principais fatores de influência no desempenho da BCP de estator deformável.

- Foi através do modelo implícito simplificado, que foi possível observar-se explícita e quantitativamente o efeito que a deformação do elastômero proporciona na diminuição da estanqueidade das cavidades, através da abertura da linha de selo. Tal efeito afeta fortemente a vazão da bomba, resultando na perda de eficiência do sistema de bombeio por cavidades progressivas.

- Do modelo “*two-way*” implícito simplificado, foi também possível visualizar, através das curvas de vazão volumétrica em função do comprimento da bomba (coordenada longitudinal  $z$ ), como a condição de contorno de pressão de entrada interfere no comportamento transiente da vazão média. Assim, para um mesmo gradiente de pressão na bomba, uma pressão maior na entrada produz um campo de deformação maior sob toda a bomba e, com isso, um maior escoamento reverso na bomba.

Em termos de propostas futuras, são deixadas algumas ações que não puderam ser realizadas durante o desenvolvimento do presente trabalho, as quais agregarão maior valor ao trabalho já desenvolvido.

Uma das principais proposições diz respeito à geração de malhas cujos pontos (todos, sob o rotor e sob o estator) são obtidos através de uma topologia que utiliza linhas de base radiais, móveis, centradas na seção do rotor. Em função de todo o estudo desenvolvido no presente trabalho, vislumbra-se que tal topologia pode ser tornar a ótima, em razão da redução das fortes distorções angulares e lineares introduzidas pelas topologias anteriores. Além disso, tal topologia não apresenta nenhuma restrição geométrica, como apresentou a melhor topologia até o momento desenvolvida e empregada para obtenção dos resultados.

Para essa topologia, os pontos sobre a aresta do rotor são sempre os mesmos em relação ao rotor, embora sejam móveis devido ao movimento do rotor, enquanto os pontos sobre a aresta do estator são diferentes, acompanhando o movimento das linhas radiais sob o rotor. As Figuras 81 (a) e (b) ilustram as linhas de base dessa topologia para as duas posições limites do rotor. A Figura 82 mostra a eliminação da limitação da topologia anterior.

As Figuras 81 (a) e (b) mostram ainda que as distorções angulares são também eliminadas. Apenas as razões de aspectos geométricas são influenciadas com esta topologia, mas dentro dos limites geométricos.

Com relação à discretização segundo a coordenada longitudinal ao longo da BCP, um estudo sobre a melhor maneira de se discretizar, seguindo ou não as linhas de geração do modelo sólido, também deve ser efetuado.

Parece ser esta a topologia ótima buscada para a geração de malhas computacionais de BCPs. É deixada como proposta futura a implementação desta topologia e análise das malhas geradas segundo sua filosofia.

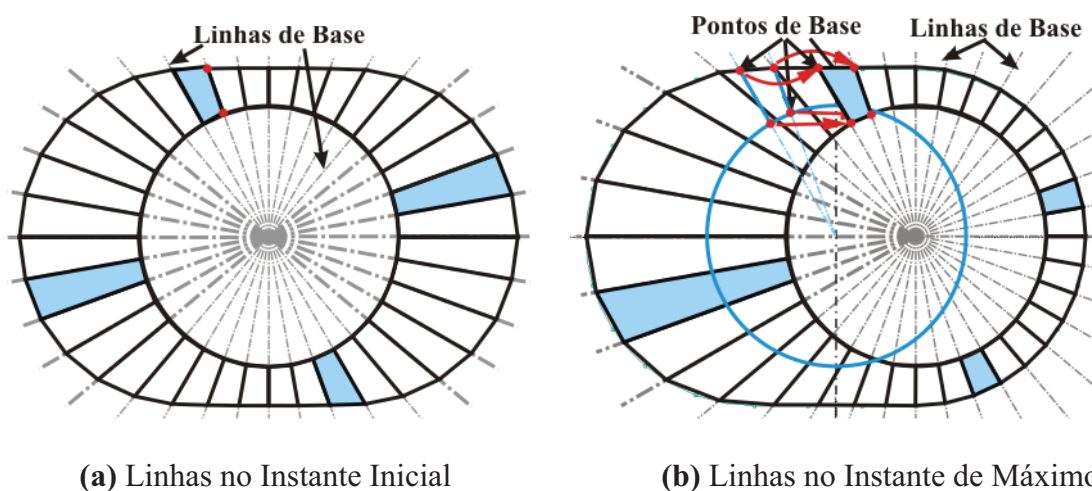


Figura 83: Ilustração das linhas de base para traçado da malha da região fluida (centrada na seção do rotor)

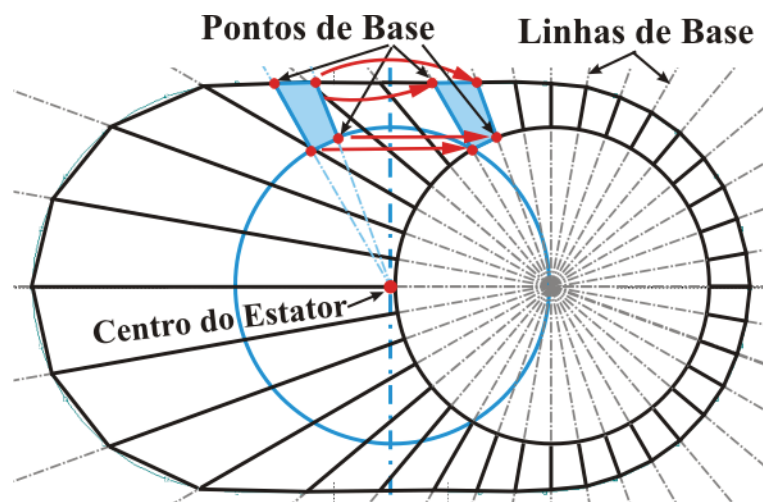


Figura 84: Ilustração das linhas de base para traçado da malha

(centrada na seção do rotor) geometria com  $E = \frac{R_{SR}}{2}$

Após implementação desta topologia de geração de malhas, vislumbram-se também as seguintes ações:

- A partir de todo o conhecimento obtido com o estudo detalhado a partir do modelo computacional, gerar/disponibilizar relações empíricas simples, as quais possam ser facilmente utilizados por técnicos e profissionais que trabalhem com o método de elevação artificial por BCP.

- Estudar a influencia das diferentes razões de aspectos dos elementos hexaédricos ( $r_{xy}$ ,  $r_{xz}$  e  $r_{yz}$ ) sobre a convergência dos potenciais/campos.

- Finalizar o procedimento de geração de malhas para BCP's elastoméricas com interferência.

- Repetir todo o processo de análise comparação/validação para a situação de BCP's elastoméricas com interferência.

- Desenvolver/implementar o processo/metodologia de geração de malha centrada exclusivamente no rotor. Conforme comentado anteriormente, vislumbra-se que tal metodologia seja a forma otimizada para geração de malhas para todos os tipos de configuração geométrica de BCP.

- Aprofundar os estudos sobre a interação fluido-estrutural realizados com o modelo "two way" implícito simplificado.

---

- Implementar e estudar os diversos tipos de modelos de turbulência disponíveis no CFX para análise da interação fluido-estrutural com escoamento turbulento no interior da BCP.

- Buscar as ferramentas necessários para implementação computacional da interação fluido-estrutural real (completa) via interação CFX – Gerador de Malha – Ansys.

- Repetir todo o estudo para a situação de bombas de cavidades progressivas de estator de igual espessura elastomérica.

---

---

# **CAPÍTULO 7**

---

---

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

---

---

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, L. J., 2006, “Sistema de Representação e Avaliação de métodos de elevação artificial de petróleo. Monografia, Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

ANDRADE, S. F., 2008, “Modelo Assintótico Para Escoamento Monofásico Em Bomba De Cavidade Progressiva”, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ.

ANSYS CFX 11.0 Theory Manual (2010), ANSYS Inc., Cannonsburg, PA, USA.

ARRELANO, J.A., 1998. “Field Study for Predicting PC Pump Performance”, Society of Petroleum Engineers. Tulsa, USA.

ASSAN, A. E. “Métodos Energéticos e Análise Estrutural”. Editora da UNICAMP, 1996

ASSMANN, B., 2005, “Curso de Bombeio de Cavidades Progressivas”, PETROBRAS.

ASSMANN, B., 2008, “Simulação, Controle Inteligente e Sistemas Especialista de Dimensionamento de Poços de Petróleo com Elevação por Bombeio de Cavidades Progressivas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.

AXEL Products, 2008, Relatório Técnico Interno.

AZEVEDO, A. F. M. 2003, “Método dos Elementos Finitos”, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1ª Edição.

BATHE, K. J., 1982. “Finite Element Procedures in Engineering Analysis”, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

BATISTA, V. H. F. 2005. “Geração de Malhas Não-Estruturadas Tetraédricas Utilizando um Método de Avanço de Fronteira”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ



---

BLANCO, L., 1999, “Estudo da Elevação de Óleos Pesados através de BCP Utilizando-se o Método de Elementos Finitos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

CARVALHO, P., 1999, “Gerenciamento do Bombeio de Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.

DUNN, L., MATTHEWS, C. & ZAHACY, T., 1994, “Progressing Cavity Pumping Systems: Design, Operation and Performance Optimization”, Notas de Curso, C-FER, Edmonton, Alberta, Canada.

FERZIGER, J. H. & PERIC, M., 2001, “Computational Methods for Fluid Dynamics”, Springer-Verlag, 3rd Edition.

GAMBOA, J., 2000, “Simulacion Computacional de una BCP Sin Interferencia”, Tese de mestrado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas-Venezuela.

GAMBOA, J.; OLIVET, J.; IGLESIAS, J. & GONZALEZ, P., 2002, “Understanding the Performance of a Progressive Cavity Pump With a Metallic Stator”, Proceedings of 20th International Pump Users Symposium.

GAMBOA, J.; OLIVET, J. & ESPIN, S., 2003, “New Approach for Modelling Progressive Cavity Pumps Performance”, Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA.

ISO, 2008, "Downhole Equipment for Petroleum and Natural Gas Industries - Progressing Cavity Pump Systems for Artificial Lift", Technical Standards.

LIMA, J. A., PALADINO, E. E., ALMEIDA, R. F. C. e ASSMANN, F. P. M., 2009, “Mesh Generation Process for the Numerical Simulation of the Fluid Structure Interaction, within Progressing Cavity Pumps”, Proceedings of Brazilian Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009, Gramado, Nov. 15-20.

LIMA, J. A. e PALADINO, E. E., 2006a, “Simulação Computacional da Interação Fluido-Estrutura no Interior de Bombas de Cavidades Progressivas”, Relatório Técnico 1, Maio/2006, LMC/PPGEM/UFRN.

---

LIMA, J. A. e PALADINO, E. E., 2006b, “Simulação Computacional da Interação Fluido-Estrutura no Interior de Bombas de Cavidades Progressivas”, Relatório Técnico 2, Dezembro/2006, LMC/PPGEM/UFRN.

LIMA, J. A. e PALADINO, E. E., 2007a, “Simulação Computacional da Interação Fluido-Estrutura no Interior de Bombas de Cavidades Progressivas”, Relatório Técnico 3, Julho/2007, LMC/PPGEM/UFRN.

MALISKA, C. R., 2004, "Transferência De Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional (in Portuguese)", LTC Editora, 2nd Edition.

MOINEAU, R., 1930, "Le Nouveau Capsulism", Tese de Doutorado, University of Paris, Paris.

NAVARRO, R. F., “Fundamentos de Reologia de Polímeros”, Caxias do Sul: Editora da Universidade de Caxias do Sul, 1997. 265 P.

NETZSCH, 2009, Netzsch do Brasil, site [www.netzsch.com.br](http://www.netzsch.com.br)

OLIVET, J.; GAMBOA, J. & KENYERY, F., 2002, “Experimental Study of Two-Phase Pumping in a Progressive Cavity Pump Metal to Metal”, Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, SPE 77730.

OSIO L. & MORENO, N., 1996. “Modelaje y Simulación Numérica de Bombas de Cavidades Progressivas”. Technical Report. PDVSA Intevep S.A., Los Teques, Venezuela.

PALADINO, E.E.; LIMA, J.A.; ALMEIDA, R.F.C. & ASSMANN, B.W., 2008, “Computational Modelling of the Three-Dimensional Flow in a Metallic Stator Progressing Cavity Pump, 2008 SPE Progressing Cavity Pump Conference, Houston, Texas, 27-29.

PALADINO, E.E.; LIMA, J.A.; ALMEIDA, R.F.C. & PESSOA, P. A. S., 2009, “Computational Three Dimensional Simulation of the Flow Within Progressing Cavity Pump, Proceedings of Brazilian Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009, Gramado, Nov. 15-20.

PESSOA, P. A. S., 2009. “Simulação Computacional do escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.

---

RAW, M. J., 1985, "A New Control-Volume-Based Finite Element Procedure for Numerical Solution of the Fluid Flow and Scalar Transport Equations", University of Waterloo, Canada.

ROBELLO, S. G. & SAVETH, K., 1998, "Progressing Cavity Pump (PCP): New Performance Equations for Optimal Design", Proceedings of SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, US, SPE 39786.

SANCHES, R. A. K. 2006. "Análise bidimensional de interação fluido-estrutura: Desenvolvimento de código computacional". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SORIANO, H. L., 2003. "Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas", EDUSP,

SOULI, M. & OUAHSINE, A. & LEWIN, L., 2000. "ALE Formulation for Fluid-Structure Interaction Problems", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 190 (2000) 659 – 675

TEIXEIRA, P. R. F. 1996. Simulação Numérica de Escoamentos Tridimensionais de Fluidos Compressíveis Aplicando o Método de Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Rio Grande do Sul,

TEIXEIRA, P. R. F., 2001. "Simulação Numérica da Interação de Escoamentos Tridimensionais de Fluidos Compressíveis e Incompressíveis e Estruturas Deformáveis Usando o Método de Elementos Finitos". Tese de Doutorado, UFRGS, Rio Grande do Sul

TEIXEIRA, P. R. F. E AWRUCH, A. M. 2005. Numerical Simulation of fluidstructure interaction using the finite element method. *Computers na Fluids*, v.34, pp. 249-273

THOMAS, J., 2001, "Fundamentos de Engenharia de Petróleo", Editora Interciência, Rio de Janeiro/RJ.

VETTER, G. & WINCEK, M., 1993, "Performance Prediction of Twin Screw Pumps for Two-Phase Gas/Liquid Flow, pumping Machinery", Edited by Paul Cooper, ASME, FED Vol. 154.

VETTER, G. & PALUCHOWSKI, D., 1997, "Modeling of NPSHR For Progressing Cavity Pumps", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting.

---

VETTER, G., WIRTH, W. & PREGLER, S., 2000, “Multiphase Pumping with Twin-Screw Pumps-Understand and Model Hydrodynamics and Hydroabrasive Wear”, Proceedings of 17th International Pump Users Symposium.

VIDAL, F., 2005, “Desenvolvimento de um Simulador de Bombeio por Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.

YEOH, OH, 1993, “Algumas formas de energia a estirpe função de borracha,” Rubber Chemistry and Technology, Volume 66, Pages 754-771

ZIENKIEWICZ, O. C. e TAYLOR, R. L, 2000, *The Finite Element Method*. Editado por Butterworth-heinemann Linacre house, Jordan Hill, Oxford, England. v3 – Fluid Dynamics 5ª Ed. p334