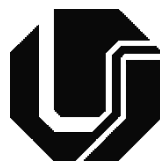


LEONARDO DIAS DA SILVA CABRAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE
LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

LEONARDO DIAS DA SILVA CABRAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA
DE CAMPO PRÓXIMO**

Projeto de Conclusão de Curso submetido ao
Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para obtenção do título de **BACHAREL EM
ENGENHARIA AERONÁUTICA.**

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Junior

UBERLÂNDIA – MG

2019

LEONARDO DIAS DA SILVA CABRAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA
DE CAMPO PRÓXIMO**

Projeto de Conclusão de Curso **Aprovado** pelo
corpo docente do Curso de Graduação em Engenharia
Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Junior – FEMEC/UFU - Orientador

Prof. Dr. Fabian Andres Lara-Molina – UTFPR-CP

Fernanda Ferreira Rossi – FEMEC/UFU

Uberlândia, 20 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por tudo que Ele me proporcionou durante minha jornada, pelos momentos de alegria que me motivaram e pelos momentos de tristeza que me deram experiência para seguir continuando.

Agradeço aos meus pais, Maria Helena e Claudio, e à toda minha família, pelo imensurável apoio, instrução e amor que me deram durante toda minha vida.

Aos amigos que fiz desde o ensino fundamental até o superior, pela ajuda, união e construção de momentos de alegria.

Aos meus orientadores, professor Aldemir e Geisa, pela mentoria e ajuda nas dificuldades encontradas, além de contribuírem para meu aprendizado.

Ao projeto de extensão da Equipe Tucano Aerodesign, pela construção de amizades e de agregação de conhecimento e experiência que contribuíram para abrir oportunidades.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de estudar em um ambiente diferenciado, onde pude aprender não apenas a teoria, mas também experiências de vida.

CABRAL, L. D. S. Análise Comparativa de Modelos de Levitação Acústica de Campo Próximo. 2019. 78 f. Projeto de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

A metodologia de levitação acústica se mostra como uma alternativa para aplicações em que há a necessidade de redução da resistência mecânica, seja na diminuição do atrito para reduzir o efeito do calor gerado e maximizar a performance, ou então no uso para produtos em que é requisitado grau de pureza ou componentes que não podem ser danificados. Como todo tipo de levitação, o conceito se faz em promover uma força contrária a força gravitacional do objeto, de forma que o mesmo seja suspenso (ou levitado). É possível estabelecer alguns métodos para gerar tal força, dentre eles destacam-se a aerodinâmica (força promovida pelo ar), a eletrostática (força promovida pelo campo elétrico), a magnética (força promovida pelo campo magnético) e a óptica (força promovida por lasers e lentes). Na acústica, em especial, a força é gerada por meio de um campo de pressão produzido através de uma superfície vibratória, sendo esta técnica de levitação classificada em dois tipos: levitação por ondas planas e de campo próximo. Neste trabalho será abordado o método de levitação acústica baseado no campo próximo, onde será realizado uma comparação entre os campos de pressão criados em diferentes condições (ao variar o número de compressão e a amplitude de vibração da superfície acionadora, além da condição do objeto ser fixo ou livre), estabelecendo a observação e análise entre duas metodologias numéricas diferentes (entre a metodologia da equação de Reynolds, implementada por meio da solução de equações diferenciais parciais no software MATLAB® e a metodologia via software COMSOL Multiphysics®, baseada nas equações de Reynolds e de Euler).

Palavras-chave: Levitação acústica; Campo próximo; Comparação; Equação de Reynolds; COMSOL Multiphysics®.

ABSTRACT

The acoustic levitation methodology is an alternative for applications where there is a need to reduce mechanical resistance, either by reducing friction to reduce the effect of heat generated and maximizing performance, or when using it for products where it is required purity or undamaged components. Like all kinds of levitation, the concept is to promote a force contrary to the gravitational force of the object, so that it is suspended (or levitated). It is possible to establish some methods to generate such force, among them the aerodynamics (force promoted by the air), the electrostatic (force promoted by the electric field), the magnetic (force promoted by the magnetic field) and the optical (force promoted by lasers and lenses). In acoustics, in particular, the force is generated by a pressure field through a vibrating surface, and this levitation technique is classified into two types: flat waves and near field levitation. In this work we will approach the near-field acoustic levitation method, where a comparison will be made between the pressure fields created under different conditions (by varying the compression number and the vibration amplitude of the driving surface, in addition to the condition of the object being fixed or free), establishing the observation and analysis between two different numerical methodologies (between the Reynolds equation methodology, implemented through the partial differential equation solution in MATLAB® software and the COMSOL Multiphysics® software methodology, based on Reynolds and Euler equations).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplo de aplicação de um método de levitação - Configuração de um motor com três mancais magnéticos. Fonte: [17]	17
Figura 1.2: Exemplo de suspensão eletrostática de uma placa PCB. Fonte: [18]	17
Figura 1.3: Exemplo de levitação acústica de substâncias químicas. Fonte: [19]	18
Figura 1.4: Tipos diferentes de levitação. Da esquerda para a direita: Magnética, Eletrostática, Aerodinâmica, Acústica e Óptica. Fonte: [20]	18
Figura 2.1: Esquematização do aparato de levitação de uma esfera em duas configurações. Fonte: [9]	22
Figura 2.2: Esquematização de um campo elétrico com quatro polos promovendo a levitação eletrostática de uma partícula carregada. Fonte: [9]	23
Figura 2.3: Diagrama esquemático de um levitador eletrostático de uma dimensão. Fonte: [11]	23
Figura 2.4: Princípio de funcionamento de um trem Maglev. Fonte [13]	24
Figura 2.5: Levitação óptica de uma esfera baseada em feixes de laser verticais. Fonte: [9]	26
Figura 2.6: Princípio de funcionamento de um levitador acústico. Fonte: [8]	27
Figura 2.7: Ilustração do aparato de levitação. Fonte: [8]	28
Figura 2.8: Exemplo de aparato de levitação acústica. Fonte: [15]	29
Figura 2.9: Esquematização do comportamento vibratório da superfície acionadora. Fonte: [4]	30
Figura 2.10: Ilustração do sistema do escoamento para fluidos em camadas finas. Fonte: [21]	36
Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo elaborado para a solução da equação de Reynolds. Fonte: Autor	41
Figura 3.2: Análise modal da superfície acionadora. Fonte: Autor	44
Figura 3.3: Geometria e malha para simulações normal (disco fixo) e para influência na temperatura. Fonte: Autor	46
Figura 3.4: Geometria e malha para simulação de influência na flexibilidade. Fonte: Autor	47

Figura 3.5: Geometria e malha para simulação de disco livre. Fonte: Autor.....	47
Figura 3.6: Geometria e malha para simulação conjunta de temperatura e flexibilidade para disco livre. Fonte: Autor	48
Figura 3.7: Condições de contorno para regime transiente e com disco superior fixo. Fonte: Autor	49
Figura 3.8: Condições de contorno para a influência na temperatura e com disco superior fixo. Fonte: Autor	50
Figura 3.9: Condições de contorno para a influência na flexibilidade e com disco superior fixo. Fonte: Autor	50
Figura 3.10: Condições de contorno para regime transiente e com disco superior livre. Fonte: Autor	51
Figura 3.11: Condições de contorno para a influência na flexibilidade com disco superior livre. Fonte: Autor	52
Figura 3.12: Condições de contorno para a análise conjunta da influência na temperatura e flexibilidade com disco superior livre. Fonte: Autor	53
Figura 4.1: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	55
Figura 4.2: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	55
Figura 4.3: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	56
Figura 4.4: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	56
Figura 4.5: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$). Fonte: Autor	57
Figura 4.6: Campo de pressão na superfície do escoamento, para um dado tempo de simulação. Fonte: Autor	58
Figura 4.7: Influência na temperatura e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	59
Figura 4.8: Influência na flexibilidade e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	60
Figura 4.9: Ilustração do comportamento do disco acionador ao longo do tempo. Fonte: Autor	61

Figura 4.10: Influência na temperatura e flexibilidade para disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	62
Figura 4.11: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	63
Figura 4.12: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	63
Figura 4.13: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor	64
Figura 4.14: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	64
Figura 4.15: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$). Fonte: Autor	65
Figura 4.16: Influência na temperatura e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	66
Figura 4.17: Influência na flexibilidade e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	67
Figura 4.18: Influência na temperatura e flexibilidade para disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Condições adotadas.....	33
Tabela 3.1: Parâmetros gerais do modelo	39
Tabela 3.2: Tipos de análises.....	40
Tabela 3.3: Físicas e estudos utilizados para cada configuração analisada.....	42
Tabela 3.4: Valores de altura e amplitude de variação da camada do escoamento.....	45
Tabela 3.5: Associação entre as análises com a geometria e malha utilizados.....	48
Tabela 4.1: Máximos valores de pressão obtidos	57

LISTA DE SÍMBOLOS

δ_h	Amplitude de vibração dimensional [m]
ΔX	Tamanho do passo radial do disco [m]
ϵ	Amplitude de vibração adimensional
ϵ_{cr}	Tensão de fluência
ϵ_o	Tensão inicial
ϵ_{el}	Tensão elástica
ϵ_{ext}	Tensão externa
ϵ_{hs}	Tensão higroscópica
ϵ_{inel}	Tensão inelástica
ϵ_{pl}	Tensão plástica
ϵ_{th}	Tensão térmica
ϵ_{vp}	Tensão visco-plástica
η	Viscosidade dinâmica do fluido [$kg/(ms)$]
ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]
ρ'	Densidade do fluido para pequenas expansões [kg/m^3]
σ	Número de compressão
c_s	Velocidade do som para entropia constante [m/s]
g	Aceleração da força gravitacional [m/s^2]
h	Altura do filme de fluido [m]
H	Altura adimensional do filme de fluido, em função da amplitude de vibração e do tempo
h_o	Altura inicial do filme de fluido [m]
h_b	Altura da referência até a base da camada de fluido [m]

h_w	Altura da referência até a parede da camada de fluido [m]
$h(t)$	Altura dimensional do filme de fluido [m]
kHz	Unidade de medida de frequência (Hertz)
L	Comprimento característico da superfície acionadora
m	Unidade de medida de comprimento (metro)
p	Pressão do fluido dimensional [Pa]
P	Pressão do fluido adimensional
p'	Pressão do fluido para pequenas expansões [Pa]
p_o	Pressão atmosférica [Pa]
p_A	Pressão absoluta [Pa]
p_f	Pressão desenvolvida como resultado do escoamento [Pa]
p_{ref}	Pressão de referência [Pa]
p_t	Pressão total [Pa]
q_d	Termo da fonte dipolo [N/m^3]
Q_m	Termo da fonte monopolo [$1/s^2$]
$\bar{R}$	Constante universal dos gases [$J/(kgK)$]
s	Unidade de tempo (segundo)
S	Tensor total
S_o	Tensor inicial
S_{ad}	Tensor de desvio
S_{ext}	Tensor externo
S_q	Tensor extra devido à viscosidade
t	Tempo relativo ao comportamento do sistema [s]
T	Tempo adimensional

t_m	Temperatura média [K]
u'	Velocidade do fluido para pequenas expansões [m/s]
u_a	Velocidade do fluido no eixo x, relativa à superfície superior [m/s]
u_b	Velocidade do fluido no eixo x, relativa à superfície inferior [m/s]
v_a	Velocidade do fluido no eixo y, relativa à superfície superior [m/s]
v_b	Velocidade do fluido no eixo y, relativa à superfície inferior [m/s]
v_{ref}	Velocidade de referência [m/s]
w	Frequência angular do sistema [Hz]
w_a	Velocidade tangencial do fluido, relativa à superfície superior [m/s]
w_b	Velocidade tangencial do fluido, relativa à superfície inferior [m/s]
x	Distância ao longo da superfície acionadora [m]
X	Distância adimensional ao longo da superfície acionadora

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. TIPOS DE LEVITAÇÃO	21
2.1.1. LEVITAÇÃO AERODINÂMICA	21
2.1.2. LEVITAÇÃO ELETROSTÁTICA.....	22
2.1.3. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	24
2.1.4. LEVITAÇÃO ÓPTICA.....	25
2.1.5. LEVITAÇÃO ACÚSTICA	26
2.1.5.1. LEVITAÇÃO ACÚSTICA POR ONDAS PLANAS	27
2.1.5.2. LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO	29
2.2. METODOLOGIA DE EQUACIONAMENTO (EQUAÇÃO DE REYNOLDS)	30
2.3. A FERRAMENTA COMSOL MULTIPHYSICS® E SEU EQUACIONAMENTO	34
CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	38
3.1. PARÂMETROS INICIAIS	38
3.2. MODELAGEM NUMÉRICA – VIA SOFTWARE MATLAB®	40
3.3. MODELAGEM NUMÉRICA – VIA SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®	42
3.3.1. OBTENÇÃO DA ESPESSURA DA SUPERFÍCIE ACIONADORA E DO FILME DE FLUIDO	44
3.3.2. CONFECÇÃO INICIAL DO MODELO	45
3.3.3. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR FIXO	49
3.3.4. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR FIXO.....	49
3.3.5. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO	50
3.3.6. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO	51
3.3.7. DISCO SUPERIOR LIVRE	51
3.3.8. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE	52
3.3.9. ANÁLISE CONJUNTA DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE.....	53

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR FIXO	54
4.2. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR FIXO.....	59
4.3. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO	60
4.4. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO	61
4.5. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR LIVRE	62
4.6. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR LIVRE	65
4.7. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE	66
4.8. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE.....	68
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE I – Algoritmo de implementação em MATLAB® para a Equação de Reynolds.....	72
APÊNDICE II – Algoritmo de Implementação em MATLAB® para o Tratamento de Dados do COMSOL Multiphysics®	75

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Com o avanço da evolução humana, a crescente busca por produtos com maior desempenho e custo-benefício acarreta na demanda de novas tecnologias. Um exemplo a ser destacado trata-se dos métodos de levitação, cujo princípio básico consiste na formação de uma força oposta a gravitacional de modo a sustentar e equilibrar um corpo, sem que este entre em contato com alguma superfície (conforme citado em HRKA [5]).

Essa característica da levitação (retirar o contato do objeto com a superfície) abre oportunidades na otimização de processos, visto que existem aplicações onde a necessidade da redução do contato favorece na melhoria da performance ou da própria manufatura do produto.

ZHAO [1] destaca como uma das aplicações para tal método o uso em mancais rotativos substituindo os mancais de rolamento, uma vez que elementos de rolamento mecânicos apresentam maior atrito, o que promove a geração de calor. Além disso, a carga do objeto entra em contato com os rolamentos, proporcionando o desgaste mais elevado se comparado com um método de levitação, além da geração de vibração e ruído. Logo, altas cargas, que requerem elevada velocidade e precisão são frequentemente atribuídas aos métodos de levitação (Figura 1.1).

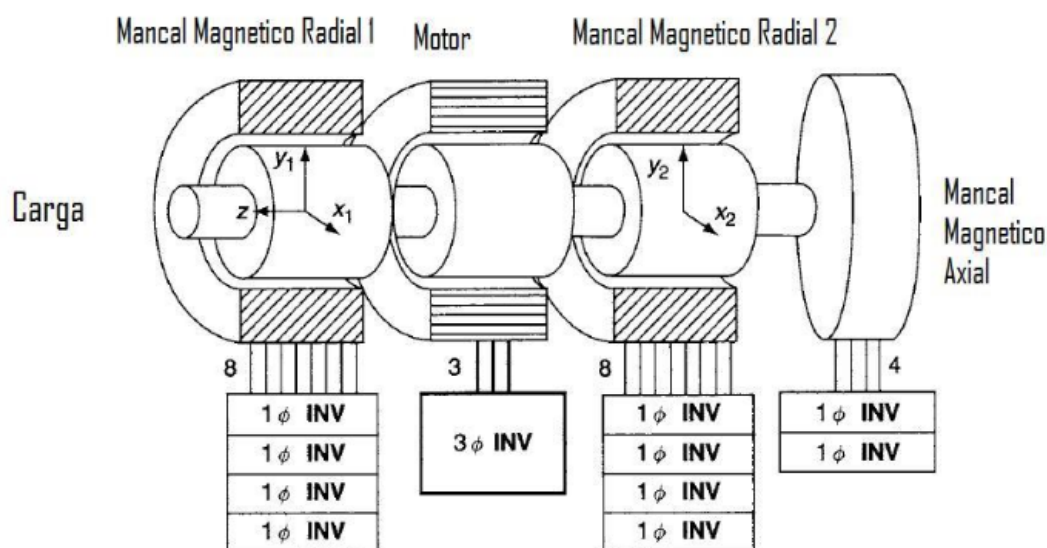


Figura 1.1: Exemplo de aplicação de um método de levitação - Configuração de um motor com três mancais magnéticos. Fonte: [17]

Em ILSSAR, BUCHER e COHEN [6], os autores destacam uma necessidade advinda da indústria de microeletrônicos. O transporte de placas de silício (Figura 1.2), utilizadas para a confecção de chips de computador, resultava no uso de braços robóticos para segurar tais peças e esse contato culminava na contaminação das placas. Nessa aplicação, a levitação promove a redução da contaminação das placas de silício por agentes externos, garantindo um produto final de melhor qualidade.

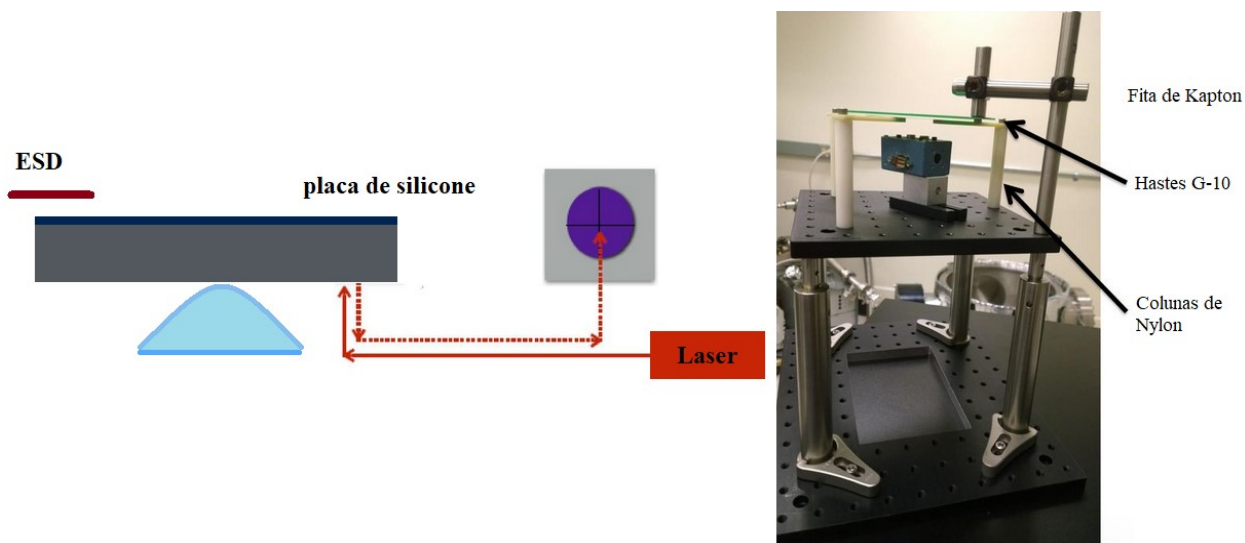


Figura 1.2: Exemplo de suspensão eletrostática de uma placa PCB. Fonte: [18]

As aplicações da levitação também podem ser vistas na indústria química (conforme citado em FERREIRA [2]), onde envolvem a presença de possíveis reações químicas (caso agentes externos entrem em contato) ou substâncias com elevado grau de pureza (Figura 1.3).

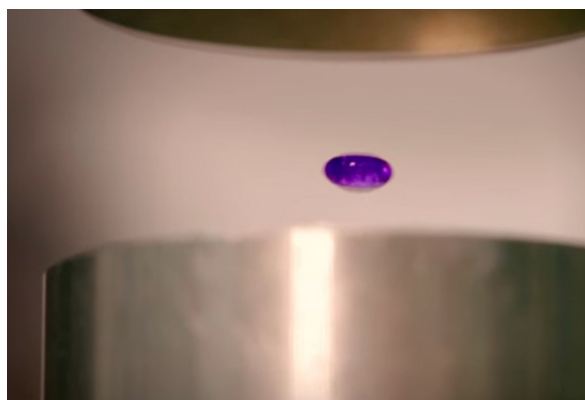


Figura 1.3: Exemplo de levitação acústica de substâncias químicas. Fonte: [19]

O método da levitação (Figura 1.4) ramifica-se através de cinco diferentes técnicas, baseadas na forma em que é aplicada a força sobre o objeto a ser levantado, sendo elas: magnética, elétrica, óptica, aerodinâmica e acústica. Por consequência, cada uma destas apresenta características próprias, além de suas respectivas vantagens específicas para determinadas aplicações.



Figura 1.4: Tipos diferentes de levitação. Da esquerda para a direita: Magnética, Eletrostática, Aerodinâmica, Acústica e Óptica. Fonte: [20]

A metodologia de levitação acústica, em específico, gera a força sustentadora do objeto através da elevação do campo de pressão gerado pela radiação de ondas acústicas no meio. Como citado em ZHAO [1] e THOMAS [8], a acústica, em comparação às outras técnicas, além de evitar o contato da peça com a superfície, evita restrições impostas por material (como materiais magnéticos para levitação magnética e materiais com condutividade elétrica para levitação elétrica). Aplicações para a levitação acústica (além das citadas anteriormente), destacam-se na manipulação de líquidos, pequenos sólidos ou até pequenos animais, sendo tal método emergente na indústria farmacêutica.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa de duas formas de modelagem numérica do comportamento de levitação acústica de campo próximo, técnica utilizada que emprega oscilações ultrassônicas, de frequências acima de 20 *kHz*, em uma superfície vibratória, criando um campo de pressão entre a superfície e o objeto a ser levantado. Esse estudo compara o modelo do comportamento do campo de pressão em uma fina camada de gás, denominada filme de fluido comprimido (modelada pela equação de Reynolds), com a modelagem de interação acústica-estrutural proposta pelo software COMSOL Multiphysics® (baseada nas equações de Reynolds e de Euler).

Dessa maneira, o segundo capítulo deste trabalho propõe uma revisão dos tipos de levitação mais conhecidos, identificando suas características específicas, além de apresentar a metodologia teórica utilizada para descrever o modelo do comportamento do campo de pressão acústico ao longo do objeto e do tempo (será utilizada neste a equação de Reynolds em coordenadas cartesianas, com suas devidas simplificações) e uma breve introdução sobre o software COMSOL Multiphysics®. O terceiro capítulo cita a metodologia utilizada para os dois tipos de modelagem numérica abordados, a solução da equação de Reynolds via software MATLAB® e a interação acústica-estrutural do software COMSOL Multiphysics®, incluindo parâmetros iniciais e condições de contorno. O quarto capítulo consiste na apresentação dos resultados obtidos com a aplicação dos dois métodos, permitindo uma análise dos dados e uma comparação dos mesmos, destacando convergências e possíveis discrepâncias. O último capítulo resume as discussões encontradas no quarto capítulo, concluindo a análise comparativa e propondo ideias para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A palavra levitação apresenta origem no latim “*levis*”, significando leveza. Já HRKA [5] define a levitação como sendo um processo pelo qual é gerada uma força ascendente que age sobre o objeto, de modo que a mesma neutraliza a ação da força gravitacional sobre o objeto, permitindo que haja uma suspensão e estabilização da peça sem contato com alguma superfície. Logo, é possível inferir que sem a formação dessa “força sustentadora” o processo de levitação não ocorre e, para ser gerada tal força, encontram-se específicas opções, caracterizadas por sua natureza.

Alguns primeiros indícios de estudos acerca da levitação são tratados em 1842, quando Samuel Earnshaw [9] provou que uma suspensão/levitação estável era impossível para um corpo inserido em um campo de força estático atrativo ou repulsivo, no qual a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância (tal qual é visto em campos elétricos, magnéticos ou gravitacionais). Tal comprovação foi denominada de Teorema de Earnshaw [9], contudo, tal afirmação não exclui por completo a levitação de cargas ou corpos magnéticos. Conforme o teorema trata da impossibilidade de um equilíbrio mecânico estacionário, exclusivo para uma condição estática, fenômenos dinâmicos podem induzir uma condição de levitação estável em campos de força oscilatórios. Um exemplo citado por BRANDT [9] consiste em um pêndulo de um objeto na ponta de uma corda esticada. Em uma condição estacionária, o pêndulo apresenta apenas uma condição de equilíbrio, porém, ao realizar movimentos verticais oscilatórios, o ponto de deslocamento mais distante do pêndulo pode se tornar uma condição de equilíbrio.

Vale ressaltar que o Teorema de Earnshaw é válido apenas para partículas individuais, dessa forma dipolos relacionados com corpos dielétricos ou magnetizados promovem uma estável levitação para corpos diamagnéticos ou supercondutores em campos magnéticos estáticos. Logo, nota-se a presença do magnetismo e da eletricidade como forças para promover a levitação. Também pode-se destacar nessa lista levitações como aerodinâmica, acústica e óptica, que são apresentadas a seguir.

2.1. TIPOS DE LEVITAÇÃO

2.1.1. LEVITAÇÃO AERODINÂMICA

A levitação aerodinâmica se faz a partir da sustentação de um corpo por meio de um jato de fluido emitido por um bocal e, dessa maneira, a pressão que o escoamento exerce sobre o corpo concede a força necessária para um equilíbrio estável. Exemplos a serem citados para tal conceito são os helicópteros ou air hockeys e apresentam utilização na fabricação de materiais vítreos específicos (NORDINE, WEBER e ABADIE [10]), tais quais vidros formados por óxido de alumínio, materiais com dependência de uma elevada temperatura, além de não serem limitados a condutividade (ou seja, são materiais que não são feitos no método tradicional). Para a fabricação de tais materiais, utiliza-se jatos de dióxido de carbono associados com laser para aquecimento.

Também é possível ver o uso da levitação aerodinâmica para suspensão de esferas, onde nota-se que a estabilidade necessária para o equilíbrio é encontrada na direção transversal. Isso é explicado uma vez que o jato é direcionado para fora do eixo da esfera, o que promove uma força centralizadora (através de Bernoulli), que permite a condição estável da esfera. Além disso, o fato de a rotação criada por esse jato não estar no eixo da esfera culmina no chamado efeito Magnus, cuja sustentação resultante promove um acréscimo na estabilidade lateral (conforme é visto na Figura 2.1).

Outra forma de levitação aerodinâmica está no tubo de constrição (Figura 2.1), onde o efeito constritor do tubo promove uma força de oposição à de arrasto e gravidade (tendo em vista que a constrição acelera o escoamento, permitindo, por meio de Bernoulli, a presença de uma maior pressão dinâmica local, possibilitando a formação da força). Vale ressaltar que este tipo de tubo, independe da orientação e da gravidade.

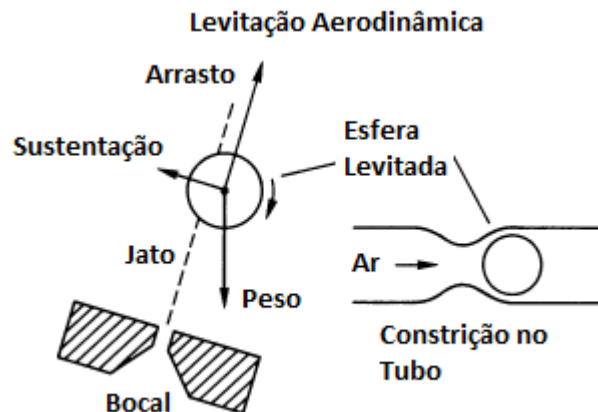


Figura 2.1: Esquematização do aparato de levitação de uma esfera em duas configurações. Fonte: [9]

2.1.2. LEVITAÇÃO ELETROSTÁTICA

Também é possível induzir uma força oposta à gravitacional através de um campo elétrico, sendo este método conhecido como levitação por campo eletrostático. Para isso ocorrer, é necessário que seja um corpo com carga elétrica e que esteja imerso em um campo elétrico.

Contudo, o teorema de Earnshaw, citado anteriormente, revela que existe instabilidade em uma partícula carregada quando a mesma se encontra suspensa por um campo eletrostático. Dessa forma, para proporcionar o equilíbrio necessário para a levitação, uma alternativa encontrada foi oscilar o campo elétrico com o tempo, conforme visto em BRANDT [9] (uma espécie de um sistema de controle do campo elétrico), o que promove um “feedback” para o sistema de modo a ajustar o campo elétrico conforme a instabilidade da carga, permitindo assim uma estabilidade mais precisa. A Figura 2.2 ilustra uma esquematização de uma partícula com carga estabilizada em um campo elétrico que apresenta quatro polos.

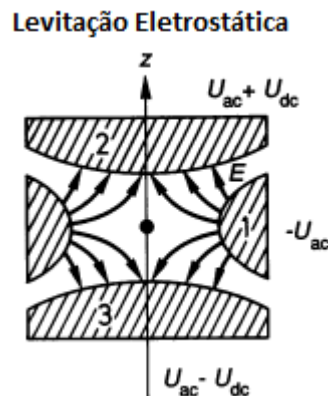


Figura 2.2: Esquematização de um campo elétrico com quatro polos promovendo a levitação eletrostática de uma partícula carregada. Fonte: [9]

O primeiro aparato de levitação eletrostática foi desenvolvido por Won-Kyu Rhim (ZHONG LI [11]), de forma que permitiu estudos específicos acerca de metais líquidos, reduzindo as dificuldades encontradas em experimentos envolvendo materiais a elevadas temperaturas, reatividades químicas ou até cristalização devido ao contato. A Figura 2.3 ilustra um sistema de levitação eletrostática de uma dimensão.

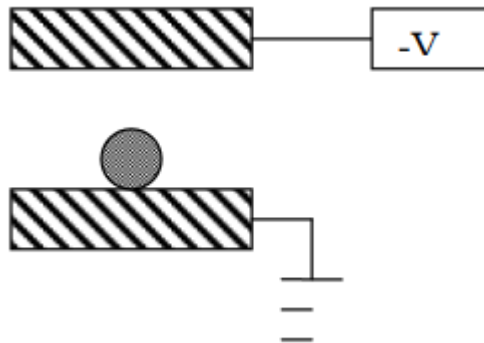


Figura 2.3: Diagrama esquemático de um levitador eletrostático de uma dimensão. Fonte: [11]

2.1.3. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Assim como na levitação por campo eletrostático, a levitação por campo magnético constitui-se na promoção de gerar a sustentação de um objeto por meio de uma força magnética, sendo esta induzida pelo campo magnético imerso no sistema.

Logo, a força magnética só aparece nesta situação caso o objeto apresente propriedades magnéticas, o que restringe a utilização de materiais neste sistema. Contudo, seu uso se faz presente em diversas aplicações, destacando-se com mais frequência em mancais magnéticos e em sistemas de movimentação de trens, tornando-os mais rápidos e de menor ruído (Figura 2.4). Neste caso, o trem é suspenso pela força de repulsão dos polos iguais entre o trem e o solo e, para translação, um sistema de polos alternados é inserido nas paredes do trem e do caminho, permitindo uma força de atração e repulsão cíclica. Esses materiais constituem-se de supercondutores, que operam a elevadas temperaturas.

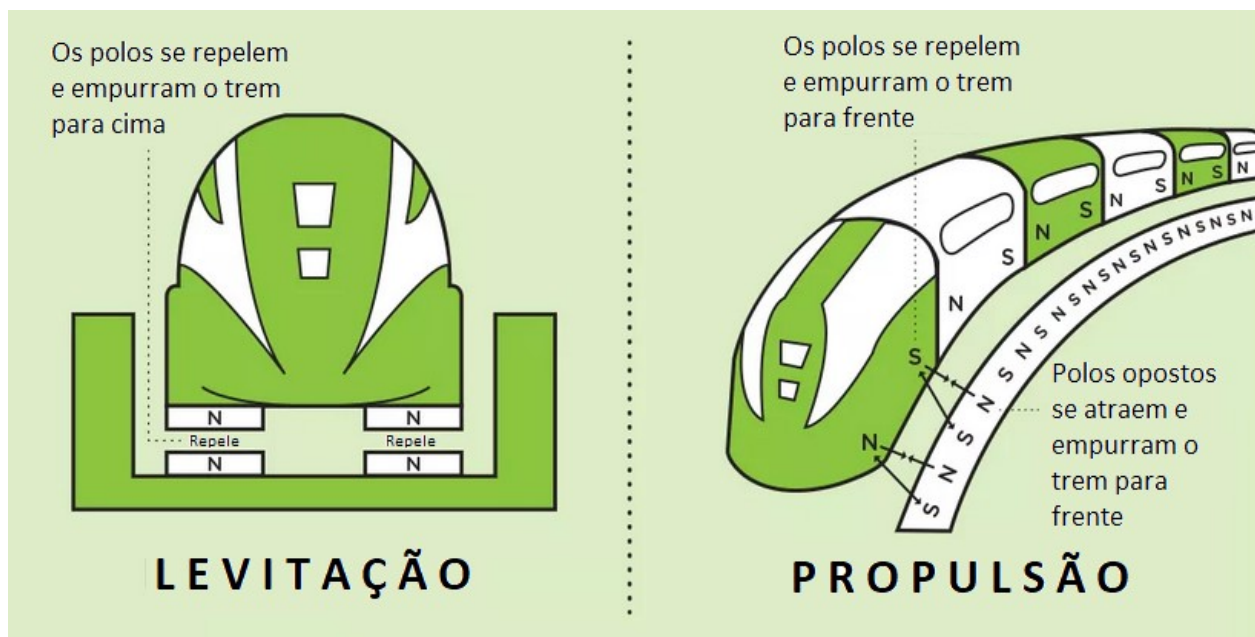


Figura 2.4: Princípio de funcionamento de um trem Maglev. Fonte [13]

Da mesma forma que no método anterior, o teorema de Earnshaw afirma que não é possível levar, de forma estável, usando campos estáticos, macroscópicos ou paramagnéticos. Logo, para garantir a condição estável, é possível utilizar-se de estabilização eletrônica (chamados de servomecanismos, os quais promovem uma malha de controle fechada, alimentando com

informações para variar o campo conforme a necessidade) ou então o uso de materiais diamagnéticos, ou seja, materiais cuja permeabilidade magnética seja menor que 1 (SIMON, HEFLINGER e GEIM [12]).

Os materiais diamagnéticos são repelidos pelos campos magnéticos e atraídos para as regiões de campo mínimo (ao contrário de materiais ferro/paramagnéticos, cujas propriedades são atraídas para regiões de campo máximo). Uma vez que regiões de campo máximo são tratadas como localização da fonte do campo magnético, tem-se que materiais ferro/paramagnéticos são impossibilitados de estarem em espaço livre (uma vez que são atraídos para a fonte do campo) enquanto que materiais diamagnéticos são possíveis de serem levitados.

Segundo FERREIRA [2], destacam-se três tipos básicos de levitação magnética:

- Levitação eletrodinâmica ou por repulsão magnética: utilização de bobinas supercondutoras que geram um campo magnético, influenciando no surgimento de uma corrente elétrica no condutor e, por consequência, criando outro campo magnético que se opõe ao da bobina, formando uma força repulsiva de suspensão;
- Levitação eletromagnética ou por atração magnética: materiais ferromagnéticos são elevados pela força atrativa estabelecida por eletroímãs;
- Levitação supercondutora: uso de materiais magnéticos e de pastilhas supercondutoras (quase diamagnéticos perfeitos) que operam a elevadas temperaturas (conforme citado anteriormente no mecanismo de suspensão dos trens).

2.1.4. LEVITAÇÃO ÓPTICA

Em FERREIRA [2] declara-se que a levitação óptica utiliza da força emitida por raios de luz intensos para contrapor à força gravitacional, sem a necessidade de forças externas ou auxílios magnéticos. Logo, essa força emitida pela luz trata-se da transferência do momento linear do fóton ou pressão de radiação.

Com o avanço da tecnologia, tal qual as fontes de laser de alta intensidade, pureza espectral e coerência espacial, esta metodologia pode ser reproduzida em laboratório, destacando-se duas técnicas (BRANDT [9]). A primeira consiste em feixes de laser verticais (Figura 2.5) e a segunda trata-se dos feixes de laser opostos, na direção horizontal, como pontos focais quase coincidentes.

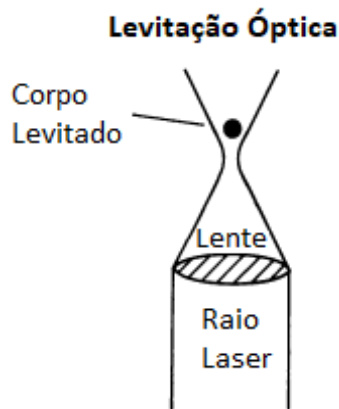


Figura 2.5: Levitação óptica de uma esfera baseada em feixes de laser verticais. Fonte: [9]

São usados frequentemente nestes experimentos esferas dielétricas de sílica fundidas na ordem de micrometros, além de gotas de óleo ou água.

2.1.5. LEVITAÇÃO ACÚSTICA

A *acoustophoresis*, mais conhecida como levitação acústica, trata-se do método de suspensão da matéria através da radiação da pressão acústica. Ou seja, esta técnica permite que ondas sonoras criem no meio inserido um campo de pressão e, por sua vez, este campo proporciona a força oposta à gravitacional necessária para elevar o objeto.

Segundo THOMAS [8], o primeiro trabalho teórico relacionado com o método data do ano de 1934, com o trabalho de King acerca da força exercida em discos e esferas devido à pressão da radiação sonora e, posteriormente, obteve-se sucesso experimental em trabalhos realizados por Bucks/Muller (1933) [8], Clair (1949) [8] e Hanson/Domich/Adams (1964) [8]. Mais adiante, em 2010, o primeiro sistema de transporte que utilizava levitação acústica foi apresentado por

Koyama e Nakamura [8], permitindo o deslocamento de partículas em trajetórias lineares ou circulares, evoluindo a metodologia antes limitada apenas a experimentos quase estáticos.

Dentro do campo da levitação acústica, existem dois tipos de abordagens: a levitação por ondas planas e a de campo próximo.

2.1.5.1. LEVITAÇÃO ACÚSTICA POR ONDAS PLANAS

A levitação por ondas planas, conforme FERREIRA et al. [3], corresponde ao uso de um transdutor ultrassônico e de um refletor (seja o refletor plano ou curvado). As ondas geradas pelo transdutor são direcionadas ao refletor que, por sua vez, refletem as mesmas para o transdutor, o que promove a formação de ondas de mesma frequência, porém de sentidos opostos. Segundo THOMAS [8], a colisão das ondas cria regiões de interferência construtiva (anti-nós) e destrutiva (nós), caracterizadas, respectivamente, como áreas de alta e baixa pressão, onde as partículas inseridas nesse meio movimentam-se da região de alta pressão para a de baixa pressão, permanecendo então, nas regiões dos nós. A Figura 2.6 ilustra a esquematização deste processo de levitação.

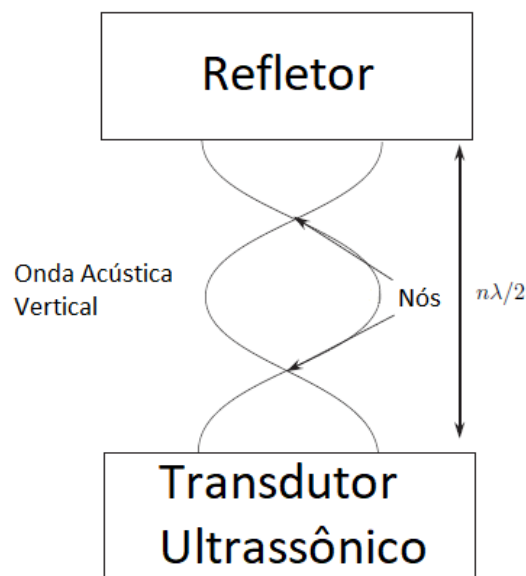


Figura 2.6: Princípio de funcionamento de um levitador acústico. Fonte: [8]

O exemplo mais comum deste tipo de abordagem são os levitadores acústicos de eixo único, formados por um transdutor ultrassônico e um refletor, cujo eixo situa-se na mesma direção da força gravitacional. Muitos destes equipamentos utilizam-se de um transdutor Langevin, um conjunto de anéis piezoelétricos inseridos entre duas massas de carregamento, acopladas com um amplificador mecânico (conforme mostrado na Figura 2.7).

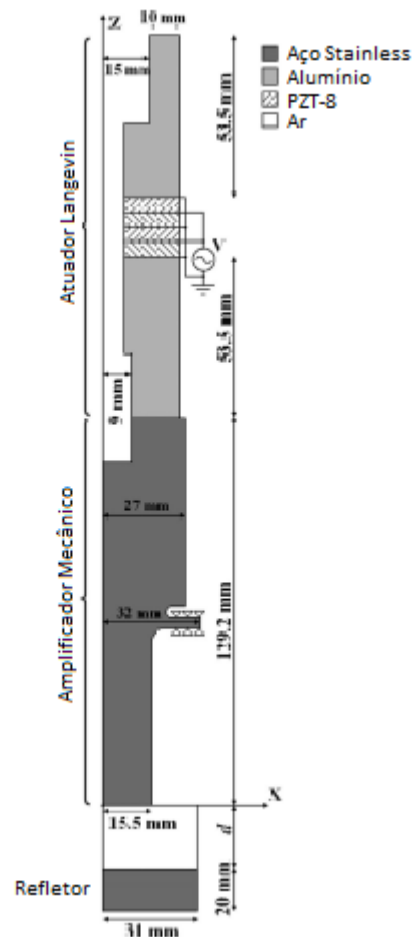


Figura 2.7: Ilustração do aparato de levitação. Fonte: [8]

Contudo, esta abordagem apresenta limitação de geometria, uma vez que os nós são as regiões de baixa pressão, o que restringe o tamanho do corpo a ser levitado à metade do comprimento de onda, além da restrição da altura entre a superfície vibratória e o objeto.

2.1.5.2. LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO

Já a levitação de campo próximo (ou também chamada de levitação por filme de fluido comprimido), diferente da anterior, ocorre a partir de uma superfície vibratória de alta frequência, sem a necessidade de um refletor. Logo, ao colocar um objeto próximo da superfície vibratória (ou denominada acionadora) a fina camada de ar concentrada entre as duas superfícies será comprimida pelo efeito da vibração, o que promove um aumento do campo de pressão e, por consequência, a força necessária para a suspensão do objeto (Figura 2.8). Essa fina camada de ar entre o objeto e a superfície acionadora é conhecida como filme comprimido (*squeeze film*) e pode ser modelada conforme a equação de Reynolds (sendo a mesma exposta no item 2.2 deste trabalho).



Figura 2.8: Exemplo de aparato de levitação acústica. Fonte: [15]

A Figura 2.9 ilustra esquematicamente o sistema utilizado antes e depois do efeito vibratório. A imagem (A) corresponde ao sistema em estado estático, onde a superfície acionadora está inerte e a uma distância do objeto de h_0 . Com o início do funcionamento do sistema, a superfície acionadora apresenta um movimento oscilatório e a distância entre as superfícies se torna variável em função do tempo, $h(t)$.

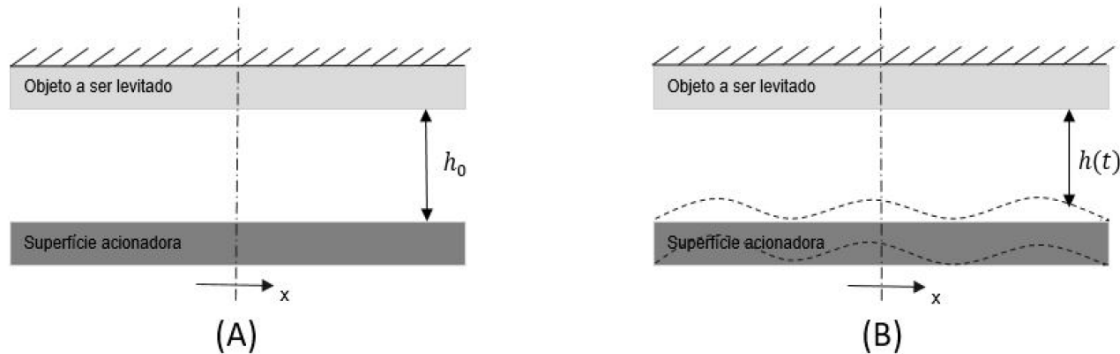


Figura 2.9: Esquemática do comportamento vibratório da superfície acionadora. Fonte: [4]

Segundo ZHAO [1], uma importante aplicação da levitação acústica de campo próximo está no uso em mancais lineares ou rotativos, uma vez que não existe contato entre a superfície do mancal com a peça como também não é necessário a presença de um refletor. Além disso pode-se utilizar o ar ambiente para o funcionamento, excluindo a necessidade de injeção de ar comprimido. ZHAO [1] também discute que já existem pesquisas acerca da utilização de tal técnica para sistemas de transporte. Outra vantagem a ser destacada é referente à frequência das ondas, o fato de as ondas serem de natureza de alta frequência possibilita estabelecer frequências superiores a 20 kHz, frequências estas que estão acima da banda de frequência audível do ser humano.

2.2. METODOLOGIA DE EQUACIONAMENTO (EQUAÇÃO DE REYNOLDS)

ZHAO [1] explica que o modelo da levitação acústica por filme de fluido comprimido pode ser estabelecido por duas formas diferentes, pela teoria da pressão por radiação acústica e pela teoria do filme de gás lubrificado. A teoria da pressão por radiação acústica consiste em uma teoria não linear, onde um corpo imerso em um campo acústico experimenta uma força constante, sendo esta imposta pela pressão do campo acústico (pressão esta conhecida como pressão por radiação acústica). Neste trabalho será abordado sobre a teoria do filme de gás lubrificado, sendo esta resolvida pela equação de Reynolds.

A equação de Reynolds representa uma equação diferencial que governa a distribuição de pressão no filme de fluido lubrificado que, neste caso, existe entre a superfície acionadora e o objeto a ser levantado. Segundo HAMROCK [16], esta equação foi apresentada pela primeira vez

em um artigo publicado por Osborne Reynolds, em 1886, contendo não apenas a equação diferencial do filme de fluido lubrificado, mas também uma comparação entre esta teoria e os resultados experimentais obtidos por Tower (1883). Ainda conforme HAMROCK [16], a equação de Reynolds pode ser obtida por meio de duas formas, sendo elas: as equações de Navier-Stokes e da continuidade; e o princípio de conservação de massa.

A equação de Reynolds, após os cálculos e simplificações das equações de Navier-Stokes e da continuidade (conforme visto em [16]), é apresentada pela Equação (01), onde ρ é a densidade do fluido, h a altura do filme (distância entre a superfície vibratória e o objeto), p a distribuição de pressão, η a viscosidade absoluta, t o tempo, u e v as respectivas velocidades nas direções x e y e a e b os subscritos referentes aos limites superior e inferior do filme.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h(u_a + u_b)}{2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho h(v_a + v_b)}{2} \right] + \rho(w_a - w_b) - \rho u_a \frac{\partial h}{\partial x} \\ - \rho v_a \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \end{aligned} \quad (01)$$

Na equação anterior, $w_a = u_a \frac{\partial h}{\partial x} + v_a \frac{\partial h}{\partial y}$ e $w_b = 0$ para somente ação de movimento tangencial.

HAMROCK [16] afirma que os dois primeiros termos da Equação (01) são referentes aos termos de Poiseuille, que descrevem as vazões líquidas devido aos gradientes de pressão na área lubrificada. O terceiro e quarto termos são os termos de Couette e representam as vazões líquidas de arrasto devido às velocidades de cada superfície. O quinto, sexto e sétimo termos representam as vazões líquidas devido ao movimento de compressão do fluido e, por fim, o último termo refere-se às vazões líquidas devido à expansão local.

A partir da Equação (01), ZHAO [1] admite como considerações para um sistema de levitação por filme de fluido comprimido, tal qual o representado na Figura 2.9, que as velocidades u_a , u_b , v_a e v_b são nulas (visto que não existe movimento lateral). ZHAO [1] também utiliza a equação do gás perfeito, Equação (02), para obter o valor da densidade em função da pressão e considera suficiente para o modelo ser um caso unidimensional. Assim, substituindo a Equação (02) na (01) e considerando as simplificações, tem-se a Equação (03).

$$\rho = \frac{p}{Rt_m} \quad (02)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ph^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial(ph)}{\partial t} \quad (03)$$

Adimensionalizando os parâmetros conforme as equações definidas em (04), onde p_0 é a pressão atmosférica, h_0 a altura inicial do filme, L o comprimento característico da superfície acionadora, $w = 2\pi f$ a frequência angular e σ o número de compressão, tem-se a Equação (05). Esta última equação (caracterizada como uma equação diferencial parcial de segunda ordem) modela o comportamento dinâmico do campo de pressão do filme de fluido com considerações de regime transiente, escoamento laminar e compressível de um fluido Newtoniano. A Equação (05) trata-se de um sistema de equações diferenciais parciais (denominadas EDPs) que pode ser resolvida através da discretização no espaço, obtendo equações diferenciais ordinárias que são integradas no tempo (obtendo soluções aproximadas). A adimensionalização contribui para a precisão dos resultados durante a solução numérica (visto que é trabalhado com altas frequências e o reduzido espaçamento entre superfícies).

$$P = \frac{p}{p_0}, H = \frac{h}{h_0}, X = \frac{x}{L}, T = wt, \sigma = \frac{12w\eta L^2}{p_0 h_0^2} \quad (04)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(PH^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \quad (05)$$

Como visto, na Figura 2.9, com o acionamento do transdutor a superfície vibratória inicia um movimento oscilatório caracterizado (de modo simplificado) por uma função harmônica, conforme mostra a Equação (06). Vale ressaltar que devido a geometria, o sistema é considerado simétrico.

$$h(t) = h_0 + \delta h \sin(wt) \quad (06)$$

Ao adimensionalizar a Equação (06), substituindo pelas equações em (07), tem-se a equação da variação da distância adimensionalizada (Equação (08)).

$$\epsilon = \frac{\delta h}{h_0}, T = wt \quad (07)$$

$$H = 1 + \epsilon \sin(T) \quad (08)$$

Dessa forma, com as Equações (05) e (08) é possível estabelecer a solução para a equação de Reynolds de duas formas distintas (segundo ZHAO [1]): uma analítica e a outra numérica. É importante ressaltar que, para o sistema ilustrado na Figura 2.9 (e consequentemente neste trabalho) as pressões no tempo inicial ($t = 0$) e nas bordas dos discos ($X = 0,5$) são iguais a atmosférica. Além disso, a primeira derivada espacial da pressão no centro dos discos ($X = 0$) é nula. Essas condições são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Condições adotadas

Condição	Representação Matemática
Inicial	$P(X, T = 0) = 1$
Dirichlet	$P(X = 0,5, T) = 1$
Neumann	$\frac{\partial P(X = 0, T)}{\partial X} = 0$

A primeira forma de resolução consiste em uma solução aproximada da equação de Reynolds para condições com alto número de compressão (σ), onde é realizado o cálculo a partir das condições de contorno e da integração no tempo (o memorial de cálculo pode ser visto em ZHAO [1]). Logo, a solução aproximada é apresentada na Equação (09), onde a mesma indica uma média de pressão ao longo do filme de fluido.

$$\bar{P} = \sqrt{\frac{1 + \frac{3}{2}\epsilon^2}{1 - \epsilon^2}} \quad (09)$$

O segundo método trata-se de uma solução numérica, que obtém a distribuição do campo de pressão ao longo do filme de fluido através da utilização do método das diferenças finitas. Dessa maneira, a Equação (05) é discretizada em N elementos espaciais de comprimento ΔX ,

transformando-se em um conjunto de equações diferenciais ordinárias normalizadas no tempo, conforme mostra a Equação (10).

$$\sigma \frac{dP_i(T)}{dT} = -\sigma \frac{P_i(T)}{H} \frac{dH}{dT} + \frac{H^2}{X_i} \frac{1}{2\Delta X^2} \left[X_{i+\frac{1}{2}} (P_{i+1}^2 - P_i^2) - X_{i-\frac{1}{2}} (P_i^2 - P_{i-1}^2) \right] \quad (10)$$

2.3. A FERRAMENTA COMSOL MULTIPHYSICS® E SEU EQUACIONAMENTO

O software COMSOL Multiphysics® (lançado sua primeira versão em 1998 por Dr. h.c. Svante Littmarck e Mr. Farhad Saeidi, fundadores da empresa [21]) consiste em uma plataforma de análise e simulações de sistemas com interações de diferentes físicas acopladas, envolvendo elementos finitos. Tais físicas encontradas no mesmo são divididas em áreas de aplicação, entre algumas delas a Acústica/Mecânica, a Elétrica/Magnética, o Fluido/Transferência de Calor, a Química e uma categoria multiuso (destacando para processos de otimização ou de trajetória de partículas). O software permite realizar diversas aplicações envolvendo problemas clássicos, além de resolver equações diferenciais parciais de forma fraca, ao discretizar a geometria em elementos finitos (FEM) transformando o modelo em um conjunto de equações diferenciais ordinárias (ODEs), sendo tais equações resolvidas utilizando métodos implícitos ou explícitos para passos de tempo [21].

Para o caso de um sistema de levitação acústica, os módulos de física utilizadas no software consistem, principalmente, nos módulos de acústica e mecânico, estabelecendo uma interação entre os dois módulos. Para este trabalho, também será considerado o efeito da pressão de radiação acústica sobre a temperatura e, para isso, o módulo de acústica reserva a condição térmica acoplada com o efeito acústico.

O software trabalha com um modelo acústico através das equações do momento de Euler (11) e da equação da continuidade (12), ou seja, equações para escoamentos compressíveis e sem perdas (sem condutividade térmica e sem viscosidade). Para a pressão acústica clássica, todos os processos termodinâmicos são considerados reversíveis e adiabáticos (processo isentrópico). A solução de pequenas variações de pressão acústica em relação a pressão estacionária resulta em um processo de expansão dos pequenos parâmetros em torno do valor estacionário, logo,

essas pequenas expansões são feitas para a pressão, a densidade e a velocidade do fluido, nas equações em (13).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p' \\ \rho &= \rho_0 + \rho' \text{ com } p' \ll p_0 \\ u &= 0 + u' \quad \rho' \ll \rho_0 \end{aligned} \quad (13)$$

Inserindo as equações em (13) nas Equações (11) e (12), permanecendo com os termos lineares, têm-se as Equações (14) e (15).

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 (\nabla \cdot u') = 0 \quad (15)$$

A variável dependente da densidade é expressa em função da pressão, utilizando expansão de Taylor (uma linearização), conforme mostra a Equação (16). Por fim é rearranjado as equações, inserindo a equação do momento na continuidade, o que resulta na Equação (17) relativa à distribuição de pressão formada por ondas acústicas no meio, sem perdas envolvidas.

$$\rho' = \left. \frac{\partial \rho_0}{\partial p} \right|_s p' = \frac{1}{c_s^2} p' \quad (16)$$

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) = Q_m \quad (17)$$

O parâmetro c_s refere-se à velocidade do som para a entropia constante, q_d é o termo da fonte dipolo [N/m^3] e Q_m é o termo da fonte monopolo [$1/s^2$], estes termos de fonte são opcionais. O termo ρc^2 é denominado módulo de massa (ou K), expresso em [N/m^2]. Caso a onda seja de natureza harmônica, cuja pressão varia com o tempo tal qual a Equação (18), a Equação (17) é reduzida para uma equação não homogênea de Helmholtz, expressa na Equação (19), sendo esta resolvida por meio da solução de autovalor da equação diferencial parcial (quando removidos os termos fontes).

$$p(x, t) = p(x) e^{i\omega t} \quad (18)$$

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q_d) \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho c^2} = Q_m \quad (19)$$

O software também conta com a interface do escoamento do filme de fluido, onde o escoamento atravessa por uma área fina entre duas superfícies, conforme é visto na Figura 2.10. Para admitir que não existe curvatura na superfície de referência, é necessário que $\frac{h}{L} \ll 1$.

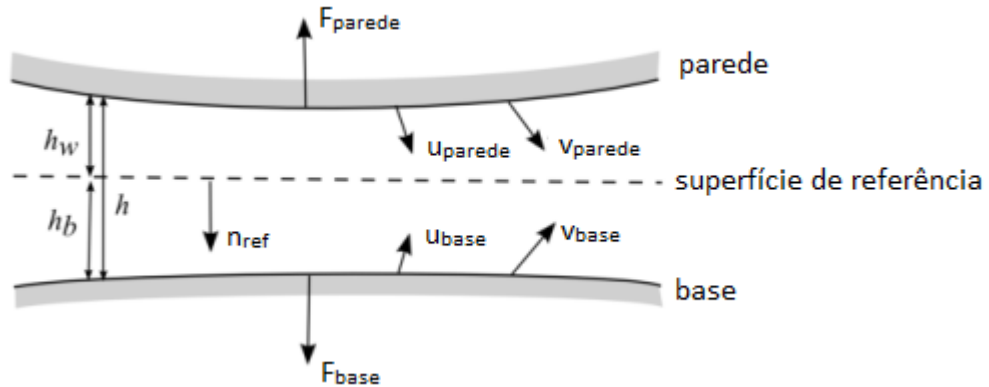


Figura 2.10: Ilustração do sistema do escoamento para fluidos em camadas finas. Fonte: [21]

Esta interface também utiliza a equação de Reynolds, expressa pelas Equações (20) e (21), onde v_{ave} é a média de velocidade do escoamento em relação à referência, sendo o termo w referente à parede e b relativo à base.

$$\begin{aligned}
 h_w &= h_{w1} - u_w \cdot n_{ref} - u_w \cdot \nabla_t h_{w1} \\
 h_b &= h_{b1} + u_b \cdot n_{ref} - u_b \cdot \nabla_t h_{b1} \\
 h &= h_w + h_b \quad p_A = p_{ref} + p_f \quad v_{ave} = \frac{1}{2}(v_{w,t} + v_{b,t}) - \frac{h^2}{12\eta} \nabla_t p_f
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (p_A h) + \nabla_t \cdot (h p_A v_{ave}) = 0 \tag{21}$$

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este trabalho apresenta a elaboração de um modelo de levitação acústica de campo próximo (baseado na fundamentação teórica e nas condições de dimensionamento estabelecidas previamente), de modo que se espera uma comparação final entre tipos diferentes de análises. Para isso, será utilizado duas formas de modelagem numérica, a primeira baseada na resolução da equação de Reynolds para o filme de ar entre a superfície acionadora e o objeto (com o auxílio dos modelos implementados no Laboratório de Mecânica de Estruturas Professor José Eduardo Tannús Reis - LMEST), já a segunda modelagem trata-se de um conjunto de simulações realizadas através de um software específico.

3.1. PARÂMETROS INICIAIS

Os parâmetros gerais necessários para a execução dos modelos foram baseados nos dados utilizados nos modelos do Laboratório de Mecânica de Estruturas Professor José Eduardo Tannús Reis (LMEST) e segundo ZHAO [1], sendo que os resultados obtidos por estes modelos também serão utilizados para comparação. A Tabela 3.1 indica tais valores.

Tabela 3.1: Parâmetros gerais do modelo

Raio do disco acionador (R_{sa})	<i>0,06 m</i>
Raio do disco levitado (R_{ol})	<i>0,06 m</i>
Espessura do disco levitado (T_{ol})	<i>0,0013 m</i>
Material do disco acionador	<i>Alumínio</i>
Material do disco levitado	<i>Plástico</i>
Frequência do sistema (f_0)	<i>20 kHz</i>
Viscosidade dinâmica do ar (η)	<i>$1,8253 * 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$</i>
Pressão atmosférica (p)	<i>$1,01325 * 10^5 \text{ Pa}$</i>

A Tabela 3.2 mostra os tipos de análises a serem realizadas.

Tabela 3.2: Tipos de análises

Análise	Condições
Normal (regime transiente) para disco fixo (MATLAB® e COMSOL®)	$\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$
Influência na temperatura para disco fixo (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
Influência na flexibilidade para disco fixo (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco fixo (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
Normal (regime transiente) para disco livre (MATLAB® e COMSOL®)	$\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$
Influência na temperatura para disco livre (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
Influência na flexibilidade para disco livre (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco livre (COMSOL® apenas)	$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$

3.2. MODELAGEM NUMÉRICA – VIA SOFTWARE MATLAB®

Conforme citado no capítulo anterior, o comportamento do filme de ar comprimido entre a superfície acionadora e o objeto a ser levantado pode ser representado pela equação de Reynolds (equação que estabelece a distribuição de pressão de um filme de fluido entre duas superfícies opostas, conforme ZHAO [1]).

Para tal modelagem, considerou-se a solução da Equação (05) utilizando o método de resolução de um sistema de equações diferenciais parciais (EDPs), com uma dimensão e variando no tempo. Logo, a partir desta equação, associada com as condições vistas na Tabela 2.1, é possível desenvolver um algoritmo no software MATLAB® que permite obter o campo de pressão do filme de fluido ao longo do disco e com variação temporal.

Após a confecção, o código permite variar os parâmetros do número de compressão (σ), da amplitude de vibração adimensional (ϵ), do tempo (t) e do comprimento característico do disco (L). Isso permite realizar diversas combinações entre o número de compressão e a amplitude, de forma a analisar o comportamento e a influência que tais variáveis produzem no sistema. A Figura 3.1 ilustra o fluxograma do código elaborado.

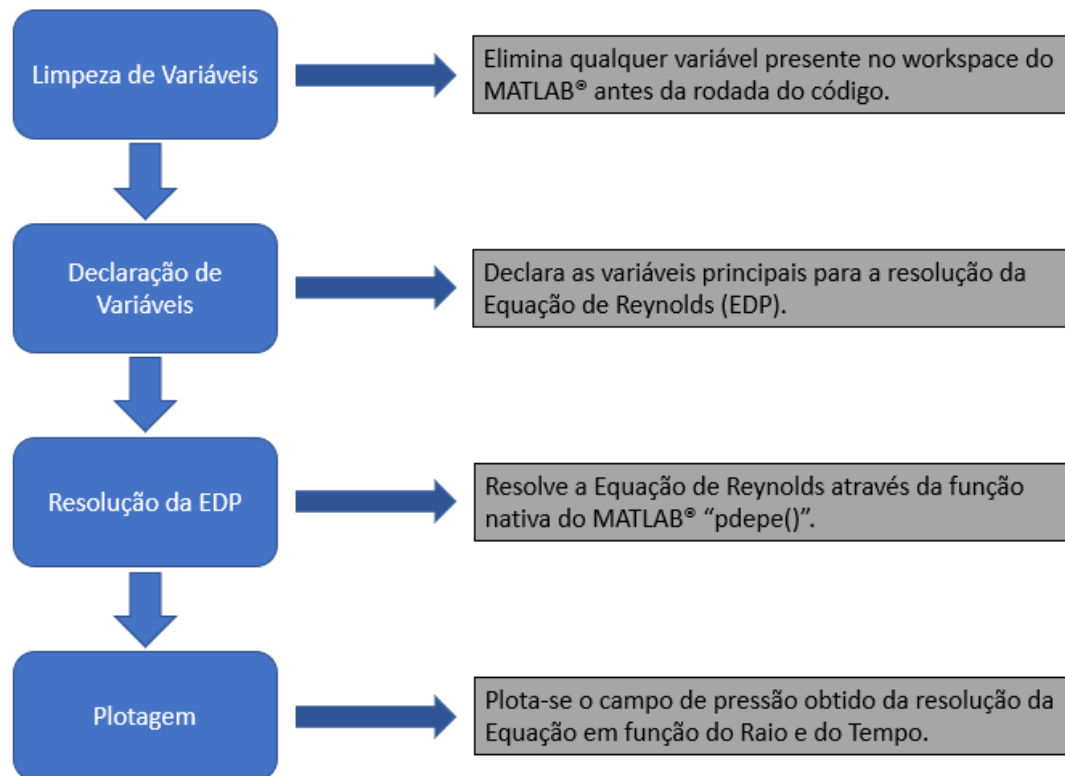


Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo elaborado para a solução da equação de Reynolds. Fonte: Autor

Vale ressaltar que os gráficos obtidos relacionam o campo de pressão em função da coordenada radial e do tempo (variáveis adimensionais devido à equação de Reynolds estar adimensionalizada, conforme a Equação (05)), para determinados valores de ϵ e σ .

3.3. MODELAGEM NUMÉRICA – VIA SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®

De forma a comparar os resultados do modelo construído via software MATLAB®, realizou-se uma nova modelagem, sendo esta executada no software COMSOL Multiphysics®. A configuração adotada para a física do modelo foi alterada conforme a análise realizada, portanto, a Tabela 3.3 indica cada tipo de física e estudo adotado no software.

Tabela 3.3: Físicas e estudos utilizados para cada configuração analisada

Análise	Físicas Utilizadas
Normal (regime transiente) para disco fixo (MATLAB® e COMSOL®)	 Thin-Film Flow, Edge (tffs)
Influência na temperatura para disco fixo (COMSOL® apenas)	 Thin-Film Flow, Edge (tffs)  Heat Transfer in Films (htlsh)
Influência na flexibilidade para disco fixo (COMSOL® apenas)	 Thin-Film Flow, Edge (tffs)  Solid Mechanics (solid)
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco fixo (COMSOL® apenas)	 Thin-Film Flow, Edge (tffs)  Solid Mechanics (solid)  Heat Transfer in Films (htlsh)
Normal (regime transiente) para disco livre (MATLAB® e COMSOL®)	 Thin-Film Flow, Edge (tffs)

Influência na temperatura para disco livre (COMSOL® apenas)	 Thin-Film Flow, Edge (<i>tffs</i>)  Heat Transfer in Films (<i>htlsh</i>)
Influência na flexibilidade para disco livre (COMSOL® apenas)	 Pressure Acoustics, Transient (<i>actd</i>)  Solid Mechanics (<i>solid</i>)
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco livre (COMSOL® apenas)	 Pressure Acoustics, Transient (<i>actd</i>)  Solid Mechanics (<i>solid</i>)  Heat Transfer in Fluids (<i>ht</i>)

É possível observar da Tabela 3.3 que o modelo seguirá uma análise transiente (ou seja, dependente do tempo), para condições de escoamento em camadas finas, acoplado com transferência de calor (para análises da influência na temperatura) ou mecânica dos sólidos (para análises da influência na flexibilidade). Para a condição de disco livre com influência na flexibilidade (assim como o conjunto temperatura/flexibilidade para disco livre), o modelo seguido será a interação acústica-estrutural. Será avaliado também, além da influência na temperatura e flexibilidade, a influência dos dois efeitos acoplados no sistema. As análises citadas apresentam condições de variação do número de compressão (σ) e da amplitude de vibração adimensional (ϵ), conforme é visto na referência utilizada em FERREIRA et al. [3], para efeito de comparação com o modelo em MATLAB®.

Por fim, foi elaborada uma estratégia para a execução do modelo e de suas condições, sendo tal planejamento tratado a seguir.

3.3.1. OBTENÇÃO DA ESPESSURA DA SUPERFÍCIE ACIONADORA E DO FILME DE FLUIDO

A determinação dos parâmetros geométricos da superfície vibratória e do objeto foram baseados em ZHAO [1], ao tratar a superfície acionadora como um disco de alumínio e o objeto um disco compacto (CD). Dessa forma, foram estabelecidos os parâmetros de raio para as duas peças e a espessura do objeto (Tabela 3.1). Já a espessura do disco acionador foi estabelecida a partir da análise modal do mesmo, de modo que a espessura resultante produz no disco uma frequência natural de 20 *kHz* (frequência utilizada por [1], [2], [3] e [4]). A geração da malha foi da ordem de $1\text{e-}5\text{ m}$, para o mínimo comprimento do elemento, a $1\text{e-}3\text{ m}$, para o máximo comprimento, resultando em um tempo computacional de 4 *s* (o processo de refinamento da malha não alterou de forma significativa o valor da espessura, nem o tempo computacional). Assim, a espessura encontrada para o disco acionador foi de 0,0085 *m* e a Figura 3.2 mostra o segundo modo de vibrar do disco para a espessura encontrada (vale ressaltar que a simulação foi realizada para uma condição axissimétrica). O efeito da frequência natural no disco será utilizado para analisar o efeito da flexibilidade.

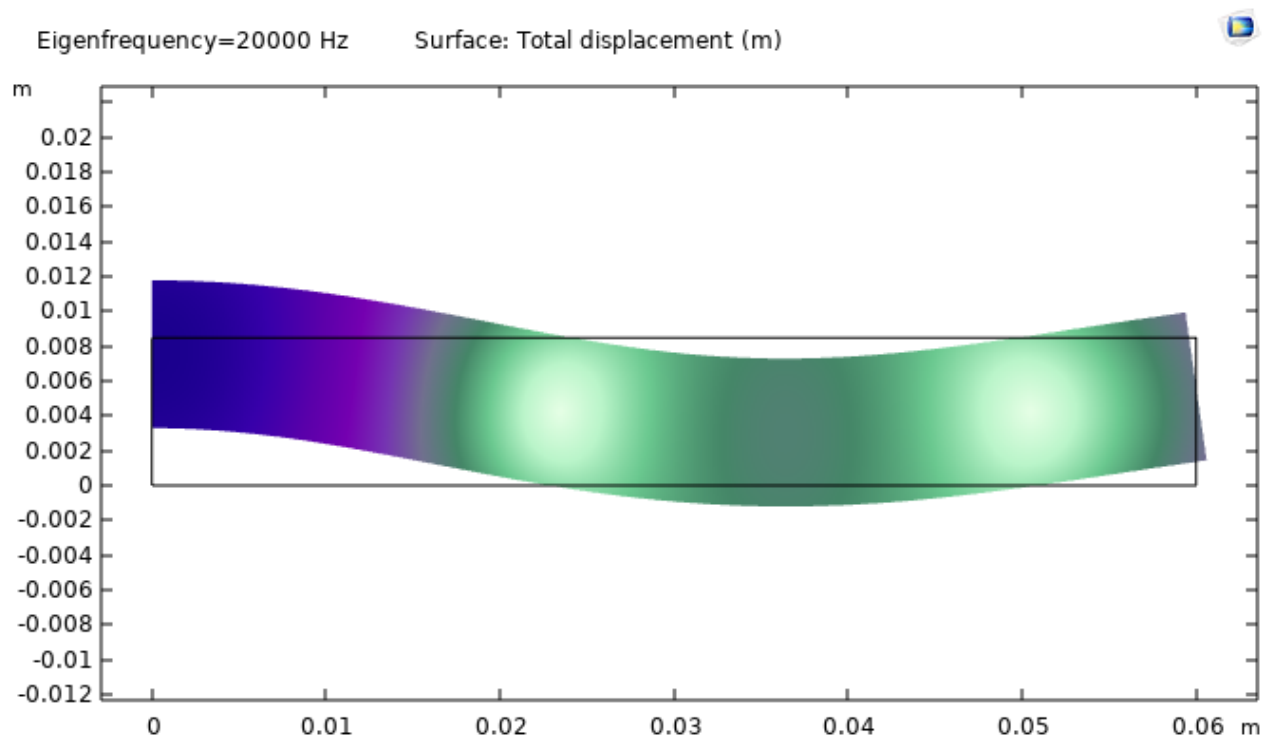


Figura 3.2: Análise modal da superfície acionadora. Fonte: Autor

Para obter modelos com variação de ϵ e σ , a espessura do filme de fluido foi determinada conforme ajuste da equação de σ , em (04), obtendo a Equação (22). Para obter o valor da amplitude que a superfície acionadora irá deslocar harmonicamente, utilizou-se da expressão de ϵ , conforme mostrado na Equação (04), sendo esta especificada na Equação (23).

$$h_0 = \sqrt{\frac{12w\eta L^2}{p_0\sigma}} \quad (22)$$

$$\delta h = \epsilon h_0 \quad (23)$$

Dessa forma, os valores da altura da camada de fluido (h_0) e da amplitude de vibração (δh) são dispostos na Tabela 3.4, conforme variação do número de compressão (σ) e da amplitude de vibração adimensional (ϵ).

Tabela 3.4: Valores de altura e amplitude de variação da camada do escoamento

Condição	h_0 [m]	δh [m]
$\epsilon = 0.01$ e $\sigma = 100$	$1,98 * 10^{-4}$	$1,98 * 10^{-6}$
$\epsilon = 0.5$ e $\sigma = 100$	$1,98 * 10^{-4}$	$9,89 * 10^{-5}$
$\epsilon = 0.9$ e $\sigma = 100$	$1,98 * 10^{-4}$	$1,78 * 10^{-4}$
$\epsilon = 0.5$ e $\sigma = 10$	$6,25 * 10^{-4}$	$3,13 * 10^{-4}$
$\epsilon = 0.5$ e $\sigma = 1000$	$6,25 * 10^{-5}$	$3,13 * 10^{-5}$

3.3.2. CONFECÇÃO INICIAL DO MODELO

Para as análises normais e para a influência na temperatura (ambas com disco superior fixo) a geometria foi baseada em uma linha reta de revolução com dimensão do raio do disco acionador, estabelecendo as condições de contorno para o fluido. Para a influência na flexibilidade (com disco superior fixo), a geometria foi gerada para um retângulo de revolução com raio do disco acionador, de modo a adicionar o efeito da flexibilidade sobre a análise do fluido. Para a análise

com o disco superior livre utilizou-se do retângulo de revolução, porém com a adição do efeito da gravidade do disco levitado, inserindo o efeito de liberdade no mesmo. Por fim, a análise do efeito na flexibilidade de disco superior livre consistiu na geometria dos dois discos, associado com o domínio de fluido (no caso, ar). Vale lembrar que todas as simulações foram feitas para condição axissimétrica, o que estabelece um grau de simetria no eixo z . Portanto, as Figuras 3.3 a 3.6 ilustram, respectivamente, a geometria construída e a malha gerada para as diferentes configurações e a Tabela 3.5 faz uma associação entre cada análise com o tipo de geometria e malha de suas respectivas Figuras.

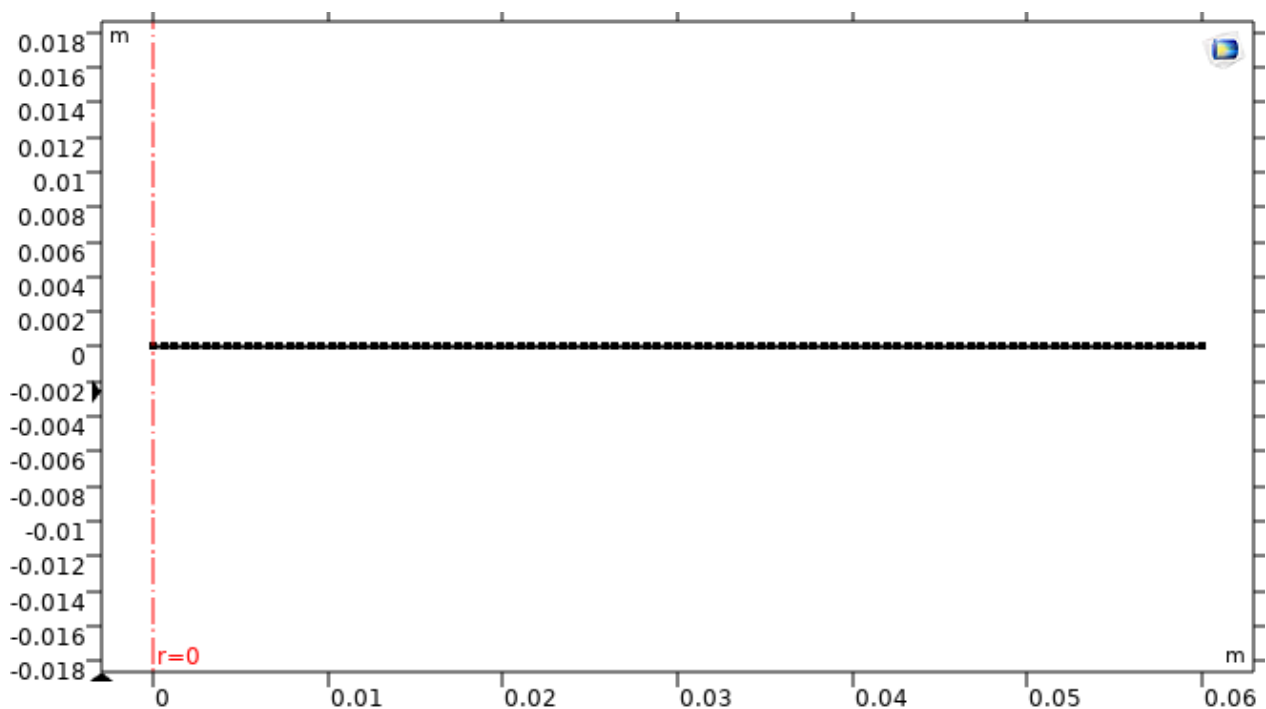


Figura 3.3: Geometria e malha para simulações normal (disco fixo) e para influência na temperatura. Fonte: Autor

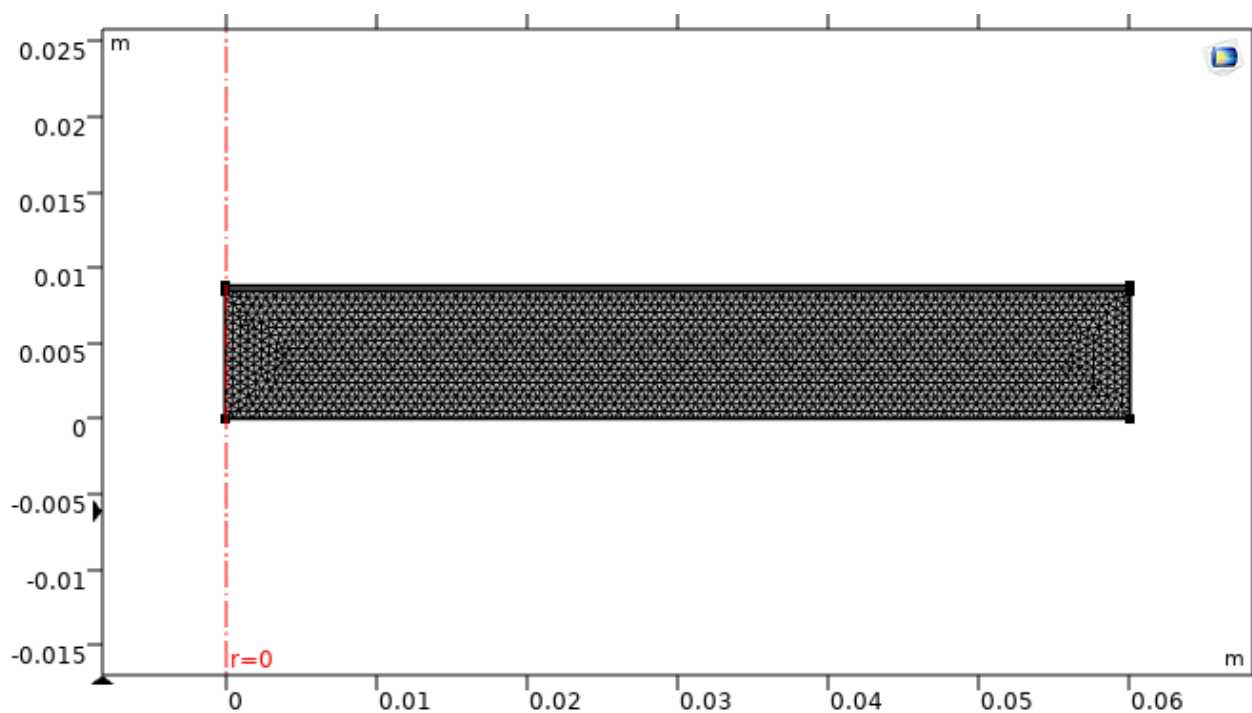


Figura 3.4: Geometria e malha para simulação de influência na flexibilidade. Fonte: Autor

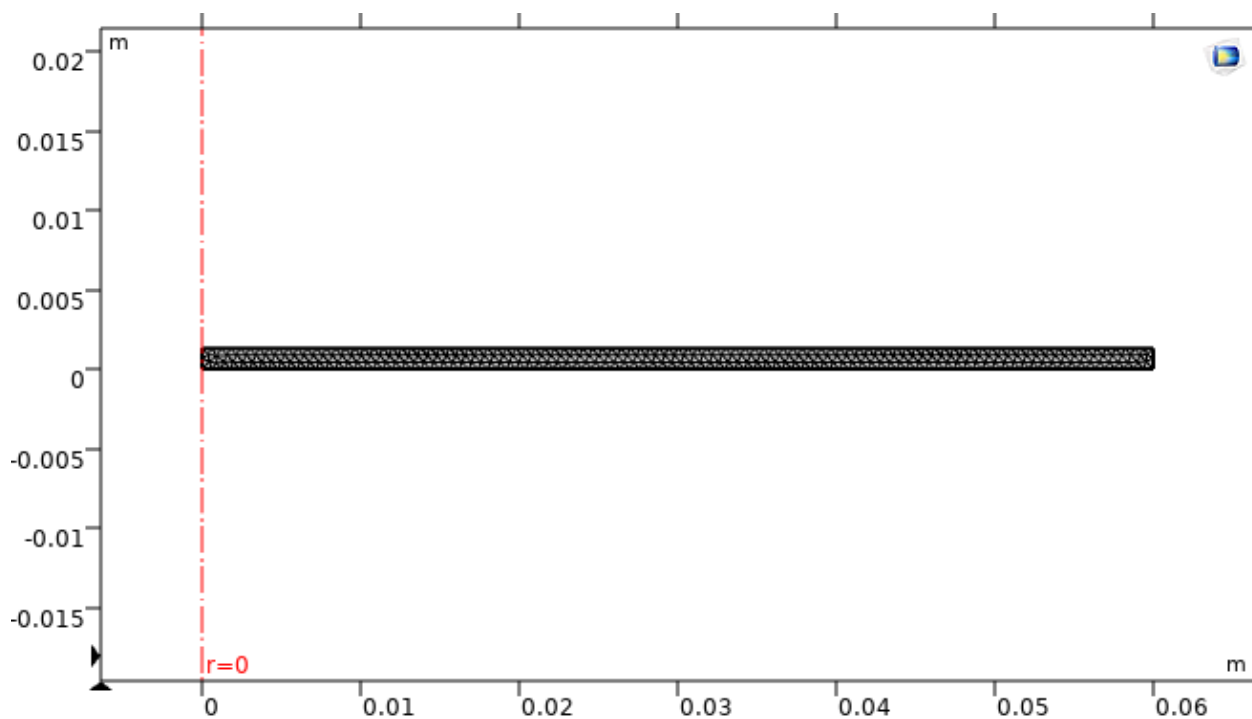


Figura 3.5: Geometria e malha para simulação de disco livre. Fonte: Autor

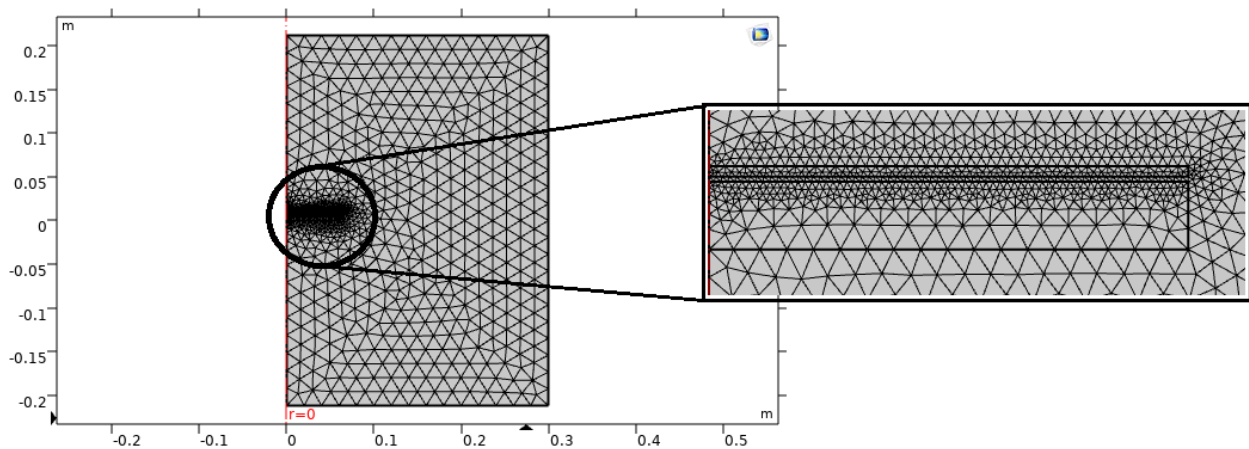


Figura 3.6: Geometria e malha para simulação conjunta de temperatura e flexibilidade para disco livre. Fonte: Autor

Tabela 3.5: Associação entre as análises com a geometria e malha utilizados

Análise	Geometria/Malha associada
Normal (regime transiente) para disco fixo	Figura 3.3
Influência na temperatura para disco fixo	Figura 3.3
Influência na flexibilidade para disco fixo	Figura 3.4
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco fixo	Figura 3.4
Normal (regime transiente) para disco livre	Figura 3.5
Influência na temperatura para disco livre	Figura 3.5
Influência na flexibilidade para disco livre	Figura 3.6
Influência conjunta na temperatura e flexibilidade para disco livre	Figura 3.6

As condições de contorno para cada simulação são dispostas a seguir.

3.3.3. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR FIXO

O primeiro modelo foi elaborado para uma condição de regime transiente, com o disco superior (no caso, o objeto a ser levitado) fixo. Para isso, foi inserido no software o estudo “time dependent” (estudo relativo à variação temporal do sistema), associado com a física “Thin-Film Flow” apenas. Além disso, foi adicionado uma condição de deslocamento para a geometria, de forma a descrever o movimento harmônico representado pela Equação (06), pressão inicial como sendo a atmosférica e deslocamentos iniciais nulos. A Figura 3.7 indica as condições de contorno impostas, onde z_{ol} refere-se a h . As simulações duraram cerca de 4 segundos cada.

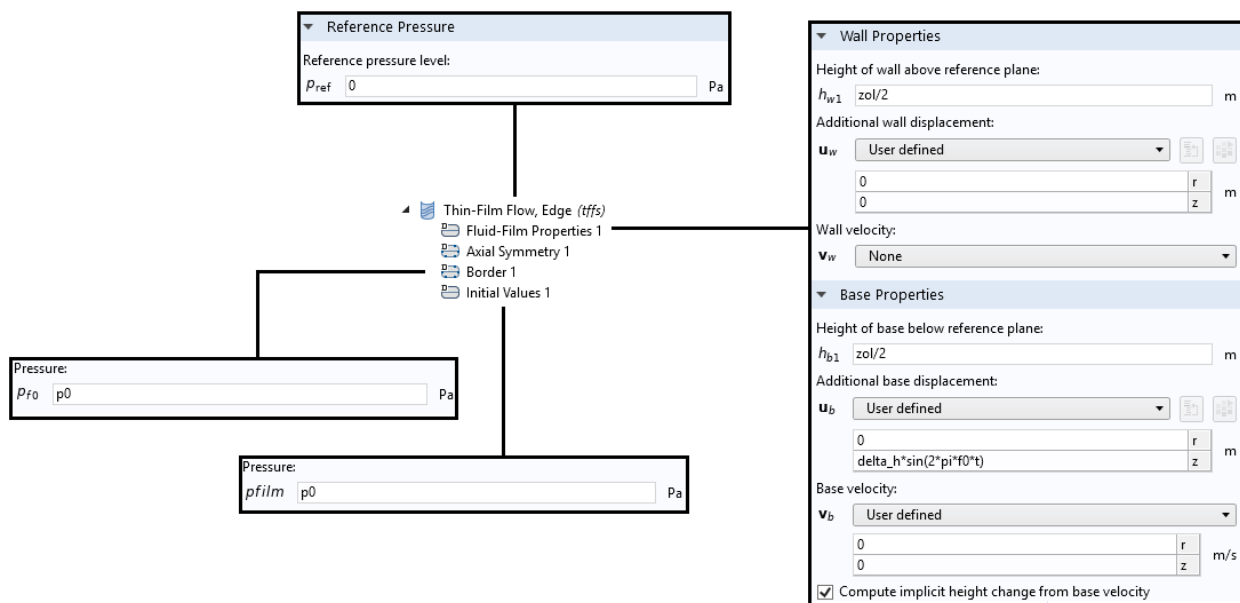


Figura 3.7: Condições de contorno para regime transiente e com disco superior fixo. Fonte: Autor

3.3.4. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR FIXO

É avaliado como a temperatura é influenciada no decorrer do tempo de levitação, portanto, foi utilizado as mesmas configurações do modelo anterior, com a adição da transferência de calor para escoamentos de fina camada no sistema, de forma que a temperatura inicial seja a ambiente. Dessa maneira, a Figura 3.8 revela as condições de contorno impostas para o problema térmico. O tempo de simulação foi da ordem de 44 segundos.

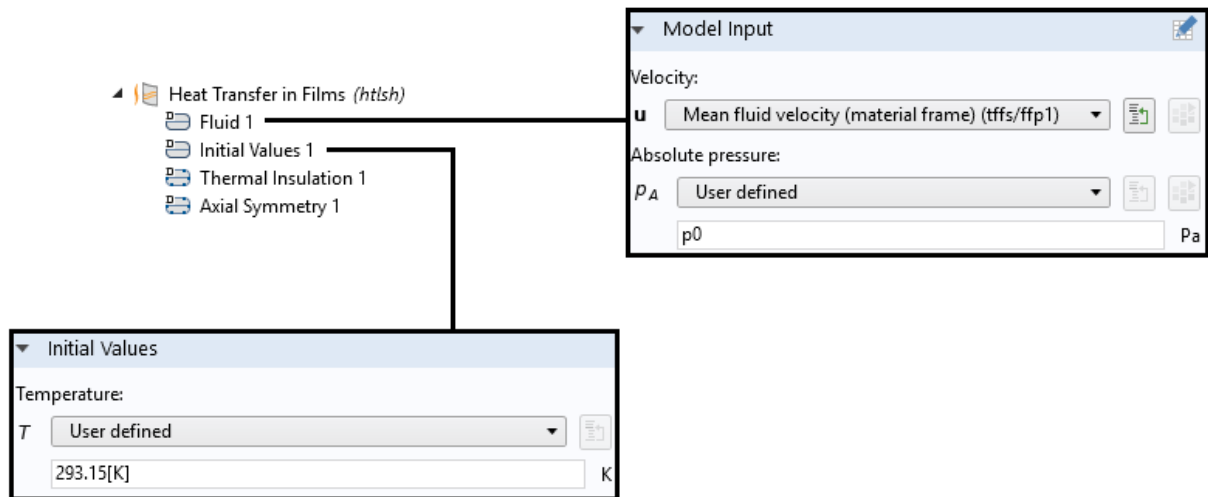


Figura 3.8: Condições de contorno para a influência na temperatura e com disco superior fixo.

Fonte: Autor

3.3.5. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO

Para a análise da influência na flexibilidade foi adicionado o efeito do modo de vibrar do disco acionador (tal qual analisado no item 3.3.1). Dessa forma, além da física do escoamento de camada fina, a física de mecânica dos sólidos foi inserida, implementando a condição de deslocamento no ponto central do disco acionador o comportamento harmônico, Equação (06). Assim, a Figura 3.9 mostra as condições de contorno impostas para o disco. As simulações duraram cerca de 23 segundos.

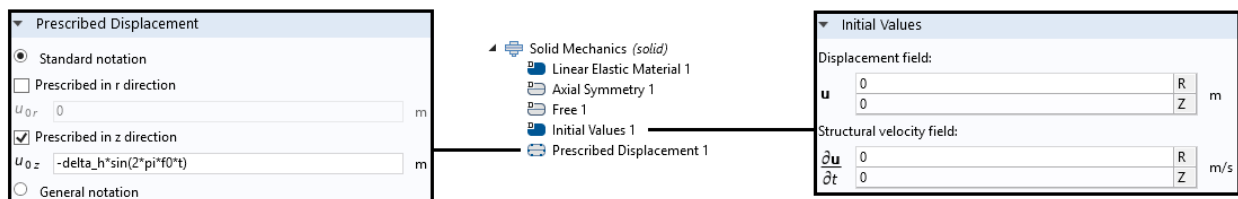


Figura 3.9: Condições de contorno para a influência na flexibilidade e com disco superior fixo.

Fonte: Autor

3.3.6. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO

Tal análise foi realizada unindo as condições de contorno e interações impostas nas duas análises anteriores (relativas as análises das influências de temperatura e flexibilidade, separadamente), portanto, as condições de contorno são referentes as dos itens acima (3.3.3, 3.3.4 e 3.3.5). O tempo de simulação foi cerca de 30 segundos.

3.3.7. DISCO SUPERIOR LIVRE

Para a condição do objeto a ser levantado livre, foi inserido nas simulações o disco levantado, ou seja, foi adicionado no modelo o efeito da gravidade. Logo, as análises realizadas para o disco superior fixo também são realizadas para o disco livre, sendo indicado na Figura 3.11 a condição de contorno imposta. Esta condição de simulação foi feita até a influência na temperatura, o efeito na flexibilidade foi realizado em outra metodologia. O tempo da simulação foi cerca de 5 segundos.

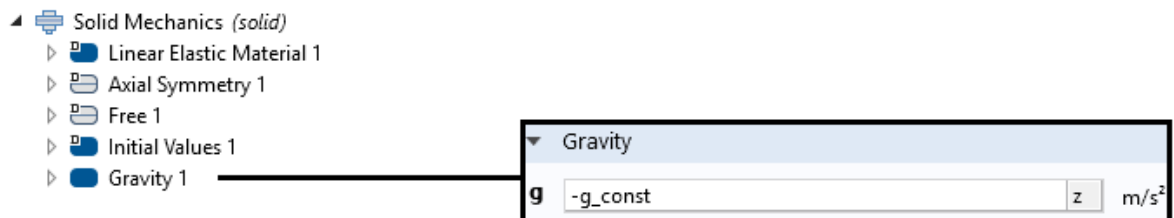


Figura 3.10: Condições de contorno para regime transiente e com disco superior livre. Fonte: Autor

Por fim, os resultados obtidos em cada análise são comparados com a metodologia desenvolvida no software MATLAB®, de forma que os gráficos resultantes também se referem ao campo de

pressão em função da coordenada radial e do tempo adimensionais (através do tratamento dos dados exportados do COMSOL® para o MATLAB®). Os resultados são discutidos no capítulo a seguir.

3.3.8. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE

Para a condição de influência na flexibilidade para disco superior livre, foi realizado a metodologia da interação acústica-estrutural, onde é imputado uma condição de deslocamento harmônico do disco acionador sobre o domínio do fluido. Como trata-se do disco superior livre, o efeito da gravidade é inserido no disco superior. Portanto, a Figura 3.11 revela as condições de simulação para tal caso. O tempo de simulação foi de 2 minutos.

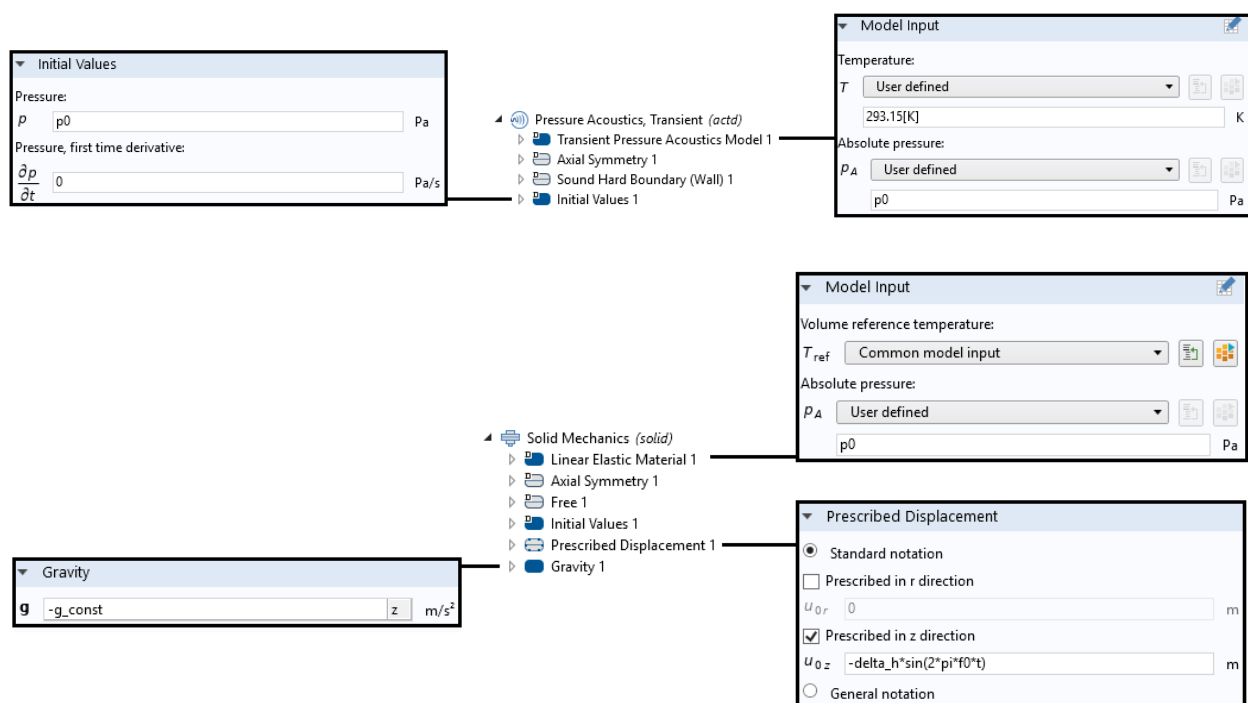


Figura 3.11: Condições de contorno para a influência na flexibilidade com disco superior livre.

Fonte: Autor

3.3.9. ANÁLISE CONJUNTA DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE

Por fim, para a última análise é inserido na interação acústica-estrutural o módulo de transferência de calor em fluidos, permitindo analisar a variação de temperatura devido ao efeito da flexibilidade em disco livre. Logo, a Figura 3.12 indica os parâmetros impostos para tal módulo. O tempo de simulação foi de 2 minutos e 28 segundos.

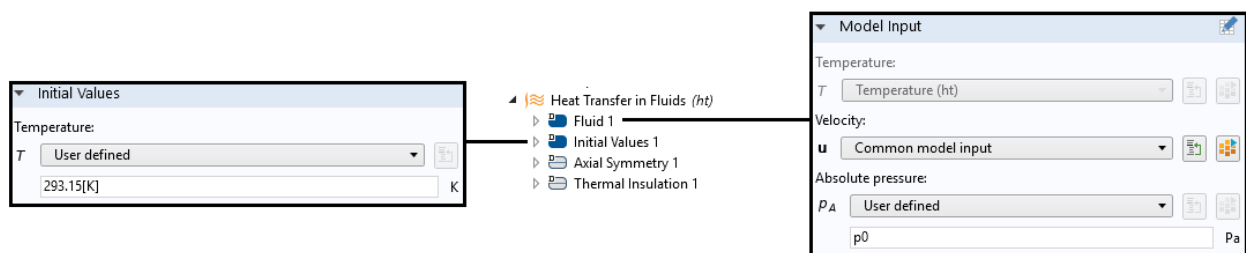


Figura 3.12: Condições de contorno para a análise conjunta da influência na temperatura e flexibilidade com disco superior livre. Fonte: Autor

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as devidas configurações de análise estabelecidas, as simulações foram executadas no ambiente MATLAB® e no software COMSOL Multiphysics®. Dessa forma, os resultados e discussões a respeito de cada configuração são mostrados a seguir. Vale ressaltar que para cada configuração normal (disco superior fixo e livre) será feita uma comparação entre os resultados obtidos no MATLAB® e no COMSOL®, de modo que os gráficos estarão dispostos lado a lado para melhor visualização. Para os efeitos na temperatura, será avaliado a variação da temperatura; para o efeito na flexibilidade será avaliado a pressão resultante em comparação com a simulação normal; e, por fim, a análise conjunta vai avaliar a variação de temperatura para a condição do efeito de flexibilidade. Vale ressaltar que as análises são feitas com unidades adimensionais para as duas metodologias, visto que houve um processo de adimensionalização da equação de Reynolds conforme visto na Equação (05).

4.1. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR FIXO

Para a primeira condição imposta, as Figuras 4.1 a 4.5 comparam os gráficos da distribuição de pressão do fluido e a Tabela 4.1 indica o erro em relação aos maiores valores de pressão das duas metodologias, sendo a curva da esquerda referente ao MATLAB® e, a da direita, referente ao COMSOL®.

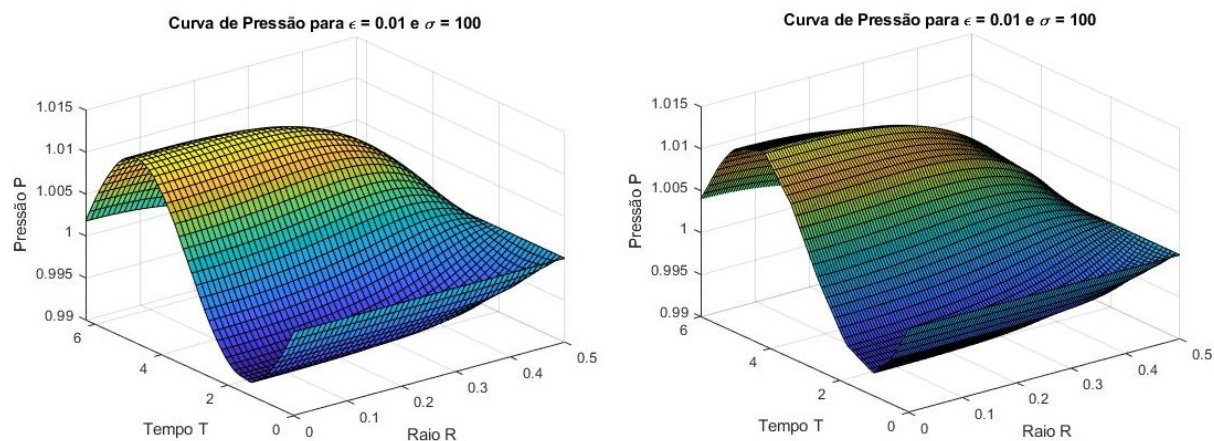


Figura 4.1: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

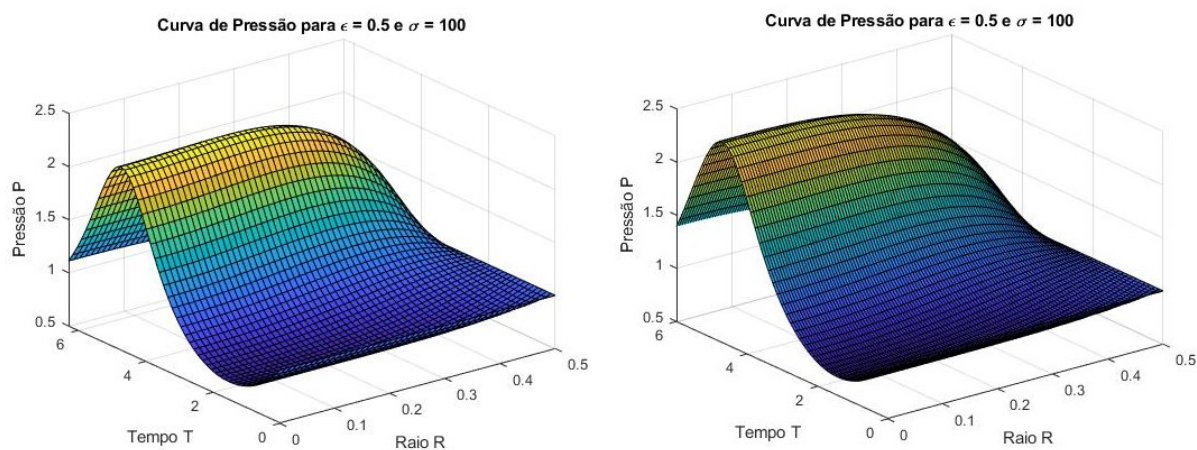


Figura 4.2: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

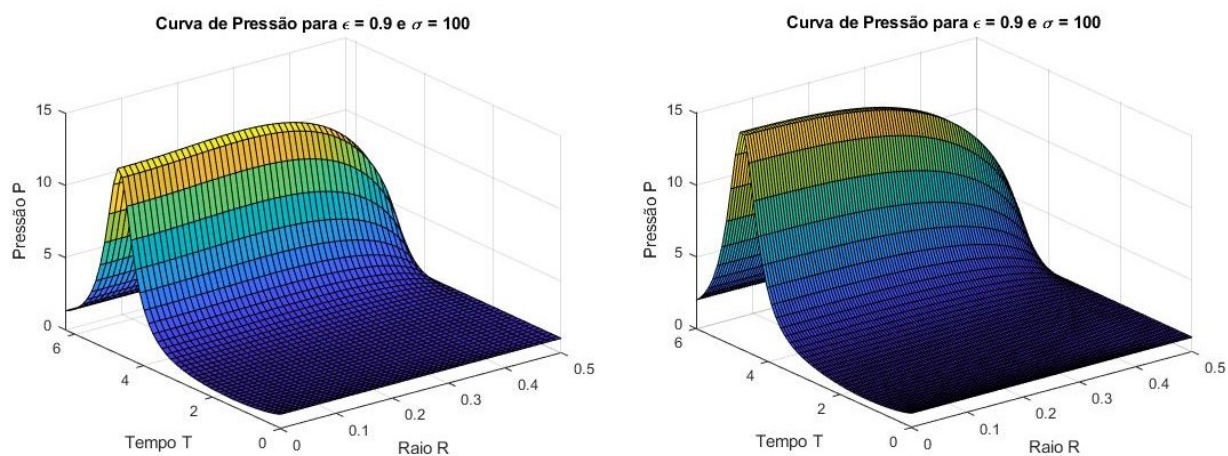


Figura 4.3: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

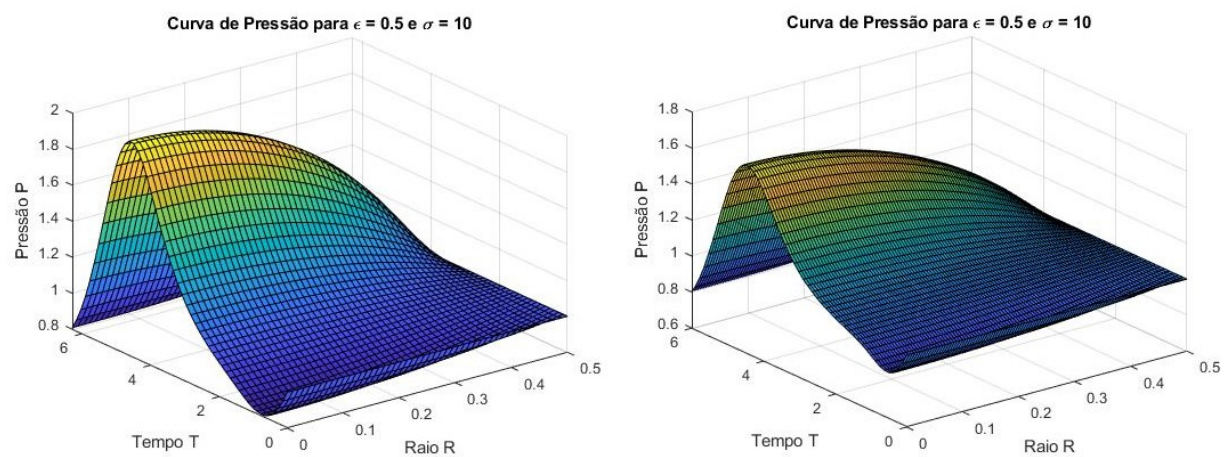


Figura 4.4: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

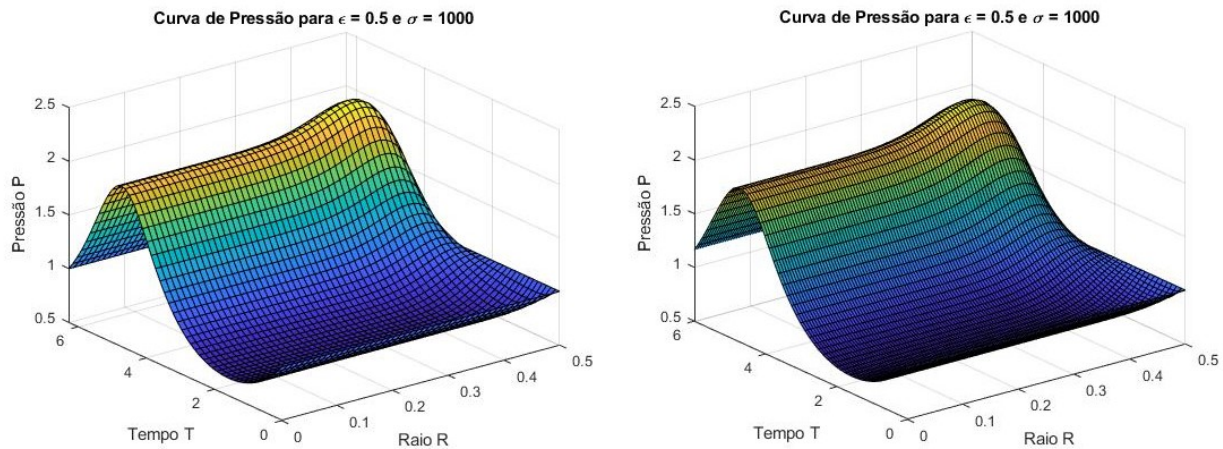


Figura 4.5: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$). Fonte: Autor

Tabela 4.1: Máximos valores de pressão obtidos

Condição	Pressão máxima [Pa] – MATLAB®	Pressão máxima [Pa] – COMSOL®	Erro relativo associado [%]
$\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$	$1,0255 * 10^5$	$1,0265 * 10^5$	0,0974
$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$	$2,2802 * 10^5$	$2,4187 * 10^5$	5,7262
$\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$	$1,3348 * 10^6$	$1,5286 * 10^6$	12,6783
$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$	$2,0171 * 10^5$	$1,6652 * 10^5$	21,1326
$\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$	$2,2450 * 10^5$	$2,2064 * 10^5$	1,7495

Ao analisar os gráficos e a Tabela 4.1, é possível notar a semelhança das curvas entre as duas metodologias, visto que os equacionamentos utilizados por cada uma se mostram semelhantes, diferenciando-os pelo termo de velocidade média inserido no COMSOL® enquanto que no MATLAB® usa-se o H^3 . O maior erro obtido na comparação foi de $3,5184 * 10^4 \text{ Pa}$, o que representa cerca de, aproximadamente, 34% da pressão atmosférica. Foi avaliado na condição $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$ um refinamento na discretização do tempo, diminuindo o passo temporal de $1 * 10^{-6} \text{ s}$ para $5 * 10^{-7} \text{ s}$, e observou-se um aumento na pressão máxima obtida do COMSOL® de $2,2064 * 10^5 \text{ Pa}$ para $2,2152 * 10^5 \text{ Pa}$ e, para $1 * 10^{-9} \text{ s}$, $2,2162 * 10^5 \text{ Pa}$ (uma variação de $9,7081 * 10^2 \text{ Pa}$). Isso revela que a discretização temporal influencia no cálculo do campo de

pressão, contudo, a tendência é uma convergência do valor de pressão mesmo aumentando a discretização. Logo, é possível inferir que os erros encontrados na Tabela 4.1 são relativos não apenas ao refinamento da simulação (embora haja tal fator envolvido) como também a considerações que o COMSOL® utiliza em sua análise (tal qual a velocidade média do escoamento).

Os dados revelam também que a variação da amplitude de vibração adimensional ϵ foi proporcional ao erro, ou seja, quanto maior o valor, maior foi o erro encontrado, percebendo-se que os valores do COMSOL® estavam maiores que os do MATLAB®. Já ao variar o número de compressão, o efeito foi inversamente proporcional, ao aumentar o valor, o erro diminuiu. Uma possível explicação para tal efeito está relacionada com a determinação do valor da altura (h) da camada do escoamento, uma vez que o número de compressão é inversamente proporcional ao h . Já a amplitude de vibração está relacionada com o deslocamento do disco (sendo este imposto no parâmetro u_b). Logo, pelas equações em (20), a mesma é diretamente proporcional ao h e o aumento do h sobre o sistema influi no aumento de discrepâncias, visto que $\frac{h}{L} \ll 1$ (tal qual citado no item 2.2 deste trabalho).

Por fim, a Figura 4.6 ilustra em um determinado instante de tempo da simulação o efeito da pressão na superfície do fluido.

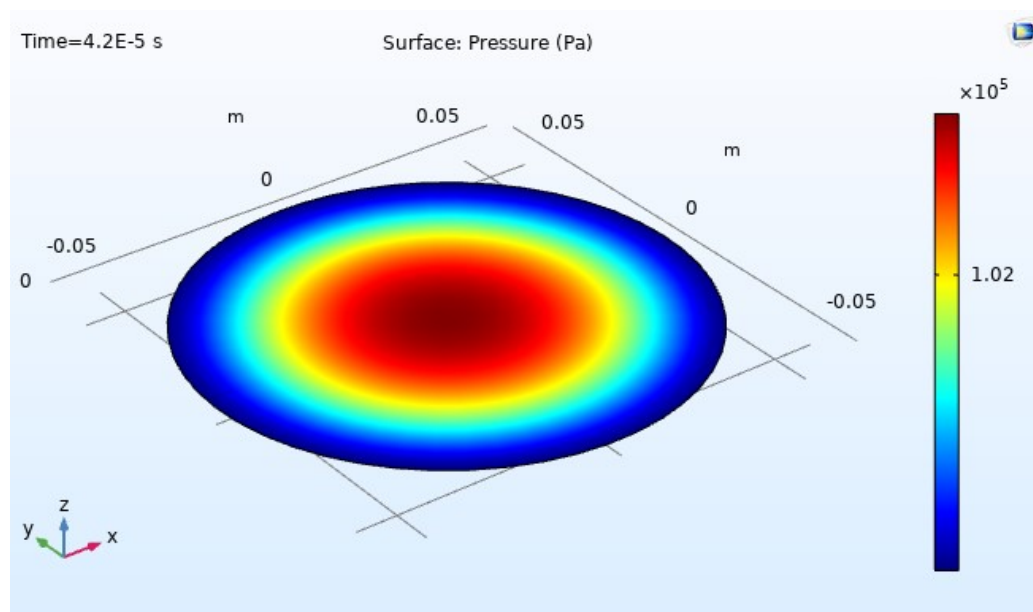


Figura 4.6: Campo de pressão na superfície do escoamento, para um dado tempo de simulação.

Fonte: Autor

4.2. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR FIXO

Para a configuração de influência na temperatura, a Figura 4.7 revela a variação de temperatura ao longo do raio da superfície acionadora, em função do tempo. Esta análise foi realizada para a condição com o maior erro na pressão máxima visto na Tabela 4.1, com o intuito de obter a maior variação possível na temperatura.

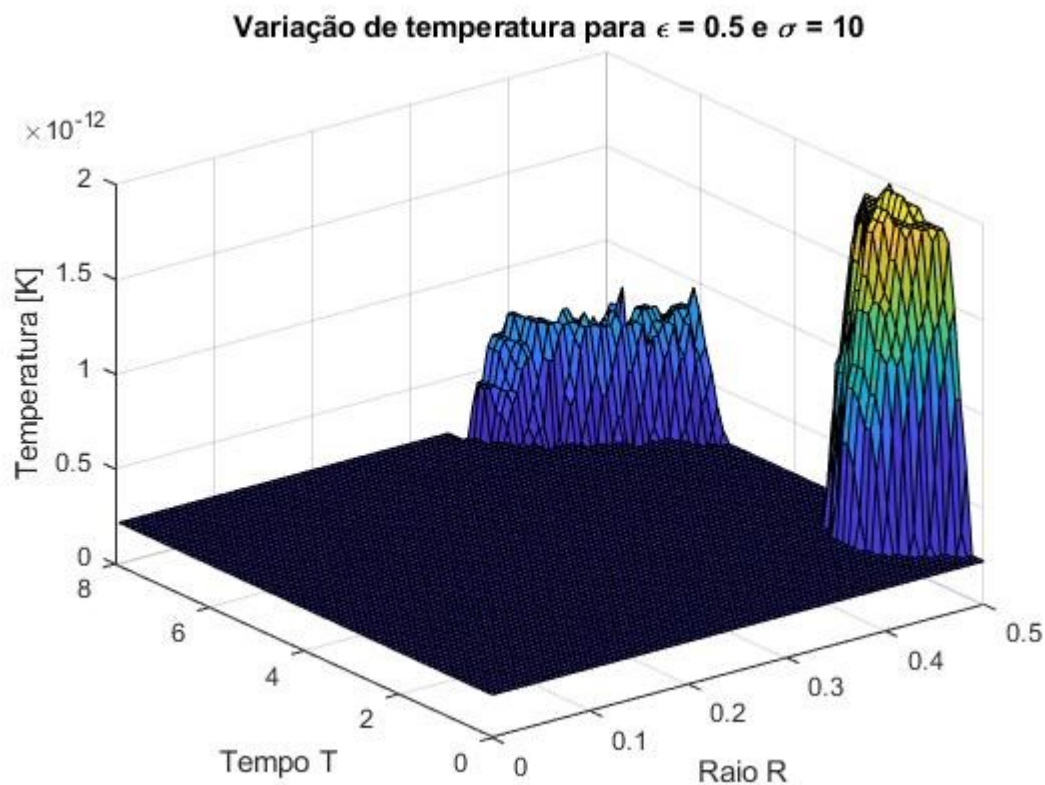


Figura 4.7: Influência na temperatura e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

É possível notar que a variação de temperatura na Figura 4.7 está na ordem de 10^{-12} K, o que pode ser caracterizado como sem variação. Isso se adequa ao modelo, visto que o equacionamento do mesmo é tratado para gases ideais, onde uma das condições para a utilização do equacionamento é para escoamento isotérmico, além disso a altura da camada do escoamento é muito fina, dessa forma o comportamento do fluido é isotérmico.

4.3. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO

Para a configuração de influência na flexibilidade, a Figura 4.8 revela a distribuição de pressão ao longo do raio da superfície acionadora, em função do tempo, comparado com a simulação do item 4.1. Novamente, a análise a ser comparada está relacionada com a de maior erro absoluto na pressão máxima.

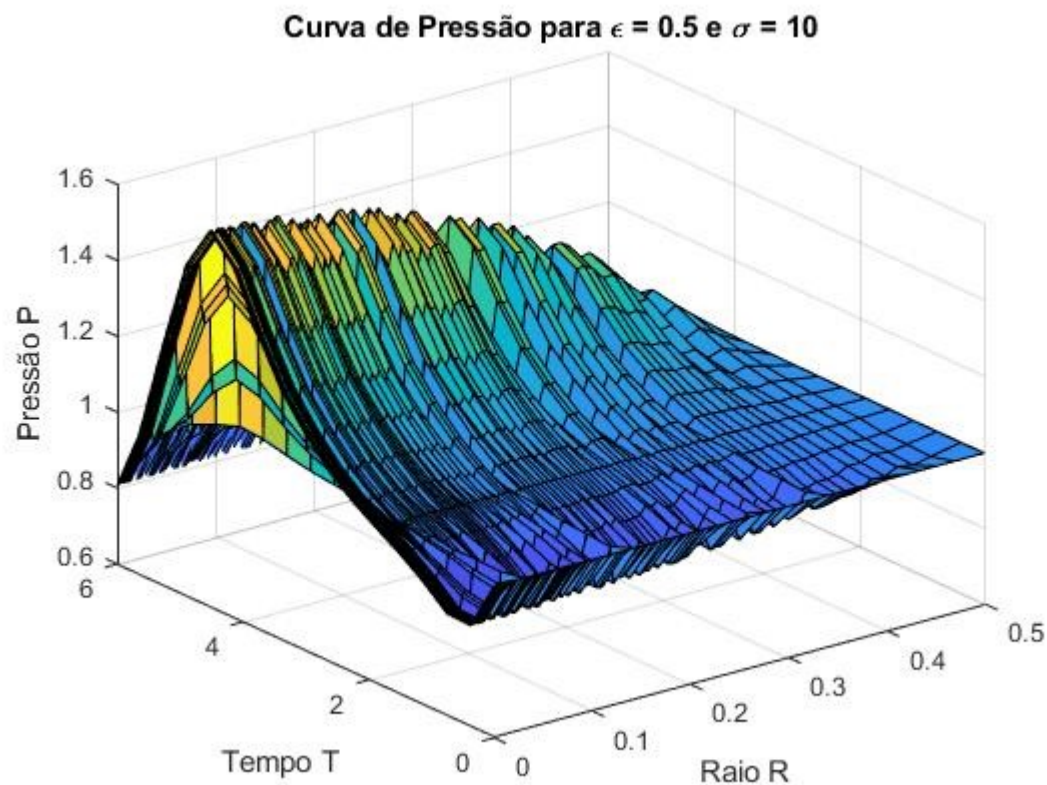


Figura 4.8: Influência na flexibilidade e disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

Para a condição da flexibilidade, a condição de deslocamento do disco foi inserida em seu ponto central, viabilizando o efeito do modo de vibrar do disco ao longo do tempo (o que pode ser visto na Figura 4.9). A pressão máxima obtida para esta condição foi de $1,6117 \times 10^5 Pa$, enquanto que a condição original a pressão foi de $1,6652 \times 10^5 Pa$, ou seja, foi visto uma queda de $5,3472 \times 10^3 Pa$, um equivalente de 5% da pressão atmosférica. A flexibilidade neste modelo tem a influência de alterar o tamanho da camada de forma não harmônica, visto que o modo de vibrar

do disco faz com que a extensão do mesmo não desenvolva um deslocamento uniforme. Isso permite uma variação não homogênea em h , criando desníveis na pressão. Vale ressaltar que na Figura 4.9, o retângulo representa o disco com o centro dele localizado na extrema esquerda.

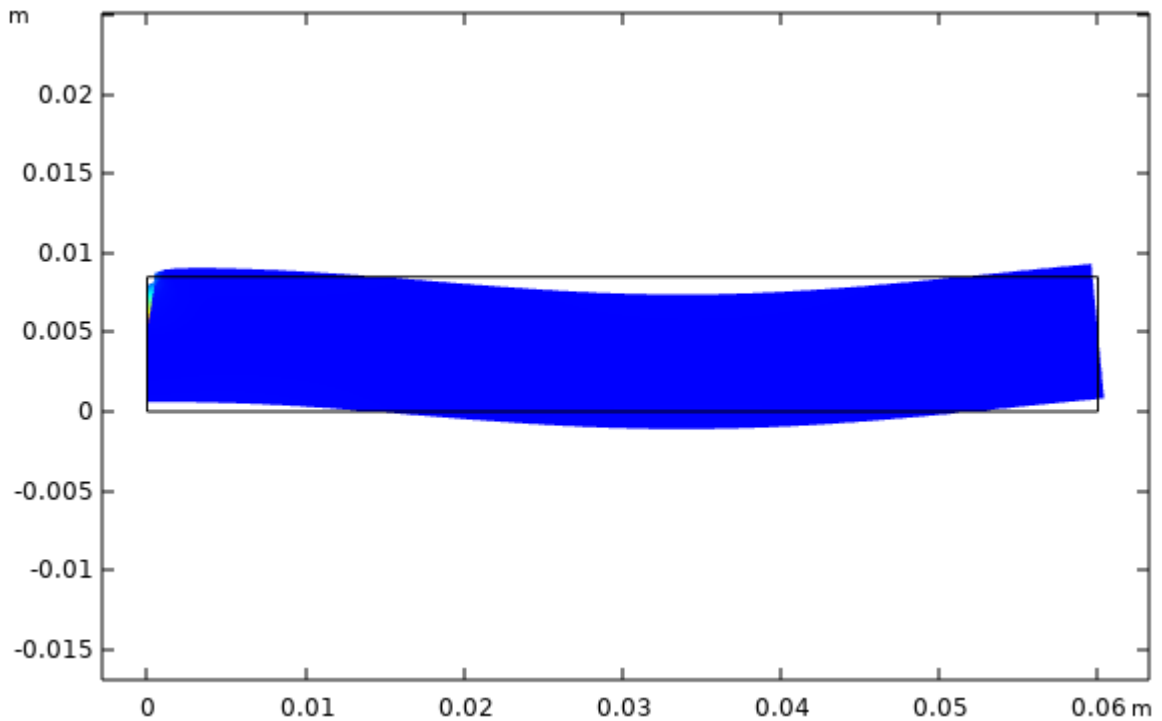


Figura 4.9: Ilustração do comportamento do disco acionador ao longo do tempo. Fonte: Autor

4.4. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR FIXO

A última análise com o disco superior fixo refere-se ao efeito conjunto da temperatura e da flexibilidade no sistema. A Figura 4.10 apresenta a variação de temperatura ao longo do raio da superfície acionadora, em função do tempo.

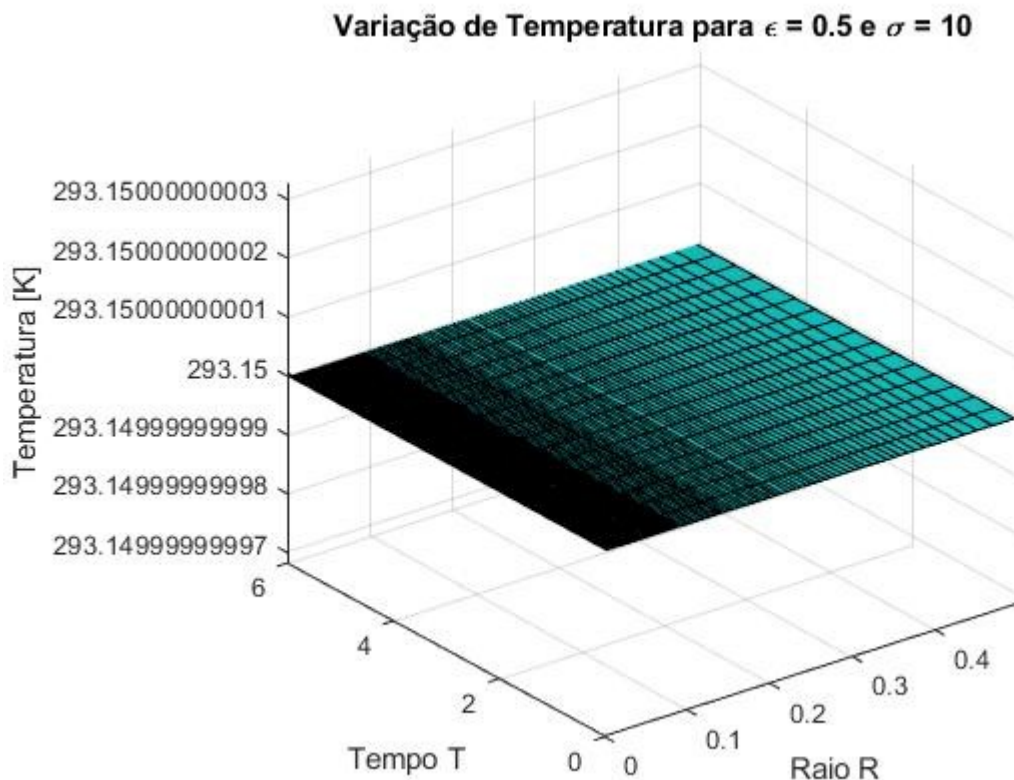


Figura 4.10: Influência na temperatura e flexibilidade para disco superior fixo (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

Novamente, é possível observar que o efeito na temperatura é praticamente nulo, com o máximo de variação na casa do $10^{-15}K$, o que indica o comportamento isotérmico ao longo do disco.

4.5. ANÁLISE ACÚSTICA NO REGIME TRANSIENTE E COM DISCO SUPERIOR LIVRE

As próximas simulações tratam-se das análises com o objeto a ser levitado livre, isto é, sem restrições de deslocamento. Logo, as Figuras 4.11 a 4.15 retratam a comparação feita não somente entre as duas metodologias, como também uma comparação entre as condições de disco fixo e livre. Vale ressaltar que as figuras da esquerda estão relacionadas com a simulação no COMSOL® em disco fixo e as da direita, as simulações no COMSOL® para disco livre.

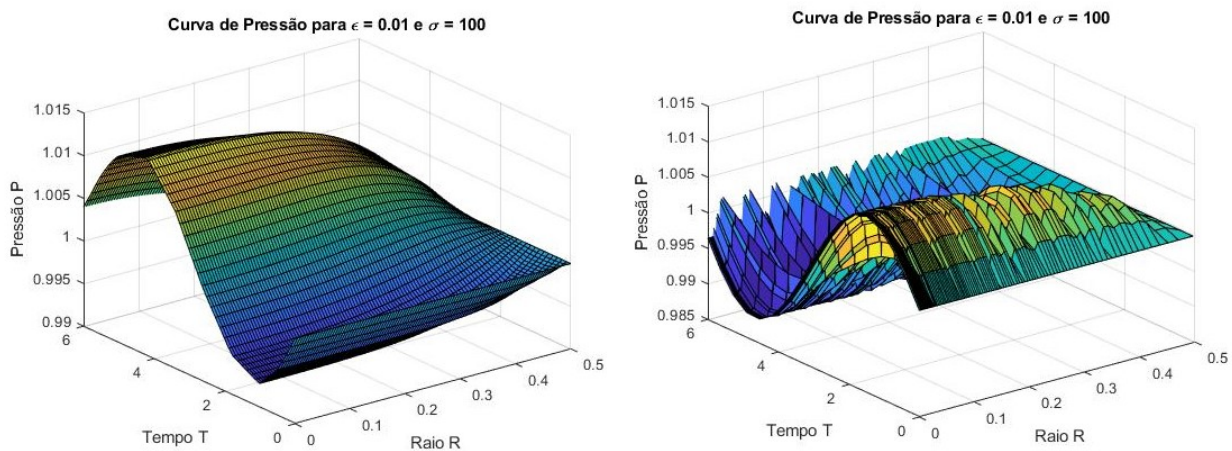


Figura 4.11: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,01$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

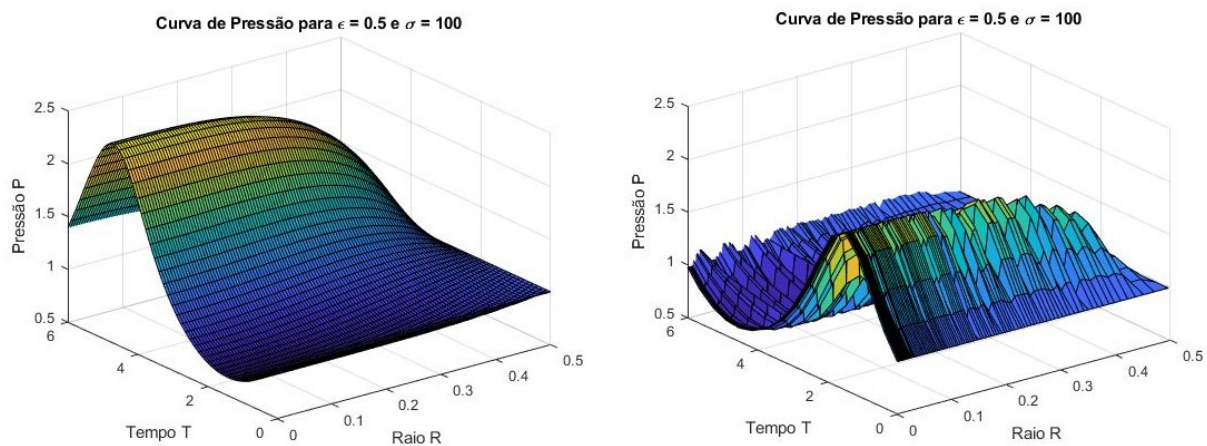


Figura 4.12: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

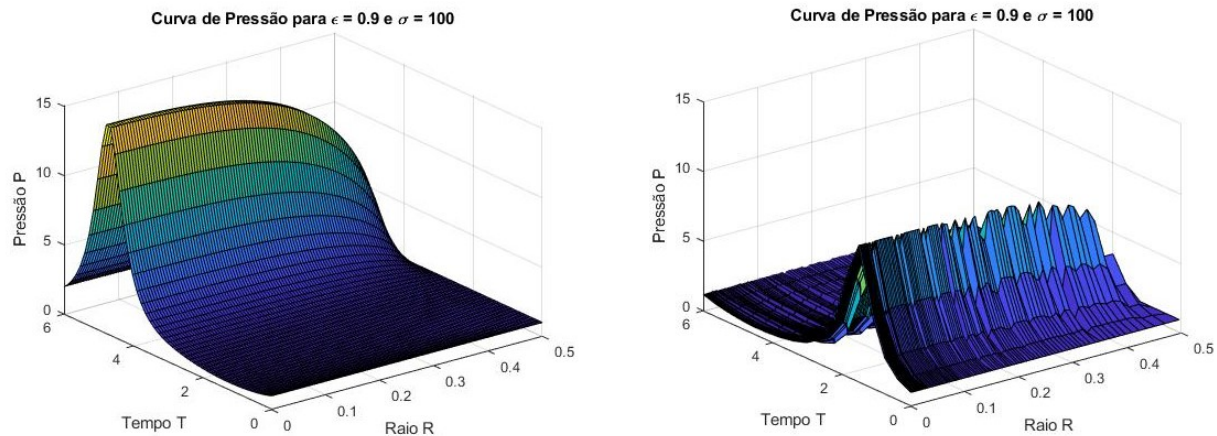


Figura 4.13: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,9$ e $\sigma = 100$). Fonte: Autor

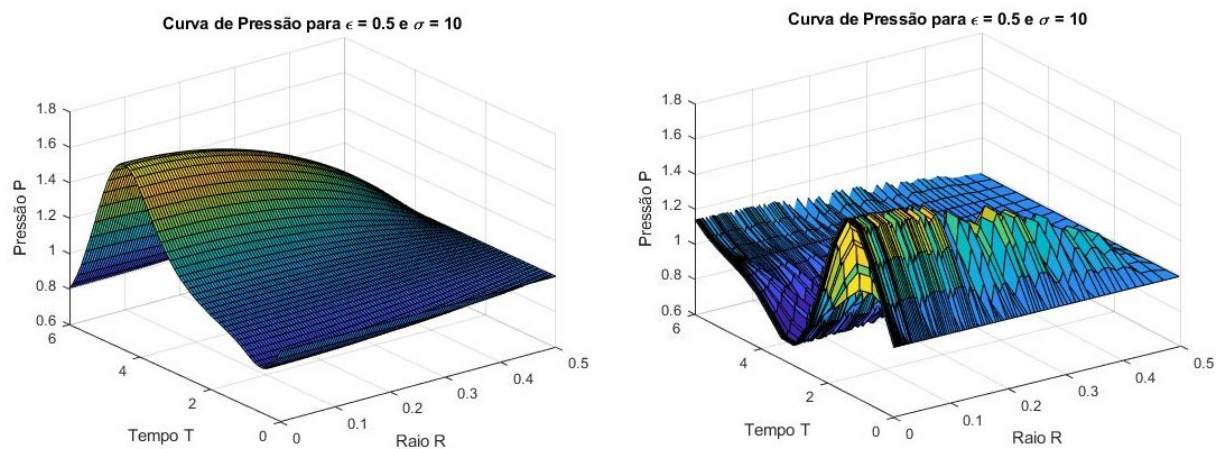


Figura 4.14: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

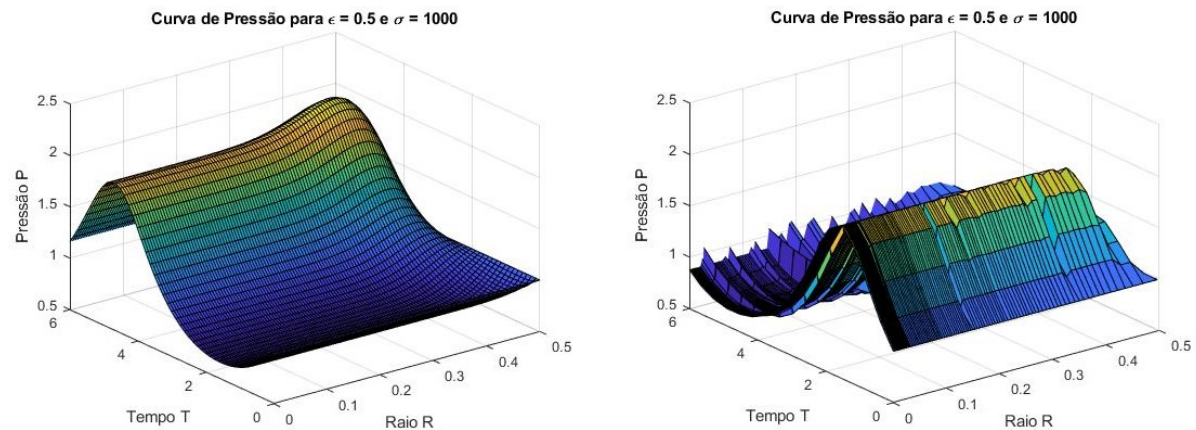


Figura 4.15: Comparação entre as metodologias para regime transiente e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 1000$). Fonte: Autor

A condição de disco livre promove a ação da força gravitacional sobre a camada de escoamento, isso acarreta na entrada de uma força na equação de Reynolds (força integrada da componente ρg , sendo ρ a densidade do material e g a gravidade local). É possível notar pelas figuras que o efeito da restrição do deslocamento do disco superior promove uma notória diferença no campo de pressão, uma vez que a massa do corpo exercerá sobre o escoamento uma nova pressão.

4.6. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA TEMPERATURA PARA DISCO SUPERIOR LIVRE

Utilizando dos mesmo critério que no item 4.2, a Figura 4.16 revela a variação de temperatura ao longo do raio da superfície acionadora, em função do tempo, porém para a condição de disco livre.

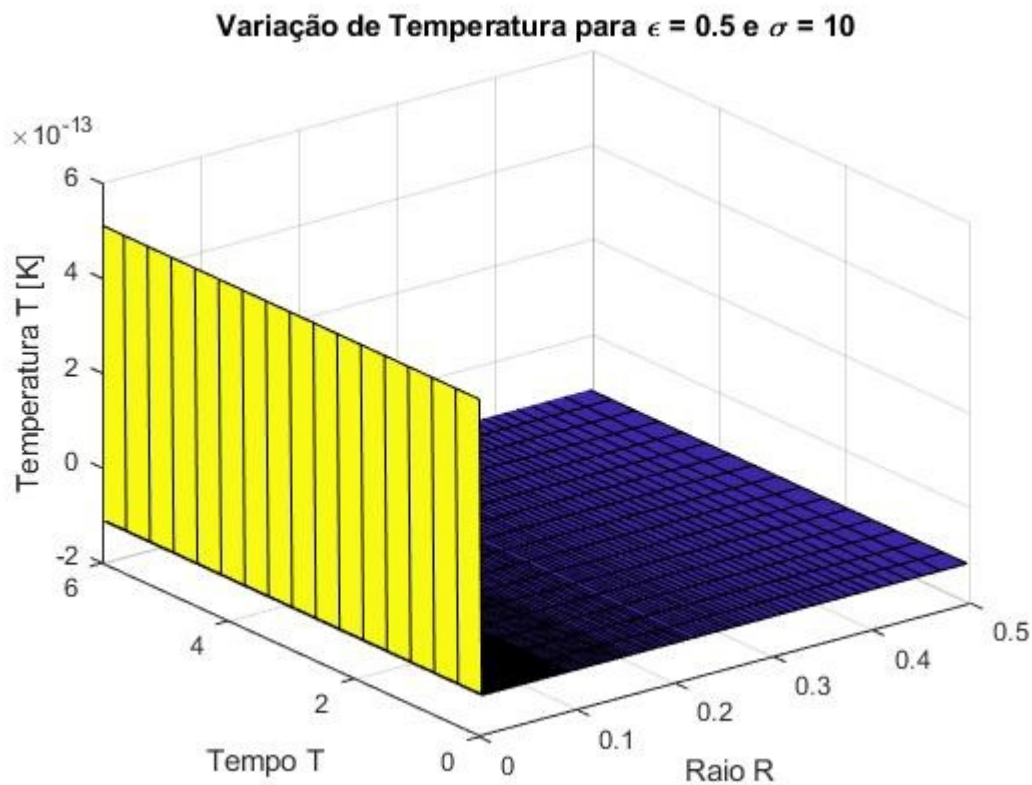


Figura 4.16: Influência na temperatura e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

É possível perceber que a variação de temperatura para este caso permanece em pequenas casas, notando-se que a maior variação é da ordem de $10^{-13} K$, o que ainda se mostra relativamente reduzido.

4.7. ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE

Para a análise de influência na flexibilidade de disco superior livre, não foi possível utilizar a mesma abordagem anterior, uma vez que para a abordagem do módulo do escoamento de fina camada, são consideradas a altura entre a parede e a base e, nas simulações anteriores, ao inserir um dos discos resultava na adoção de uma dessas alturas ser zero, portanto, a adoção dos dois discos resultaria em uma altura nula. Logo, foi utilizado a abordagem da interação

acústica-estrutural, o que permitiu associar o efeito da gravidade (condição para o disco livre) e o deslocamento imputado no ponto central do disco (condição de flexibilidade). A Figura 4.17 ilustra o resultado obtido.

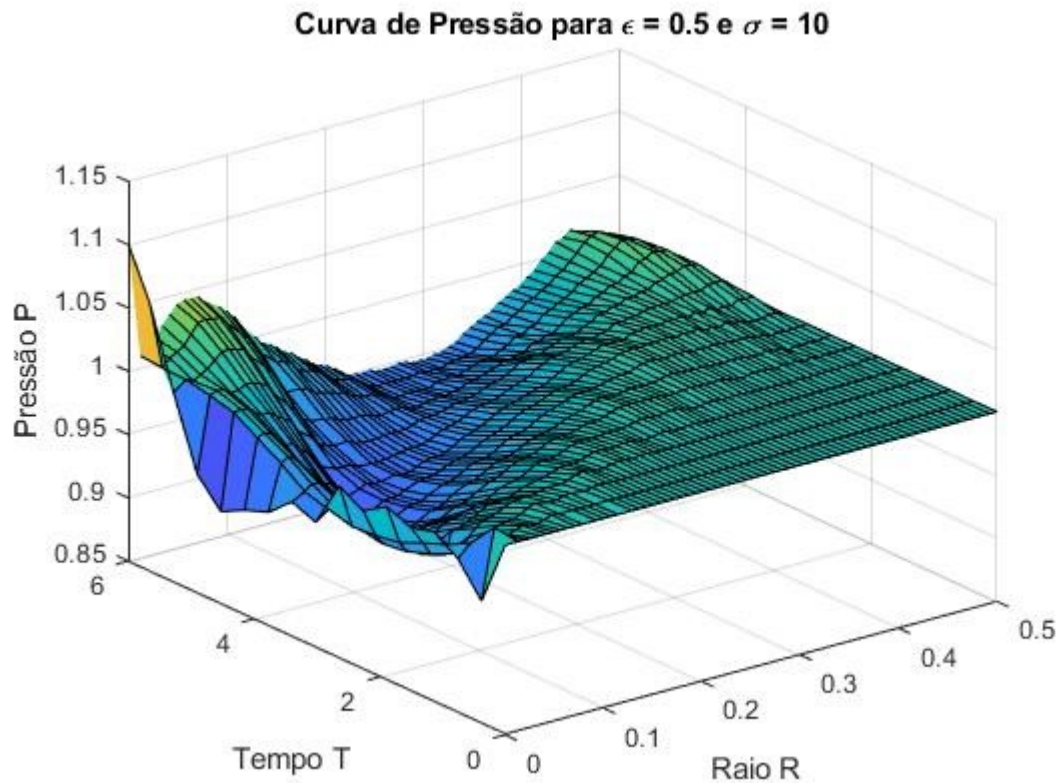


Figura 4.17: Influência na flexibilidade e disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

Para tal configuração foram utilizadas duas condições diferentes, o efeito da flexibilidade do disco acionador (ao movimentar de maneira não homogênea a superfície do disco) como também o efeito da liberdade do disco levantado (ao inserir o efeito da gravidade no mesmo). Nota-se que existe um padrão diferente dos resultados anteriores, isso pode ser explicado devido ao fato desta metodologia acústica-estrutural utilizar um equacionamento diferente do módulo de escoamento de camadas finas, uma vez que o módulo acústico apresenta a derivada segunda temporal, além de fontes monopolo e dipolo, tal qual vistas na Equação (17).

4.8. ANÁLISE CONJUNTA DAS INFLUÊNCIAS NA TEMPERATURA E FLEXIBILIDADE PARA DISCO SUPERIOR LIVRE

Para a última análise, também foi utilizada a interação acústica-estrutural, associada com o módulo de transferência de calor para avaliar a variação de temperatura. A Figura 4.18 apresenta tal variação de temperatura ao longo do raio da superfície acionadora, em função do tempo.

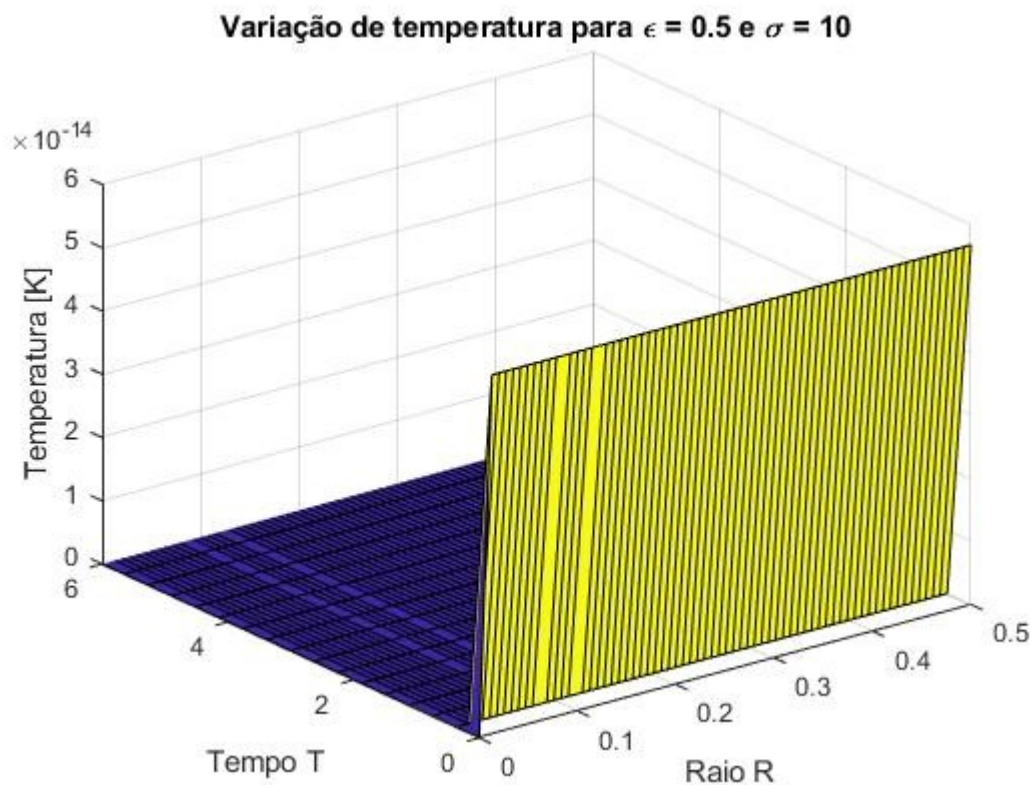


Figura 4.18: Influência na temperatura e flexibilidade para disco superior livre (para $\epsilon = 0,5$ e $\sigma = 10$). Fonte: Autor

E mais uma vez é possível notar que a variação de temperatura é pequena, na casa de 10^{-14} K, comprovando que a temperatura para camadas finas de escoamento apresenta comportamento isotérmico.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi possível realizar a comparação de ambas metodologias, visto que as mesmas se utilizam dos mesmos princípios teóricos (salvo algumas considerações), obtendo resultados satisfatórios. A metodologia imposta no software MATLAB® é mais simplificada, resolvendo a equação de Reynolds por meio da resolução de uma equação diferencial parcial mais simples. Já no ambiente COMSOL® nota-se o uso de uma equação modificada, ao introduzir um termo de velocidade média entre as velocidades correspondentes às paredes superior e inferior da fina camada do escoamento.

Observou-se também os efeitos de variação no número de compressão σ e na amplitude de vibração ϵ , indicando as características diretamente proporcionais do número de compressão e inversamente proporcionais da amplitude de vibração em relação à altura da camada do fluido. Isso permite avaliar condições ótimas para aumentar o campo de pressão do fluido de forma a maximizar a força atuante sobre o objeto a ser levitado, proporcionando um possível aumento de massa do objeto.

Também foi notado o diferente comportamento do sistema quando o objeto a ser levitado sai da condição fixa para uma condição livre, onde a componente da força gravitacional entra no equacionamento, e alterando a função harmônica da superfície vibratória.

Por fim, vale destacar como atividade de continuação deste trabalho o projeto e construção de um sistema de levitação acústica de campo próximo, de forma a realizar os experimentos necessários com as condições de contorno anteriormente citadas neste trabalho, possibilitando a comparação de dados experimentais com os encontrados nos modelos numéricos.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZHAO, S. **Investigation of non-contact bearing systems based on ultrasonic levitation**. 2010. Doctoral dissertation, Paderborn, Univ., Diss.
- [2] FERREIRA JR, F. M. **Numerical Investigation of Near-Field Acoustic Levitation**. 2018. Dissertation of Conclusion of Course Project, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [3] FERREIRA JR, F. M., ZUFFI, G., LOBATO, F. S., CAVALINI JR, A., STEFFEN JR, V. **A Numerical Investigation of the Near-Field Acoustic Levitation Approach**. 2017. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba, PR, Brasil.
- [4] ZUFFI, G., LOBATO, F. S., MOLINA, F. A. L., CAVALINI JR, A., STEFFEN JR, V. **ANÁLISE DE INCERTEZA EM UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO**. 2018. Anais do XXI ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais, Búzios, RJ, Brasil.
- [5] HRKA, S. **Acoustic levitation**. 2015. Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana.
- [6] ILSSAR, D., BUCHER, I., COHEN, N. **Structural optimization for one dimensional acoustic levitation devices – Numerical and experimental study**. 2014. Proceedings of ISMA2014 including USD2014.
- [7] SHI, M., FENG, K., HU, J., ZHU, J., CUI, H. **Near-Field Acoustic Levitation and Applications to Bearings : A Critical Review**. 2019. International Journal of Extreme Manufacturing.
- [8] THOMAS, G. P. L. **Modeling, Design and Manufacturing of an Acoustic Levitation Linear Transportation System**. 2015. 101 p. Master dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

- [9] BRANDT, E. H. **Levitation in Physics**. 1989. Science, Vol. 243, issue 4889, pp. 349-355.
- [10] NORDINE, P. C., WEBER, J. K. R., ABADIE, J. G. **Properties of high-temperature melts using levitation**. 2000. Pure Appl. Chem., Vol. 72, No. 11, pp. 2127-2136.
- [11] ZHONG LI, J. J. **STUDY OF LIQUID METALS BY ELECTROSTATIC LEVITATION**. 2009. Doctoral dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [12] SIMON, M. D., HEFLINGER, L. O., GEIM, A. K. **Diamagnetically stabilized magnet levitation**. 2001. American Journal of Physics, Vol. 69, pp. 702.
- [13] **Energy.gov**. Disponível em <<https://www.energy.gov/articles/how-maglev-works>> Acesso em: 25 nov. 2019.
- [14] ILSSAR, D., BUCHER, I., FLASHNER, H. **Model based, nonlinear control of near-field acoustically levitated objects**. 2016. Proceedings of ISMA2016 including USD2016.
- [15] ANDRADE, M. A. B., BERNASSAU, A., ADAMOWSKI, J. **Acoustic levitation of a large solid sphere**. 2016. Applied Physics Letters, 109(4), [044101]. DOI: 10.1063/1.4959862.
- [16] HAMROCK, B. J. **Fundamentals of Fluid Film Lubrification**. 1991. NASA Reference Publication 1255, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [17] TSHIZUBU, C. M. **UM MANCAL MAGNÉTICO ATIVO COM QUATRO POLOS E FLUXOS ACOPLADOS UTILIZANDO UM MOTOR BIFÁSICO COM ENROLAMENTOS DISTRIBUÍDOS**. 2017. Master dissertation, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, RJ, Brasil.
- [18] **SLIDEPLAYER**. Disponível em <<https://slideplayer.com/slide/16201205/>> Acesso em: 25 nov. 2019.
- [19] **HUMANA SAÚDE**. Disponível em <<https://www.humanasaude.com.br/fique-por-dentro/aparato-de-levitacao-acustica-pode-contribuir-para-manipulacao-de-substancias-delicadas,36153>> Acesso em: 25 nov. 2019.
- [20] **WIKIPEDIA**. Disponível em <<https://en.wikipedia.org/wiki/Levitation>> Acesso em: 25 nov. 2019.
- [21] **COMSOL**. Disponível em <<https://www.comsol.com/company>> Acesso em: 25 nov.

APÊNDICE I

ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO EM MATLAB® PARA A EQUAÇÃO DE REYNOLDS

O algoritmo abaixo refere-se à resolução da equação de Reynolds, sendo possível variar valores do número de compressão σ , amplitude de vibração ϵ , tempo e comprimento característico.

```
clear;
clc;
close all;
format long;
global epsilon sigma

%% Definição dos parâmetros variáveis:

epsilon = 0.5; %Colocar parâmetros de 0.01 / 0.5 / 0.9
sigma = 1000; %Colocar parâmetros de 10 / 100 / 1000
m = 0; %Simetria do disco
x = linspace(0,0.5,50); %Vetor do comprimento do disco (Adimensional)
T = linspace(0,(2*pi),50); %Vetor do tempo de simulação (Adimensional)

%% Resolução da equação:

solucao = pdepe(m,@pdex1pde,@pdex1ic,@pdex1bc,x,T); %Resolve a Equação
Diferencial Parcial
pressao = solucao(:,:,1); %Fornece o valor do campo de pressão

%% Determinação da pressão média:
```

```

for i=1:length(x)
    Pm(i)=1/(2*pi)*trapz(T,pressao(:,i)); %Pressão média ao longo do raio do
disco
end

%% Plotagem:

figure(1);
surf(x,T,pressao);
xlabel('Raio R');
ylabel('Tempo T');
zlabel('Pressão P');
title(['Curva de Pressão para \epsilon = ' num2str(epsilon) ' e \sigma = '
num2str(sigma)]);
grid on;

figure(2);
plot([-x x],[Pm Pm],'b. ');
xlabel('Distância x');
ylabel('Pressão Média P_m');
title(['Pressão Média para \epsilon = ' num2str(epsilon) ' e \sigma = '
num2str(sigma)]);
grid on;

%% Funções:

function [c,f,s] = pdex1pde(x,T,pressao,DuDx)

global epsilon sigma

H = 1+(epsilon*sin(T));
c = sigma*H;
f = pressao*H^3*DxDx;
s = -sigma*(epsilon*cos(T)*pressao);

```

```
end
```

```
function pressao0 = pdex1ic(x)
```

```
    pressao0 = 1;
```

```
end
```

```
function [pl,ql,pr,qr] = pdex1bc(xl,ul,xr,ur,t)
```

```
    pl = 0;
```

```
    ql = 1;
```

```
    pr = ur-1;
```

```
    qr = 0;
```

```
end
```

APÊNDICE II

ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO EM MATLAB® PARA O TRATAMENTO DE DADOS DO COMSOL MULTIPHYSICS®

Após as simulações no COMSOL®, um tratamento dos dados foi realizado, de forma a obter o campo de pressão do sistema ao longo do raio do disco e do tempo, sendo estes tratados como adimensionais (com o intuito de poder comparar com as curvas geradas em MATLAB®). Logo, segue o algoritmo abaixo.

```
clear all;
clc;
close all;
format long;

%% Condição de plotagem:

plotar = 1; %Define a plotagem que precisa ser feita (1 - Pressão/Força; 2 -
Deslocamento; 3 - Temperatura)
espessura = 0; %Define a posição para a coleta dos pontos
tempo = 0:0.000001:0.000063662; %Vetor de tempo da simulação [s]
L = 0.12; %Comprimento característico do disco [m]
epsilon = 0.5; %Amplitude de Vibração
sigma = 10; %Número de Compressão
w = 2*pi*20000; %Frequência Angular
p0 = 101325; %Pressão Atmosférica [Pa]

%% Plotagem Pressão:
```

```

if plotar == 1

    dados = load('pressao.txt');
    dados = sortrows(dados,1);
    Z = dados(:,2);
    i_z = find(Z==espessura);
    R = dados(i_z,1);
    coluna = size(dados);
    Z_p = ones(length(R),coluna(1,2));
    for i = 1:coluna(1,2)
        Z_p(:,i) = dados(i_z,i);
    end
    Z_p = Z_p(:,3:coluna(1,2));
    R_novo = R;
    Pressao = Z_p;
    %Tratamento Adimensional:
    R_novo = R_novo/L;
    tempo = tempo*w;
    Pressao = Pressao'/p0;
    %Plotagem:
    figure(1);
    surf(R_novo,tempo,Pressao);
    xlabel('Raio R');
    ylabel('Tempo T');
    zlabel('Pressão P');
    title(['Curva de Pressão para \epsilon = ' num2str(epsilon) ' e \sigma = '
num2str(sigma)]);
    grid on;
    ylim([0 6]);

    %-----
    %% Plotagem Deformação:

elseif plotar == 2

    dados = load('deformacao.txt');

```

```

dados = sortrows(dados,1);
Z = dados(:,2);
i_z = find(Z==espessura);
R = dados(i_z,1);
coluna = size(dados);
Z_w = ones(length(R),coluna(1,2));
for i = 1:coluna(1,2)
    Z_w(:,i) = dados(i_z,i);
end
Z_w = Z_w(:,3:coluna(1,2));
for i = 1:(length(R)/2)
    R_novo(i,1) = R((2*i),1);
    disp(i,:) = Z_w((2*i),:);
end
disp = disp';
figure(1);
surf(R_novo,tempo,disp);
xlabel('Raio [m]');
ylabel('Tempo [s]');
zlabel('Deslocamento [m]');
title(['Deslocamento da Superfície Vibratória para \epsilon = '
num2str(epsilon) ' e \sigma = ' num2str(sigma)]);
grid on;
ylim([0 6]);

```

```

%% Plotagem Temperatura:

```

```

elseif plotar == 3

```

```

    dados = load('temperatura.txt');
    dados = sortrows(dados,1);
    Z = dados(:,2);
    i_z = find(Z==espessura);
    R = dados(i_z,1);
    coluna = size(dados);
    Z_t = ones(length(R),coluna(1,2));

```

```

for i = 1:coluna(1,2)
    Z_t(:,i) = dados(i_z,i);
end
Z_t = Z_t(:,3:coluna(1,2));
R_novo = R/L;
tempo = tempo*w;
temperatura = Z_t;
temperatura = (temperatura-293.15);
figure(1);
surf(R_novo,tempo,temperatura');
xlabel('Raio R');
ylabel('Tempo T');
zlabel('Temperatura [K]');
title(['Variação de temperatura para \epsilon = ' num2str(epsilon) ' e
\sigma = ' num2str(sigma)]);
grid on;
ylim([0 6]);

end

```