

FÁBIO MARQUES FERREIRA JÚNIOR

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DE
LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

FÁBIO MARQUES FERREIRA JÚNIOR

**INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DE
LEVITAÇÃO ACÚSTICA DE CAMPO PRÓXIMO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **ENGENHEIRO MECÂNICO**.

Orientador:
Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalinni Júnior

UBERLÂNDIA – MG

2018

Dedico este trabalho aos meus
pais, Fábio e Claudionice Marques.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Um agradecimento em especial a meus pais, Fábio Marques Ferreira e Claudionice Costa Goulart Marques, aos quais serei eternamente grato pelo apoio que me deram e confiança depositada em mim.

Agradeço também à minha irmã, Ana Cláudia Ferreira Goulart, minha família, meus professores e a meus amigos, Fernando Lúcio da Costa Júnior, João Pedro de Campos Badan, Marco Aurélio Matos Júnior, Matheus Rosa Pereira do Couto e Rodrigo Ferreira Abdulmassih, inseparáveis desde o começo do curso.

Ao meu orientador, professor Dr. Aldemir Ap. Cavalinni Júnior, pelo tempo dedicado a me ajudar, por todo conhecimento transferido durante o longo período de pesquisas e iniciação científica, além de sua confiança e incentivo.

Aos meus companheiros de pesquisa, Geisa Arruda Zuffi e professor Fran Sérgio Lobato que contribuíram bastante para que esse projeto caminhasse.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

FERREIRA JR, F. M. **Investigação Numérica de Levitação Acústica de Campo Próximo.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

As técnicas de levitação têm atraído a atenção dos pesquisadores nos últimos anos, uma vez que podem ser aplicadas no transporte, manipulação e armazenamento de componentes que não podem ser contaminados por contato mecânico. A levitação é um processo em que uma força oposta à gravidade é gerada com o objetivo de equilibrá-la sem contato. Ela pode ser obtida a partir de forças elétricas, magnéticas, ópticas, aerodinâmicas ou acústicas. O presente trabalho é dedicado à análise numérica da abordagem de levitação acústica de campo próximo. Neste caso, o objeto é levitado devido às forças geradas por um campo de pressão, produzido a partir da vibração de uma superfície. Numericamente, este campo pode ser obtido através da resolução da equação de Reynolds. Sendo assim, este trabalho dedica-se a análise numérica da influência de alguns parâmetros sobre o campo de pressão, tais como a amplitude de vibração da superfície vibratória, e o chamado número de compressão. Esta análise foi feita em termos da amplitude da pressão que pode ser gerada, e da capacidade de massa que pode ser levitada. Foi utilizada Diferenças Finitas Centradas na obtenção do campo e foram observados valores de pressão capazes de elevar cargas de centenas de kilogramas.

Palavras Chave: Levitação acústica de campo próximo, filme de compressão, equação de Reynolds.

FERREIRA JR, F. M. **Numerical Investigation of Near-Field Acoustic Levitation**. 2018. Dissertation of Conclusion of Course Project, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Levitation techniques have been attracting the attention of researchers in the last years, once they can be applied in the transportation, handling, and storage of components that cannot be contaminated by mechanical contact. Levitation is a process in which a force opposite to gravity is generated aiming to balance it without contact. Levitation can be achieved from electrical, magnetic, optical, aerodynamic, or acoustic forces. The present work is dedicated to numerical analysis of the near-field acoustic levitation approach. In this case, the object is levitated due to forces generated by a pressure field produced from the vibration of a driving surface. The pressure field is obtained by solving the Reynolds equation. The influence that some parameters can exert on the pressure field is evaluated, such as the vibration amplitude of the driving surface and the so-called squeeze film number. In this paper, these parameters were analyzed in terms of the pressure amplitude that can be generated and the capacity of mass that can be levitated. This analysis was done in terms of the pressure range that can be generated, and the mass capacity that can be levitated. It was applied Finite Differences Centered on field obtention and was observed pressure values capable of levitating loads of hundreds of kilograms.

Key-words: Near-field acoustic levitation, squeeze film, Reynolds equation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um eletroímã. (Adaptado de Tecmundo.com.br) ..	3
Figura 2 - Esquema mostrando o mecanismo de propulsão e levitação de um trem do tipo Maglev. (Adaptado de Energy.gov).....	4
Figura 3 - Experimento de Millikan para determinar a carga elementar do elétron. (Adaptado de Dos Santos, C. A.).	4
Figura 4 - Gota de óleo levitada por feixe de lasers. (Adaptado de PRICE et. al, 2015).....	5
Figura 5 – Esquemática da técnica de ondas planas.	6
Figura 6 – Distribuição de pressão entre o refletor e o transdutor.	7
Figura 7 – Levitação de uma formiga usando ondas planas.	7
Figura 8 – Experimento de levitação acústica desenvolvido por (ILSSAR et al., 2015).	8
Figura 9 - Modelo gráfico do sistema simplificado.....	11
Figura 11 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 10$	15
Figura 12 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 100$	16
Figura 13 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 1000$	16
Figura 14 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.01$	17
Figura 15 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.5$	17
Figura 16 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.9$	18
Figura 17 - Campo de pressão máxima no intervalo variando com ε e σ	18
Figura 18 - Possíveis combinações de ε e σ no instante $t = 6.12s$ e massa 100 kg.	19
Figura 19 - Possíveis combinações de ε e σ no instante $t = 6.12s$ e massa 50 kg.	19
Figura 20 - Possíveis combinações de ε e σ no instante $T = 6.12$ e massa 20 kg.....	20
Figura 21 - Possíveis combinações de ε e no instante $T = 6.12$ e massa 10 kg.....	20
Figura 22 - Possíveis combinações de ε e σ no instante $T = 6.12$ e massa 1 kg.....	20
Figura 23 - Possíveis combinações de ε e σ no instante $T = 6.12$ e massa 0.2 kg.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições para solução numérica da equação de Reynolds	14
---	----

LISTA DE SIMBOLOS

Letras Latinas

h	Variável de deslocamento do disco
H	Variável de deslocamento do disco adimensionalizada
h_0	Gap de distância mínimo entre as placas
L	Comprimento característico
p	Variável de pressão
P	Variável de pressão adimensionalizada
p_0	Pressão atmosférica
t	Variável de tempo
T	Variável de tempo adimensionalizada
x	Variável de comprimento
X	Variável de comprimento adimensionalizada

Letras Gregas

δh	Amplitude de vibração
ε	Amplitude de vibração adimensional
μ	Viscosidade do fluido
σ	Número de compressão
ω	Frequência de vibração

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Levitação por campo magnético.....	2
2.1.1 Levitação eletrodinâmica ou por repulsão magnética	2
2.1.2 Levitação eletromagnética ou por atração magnética.....	3
2.1.3 Levitação supercondutora	3
2.2 Levitação por campo eletrostático.....	4
2.3 Levitação óptica	5
2.4 Levitação acústica.....	5
2.4.1 Levitação acústica baseada em ondas planas	6
2.4.2 Levitação acústica de campo próximo (ou levitação ultra-sônica)	7
2.5 Estudos na área de levitação acústica de campo próximo	8
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	10
3.1 Modelo matemático referente ao movimento do objeto a ser levitado	10
3.2 Modelo matemático referente ao filme de gás.....	12
3.3 Obtenção do campo de pressão gerado	12
3.4 Procedimento numérico	13
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1 Campo de pressão.....	15
4.1.1 Campo de pressão variando parâmetro sigma	15
4.1.2 Campo de pressão variando parâmetro epsilon	16
4.1.3 Campo de pressão máximo.....	18
4.2 Combinação dos parâmetros sigma e epsilon para gerar levitação.....	19
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO	22
CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A levitação acústica é uma técnica de suspensão de matéria por meio da aplicação de intensas ondas no ambiente, gerando um campo de pressão. A levitação acústica é possível devido aos efeitos não lineares das intensas ondas sonoras. Alguns métodos são capazes de levitar objetos com sons inaudíveis devido à frequência utilizada (OTSUKA et. al,1989).

Essa técnica é aplicada comumente em processamento sem contêiner, que cada vez mais adquire importância devido à baixa resistência mecânica, e a pequenas dimensões de produtos da área eletrônica. Esse tipo de processamento também é usado na indústria química, quando as aplicações envolvem reações químicas ou demandam materiais com alto grau de pureza.

A levitação acústica apresenta vantagens em relação às outras técnicas, uma vez que não oferece restrições à composição química do material que se deseja levitar (VANDAELE et al., 2005; ANDRADE, 2010), e não exige que ele seja condutor de eletricidade, como por exemplo, materiais compósitos.

A levitação acústica pode acontecer por meio da aplicação de duas técnicas distintas, ondas planas e campo próximo. Este trabalho irá apresentar um estudo sobre a técnica de levitação acústica de campo próximo. Esse tipo de levitação ocorre quando um objeto plano é colocado próximo a uma superfície vibratória. Conseqüentemente, há uma fina camada de ar no espaço entre essa superfície e o objeto, que é comprimido devido à movimentação da mesma. A camada de gás atinge assim um valor de pressão médio superior à pressão ambiente, resultando em uma força capaz de levitar o objeto acima da superfície vibratória (ILSAR et al., 2015).

Simulações numéricas são realizadas com intuito de determinar a influência que determinados parâmetros têm sobre a dinâmica do sistema.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O princípio da levitação é gerar uma força que equilibre a força gravitacional, para que haja um deslocamento ascendente do objeto levitado. Existem várias técnicas de levitação, dentre elas podemos citar campos magnéticos, métodos ópticos, campos eletrostáticos, ondas acústicas, entre outras. Esses métodos são apresentados a seguir.

2.1 Levitação por campo magnético

Levitação magnética é um método pelo qual um objeto é suspenso por meio da geração de campos magnéticos. A força magnética é usada para equilibrar os efeitos da gravidade e de outras acelerações que possam afetar o sistema.

Os dois fatores principais envolvidos na levitação magnética são as forças de elevação e a estabilidade do objeto, para garantir que o sistema não deslize ou gire espontaneamente para uma posição em que a levitação é cancelada.

O campo magnético pode ser gerado de diferentes maneiras, podendo assim receber subclassificações.

2.1.1 Levitação eletrodinâmica ou por repulsão magnética

Este método consiste na utilização de bobinas com uma resistência elétrica baixa. São bobinas com capacidade de condução bastante alta que levam à geração de um campo magnético. Esse campo provoca o aparecimento de uma corrente elétrica induzida em um condutor.

Essas correntes geram outro campo magnético, que por sua vez, se opõe ao campo criado pela bobina. A interação entre ambos os campos gerados cria uma força de repulsão que é capaz de levantar o objeto.

2.1.2 Levitação eletromagnética ou por atração magnética

A levitação eletromagnética é aquela cujo corpo ferromagnético é mantido suspenso pela força atrativa de um eletroímã. Esse dispositivo é formado por um núcleo de ferro envolvido por um solenoide, que quando uma corrente elétrica atravessa suas espiras é criado um campo magnético.

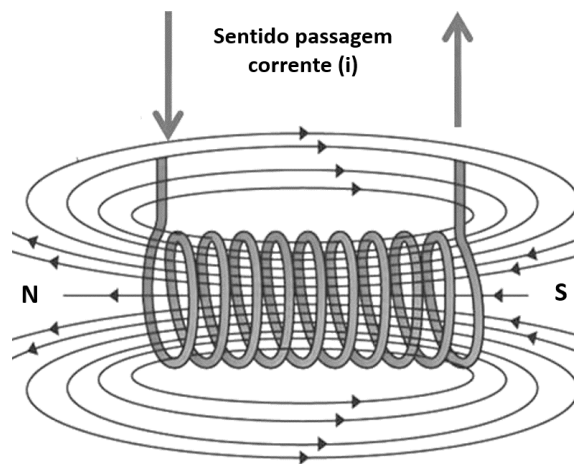


Figura 1 - Esquema de funcionamento de um eletroímã. (Adaptado de Tecmundo.com.br)

2.1.3 Levitação supercondutora

Esta técnica de levitação faz uso de pastilhas supercondutoras e materiais magnéticos, que operam em elevadas temperaturas. Essas pastilhas tornam-se supercondutoras a temperaturas muito superiores em comparação aos materiais supercondutores tradicionais.

Um exemplo da aplicação dessa técnica está presente nos trens Maglev, mostrados na Fig. 2, que levitam sobre os trilhos e deslocam-se sem um motor tradicional, como os motores elétricos ou a combustão, tendo apenas como base o campo magnético.

Esses trens podem atingir velocidades equivalentes a de um avião em altitude de cruzeiro. Sua elevação funciona por meio de forças de repulsão entre ímãs colocados na parte inferior do monotrilho e no trem. Além de manter o trem levitando a uma baixa distância do trilho, o sistema proporciona a força motora e fornece a energia interna. O equilíbrio do veículo é bastante alto, uma vez que ele consegue realizar curvas com diâmetro de quilômetros

operando em velocidades altíssimas. de acordo com informações disponibilizadas no site Geo Cities

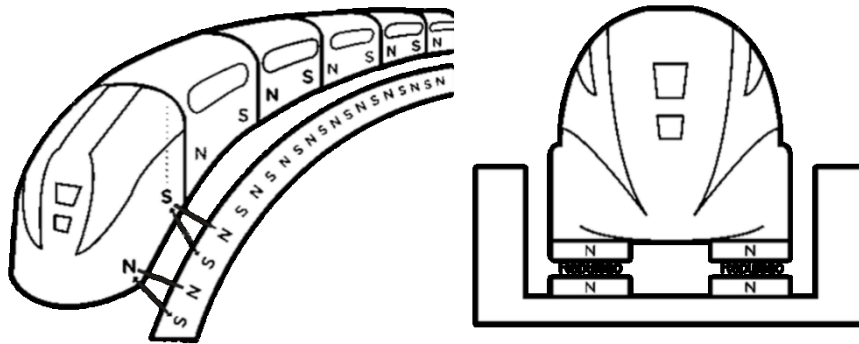


Figura 2 - Esquema mostrando o mecanismo de propulsão e levitação de um trem do tipo Maglev. (Adaptado de Energy.gov)

2.2 Levitação por campo eletrostático

Na levitação eletrostática, partículas eletricamente carregadas são suspensas pela força eletrostática entre a partícula e os eletrodos do levitador. Essa técnica pode ser realizada em pequena escala, reproduzindo um dos experimentos mais famosos envolvendo levitação eletrostática (ANDRADE, 2015).

O experimento citado é o da gota de óleo, (MILLIKAN, 1909) no qual um par de eletrodos foi utilizado para eletrificar partículas de óleo para que elas ficassem suspensas no ar. Na figura 3 é possível entender como o experimento foi realizado. O experimento tinha como objetivo determinar a carga elementar de um elétron.

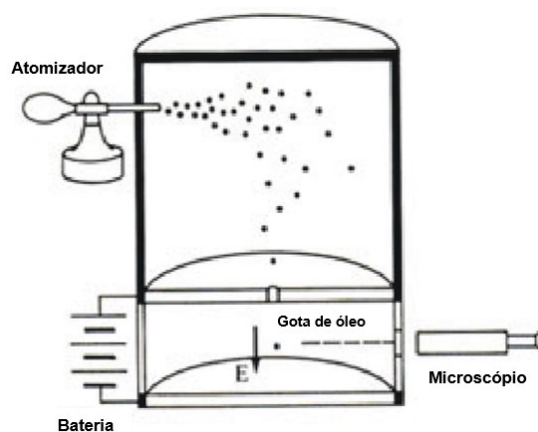


Figura 3 - Experimento de Millikan para determinar a carga elementar do elétron. (Adaptado de Dos Santos, C. A.).

2.3 Levitação óptica

A levitação óptica é um método que utiliza a força transmitida por raios de luz intensos para levantar objetos mecânicos inteiros, sem o auxílio de quaisquer equipamentos magnéticos e de forças externas. É um tipo de abordagem que diminui o ruído ambiental (CHANG, 2010).

A ideia de usar forças ópticas para prender e levantar pequenas partículas é bem estabelecida e amplamente usada em equipamentos, como feixes de laser utilizados para diminuir a temperatura de objetos, e em pinças ópticas (instrumentos científicos que utilizam lasers para manipular objetos dielétricos de pequeno tamanho, como visto na Fig. 4, onde uma gota de óleo é levitada).

Os estudiosos dessa área já conseguiram demonstrar que os mesmos mecanismos ópticos podem ser utilizados para manipular sistemas mecânicos muito maiores do que átomos individuais, mas a escala dos objetos é pequena, algo em torno dos nanômetros.

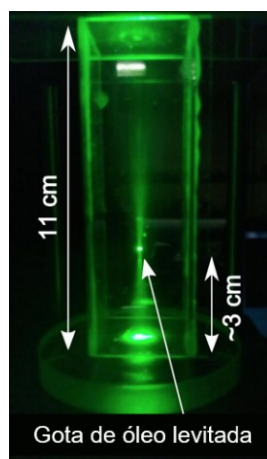


Figura 4 - Gota de óleo levitada por feixe de lasers. (Adaptado de PRICE et. al, 2015)

Essa área da ciência tem avançado bastante e, como parte disso, um grupo de pesquisadores alemães do Instituto Max Planck publicaram um estudo propondo que o sistema óptico desenvolvido por eles pode ser utilizado para estudar a superposição em organismos vivos (ISART et al, 2009).

2.4 Levitação acústica

A levitação acústica consegue ser reproduzida graças aos efeitos não lineares das ondas sonoras de alta intensidade. É uma técnica de suspensão de objetos através da

aplicação de intensas ondas no ambiente, criando um campo de pressão. Alguns métodos conseguem suspender a matéria com sons inaudíveis para o ser humano, em decorrência da frequência utilizada.

2.4.1 Levitação acústica baseada em ondas planas

A levitação acústica baseada em ondas planas é uma das técnicas mais simples a ser utilizada atualmente. Essa abordagem faz uso de um transdutor ultrassônico e um refletor, plano ou curvo (ANDRADE, 2010). As ondas geradas pelo transdutor são refletidas pelo refletor no transdutor, formando ondas com a mesma frequência e que viajam em direções opostas. A colisão dessas ondas resulta em pontos de interferência destrutiva e construtiva (nós e antinós, respectivamente), como representado na Fig. 5.

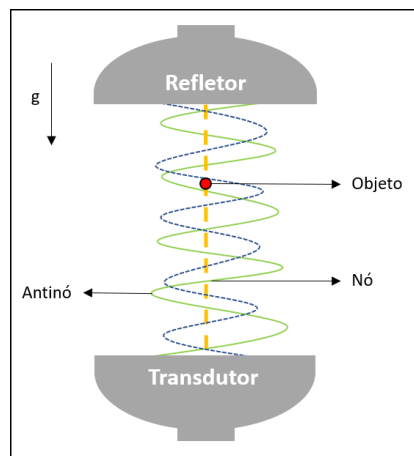


Figura 5 – Esquematização da técnica de ondas planas.

Nos nós, o movimento é nulo, gerando uma zona de baixa pressão. Em contraste, nos antinós há áreas de pressão máxima, como pode ser visto através de uma representação esquemática na Fig. 6. À medida que os objetos tendem a se mover de áreas de alta pressão para áreas de baixa pressão, ou seja, quando os objetos são colocados entre o transdutor e o refletor, ou entre as ondas planas criadas, eles se moverão em direção ao nó mais próximo e assim permanecerão (HRKA, 2015).

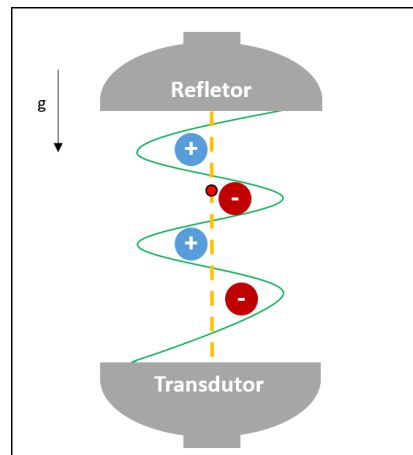


Figura 6 – Distribuição de pressão entre o refletor e o transdutor.

Apesar da sua simplicidade, essa técnica apresenta algumas limitações. Uma vez que as zonas de baixa pressão existem apenas entre os nós de onda gerados, o objeto a ser levitado só pode medir metade do comprimento da onda estável. Através da Fig. 7 é possível representar a dimensão do objeto que é capaz de ser levitado com essa técnica. Assim, apenas ondas de som de frequências acima de 20KHz podem ser utilizadas para levantar objetos macroscópicos, exigindo que a geração de frequência seja precisa (CASTRO, 2013).



Figura 7 – Levitação de uma formiga usando ondas planas.

2.4.2 Levitação acústica de campo próximo

Diferente da levitação acústica baseada em ondas planas, esta técnica não restringe o tamanho do objeto. Assim, pode ser utilizada para superar as limitações da abordagem anterior. O fenômeno de levitação acústica de campo próximo emprega oscilações

ultrassônicas de alta frequência de uma superfície vibratória para construir uma camada de gás de alta pressão, comumente conhecida como filme de compressão, entre a superfície vibratória e o objeto manipulado. A elevação de pressão mencionada acima se origina da compressibilidade do gás entre as superfícies, permitindo aumentar a pressão média dentro da película de gás acima da pressão atmosférica (ILSSAR et al., 2015).

Como resultado, é produzida uma força de carregamento, que levita o objeto carregado acima da superfície vibratória, assumindo que o primeiro é suspenso livremente. O modelo experimental elaborado por Ilssar et al. (2015) é visto na Fig. 8. As oscilações ultrassônicas também produzem flutuações de pressão rápidas, mas as oscilações resultantes experimentadas pelo objeto levitado são consideravelmente atenuadas pela inércia e muitas vezes estão em escala nanométrica.

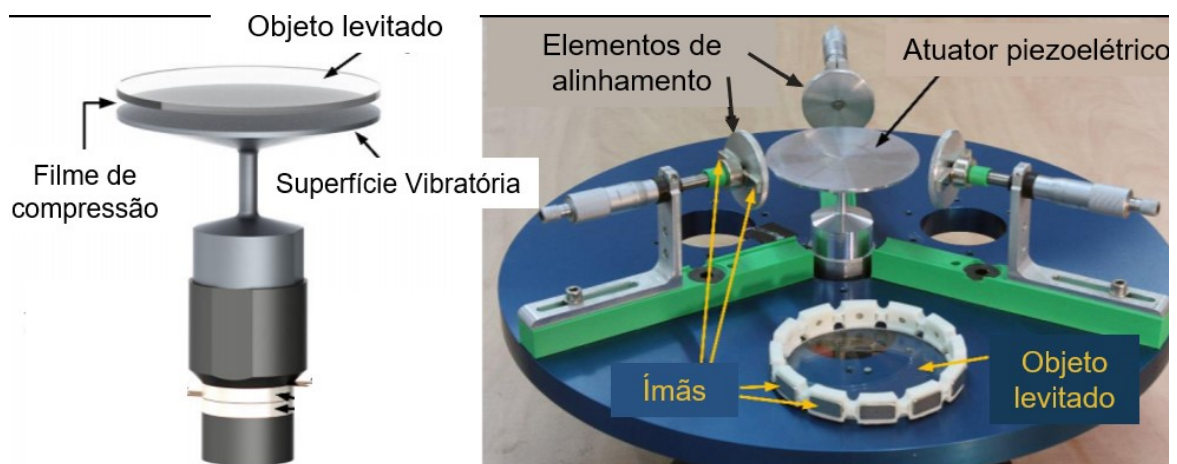


Figura 8 – Experimento de levitação acústica desenvolvido por (ILSSAR et al., 2015).

O comportamento dinâmico de um objeto levitável através da técnica de campo próximo é comumente modelado por suas equações de movimento, juntamente com a equação que rege o regime de fluxo dentro do filme de compressão.

2.5 Estudos na área de levitação acústica de campo próximo

Para superar as dificuldades que são inerentes aos mancais sem contato que já existem, novos conceitos são de grande interesse. Como uma das soluções alternativas promissoras, a levitação de campo próximo foi amplamente investigada para a construção de mancais lineares e rotativos sem contato.

Inicialmente, o mancal de filme de compressão deve ter a maioria das vantagens dos mancais aerostáticos. Em vez de ar pressurizado em mancais aerostáticos, a camada de ar é gerada por vibrações de alta frequência e então ocorre interações entre as superfícies. Não há a necessidade de uma fonte externa de ar comprimido. Esta característica permite que a interface do mancal seja tão simples quanto duas superfícies planas. O esforço adicional necessário neste tipo de mancal é proporcionar uma vibração de alta frequência para as superfícies de apoio. Protótipos de sistemas de suspensão e transporte sem contato, baseados em levitação de filme de compressão foram relatados nas últimas décadas (ZHAO, 2012).

É possível encontrar registros sobre a levitação de campo próximo alguns projetos de mancais utilizando cerâmicas piezoelétricas, inventados por Emmerich, Farron e Warnock (1960). Esses projetos usaram materiais piezoelétricos volumosos para criar amplitude de vibração uniforme em toda a superfície de mancal. Scranton (1981) sugeriu o uso de elementos piezoelétricos flexíveis para excitar o modo de vibração de flexão do mancal, o que acarretou em um sistema compacto com menos dissipação de energia.

Por outro lado, Wiesendanger (2001) desenvolveu um guia linear usando elementos de dobra piezoelétricos de forma de disco. Os transdutores são colocados na parte deslizante e operam em uma frequência de ressonância com valores ultra-sônicos. A suspensão sem contato foi realizada com sucesso. Uma vez que a vibração de um elemento de flexão é sensível à carga, a amplitude de vibração diminui quando a carga é aplicada na superfície. Portanto, a capacidade de carga desse tipo de mancal é geralmente bastante limitada.

Ide et. al. (2003) apresentaram um mancal linear. Para manter a posição lateral do controle deslizante, um feixe com uma seção transversal em L foi utilizado como um trilho guia, e um controle deslizante da mesma seção transversal é levitado por vibrações de flexão ultra-sônica, excitadas ao longo da viga. Uma onda é excitada ao longo do feixe em forma de L , e o controle deslizante com sulcos da mesma seção transversal é levitado e movido.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

De acordo com Ilssar et al. (2017), considerou-se que a dinâmica do sistema pode ser determinada através da equação de Reynolds. Esta equação foi resolvida numericamente através da aplicação da técnica de Diferenças Finitas Centradas. Foram considerados valores diferentes para a amplitude de vibração da superfície de vibração (ε) e o número de compressão (σ), permitindo avaliar a influência do mesmo no campo de pressão gerada. Assim, foram considerados alguns valores de massa diferentes para avaliar quais combinações de ε e σ poderiam promover a levitação.

3.1 Modelo matemático referente ao movimento do objeto a ser levitado

A figura 8 apresentada a seguir ilustra o problema a ser avaliado, que consiste em dois discos com valores de raio iguais, com uma distância $h(t)$ entre eles e circundados pelo ar atmosférico nas condições padrão. O disco inferior, chamado de superfície vibratória, é responsável por criar uma película de gás pressurizada (com pressão $p(x, t)$), de uma vibração senoidal induzida na sua superfície com amplitude δh e frequência ω . Dessa maneira, é gerada uma força capaz de levantar o disco superior. Além disso, o objeto levitado é submetido apenas ao campo de pressão gerado na levitação e à gravidade. Devido à sua geometria o sistema será considerado simétrico e será feito o uso de coordenadas cartesianas em sua resolução. Na Fig. 9 é representado o modelo gráfico do problema.

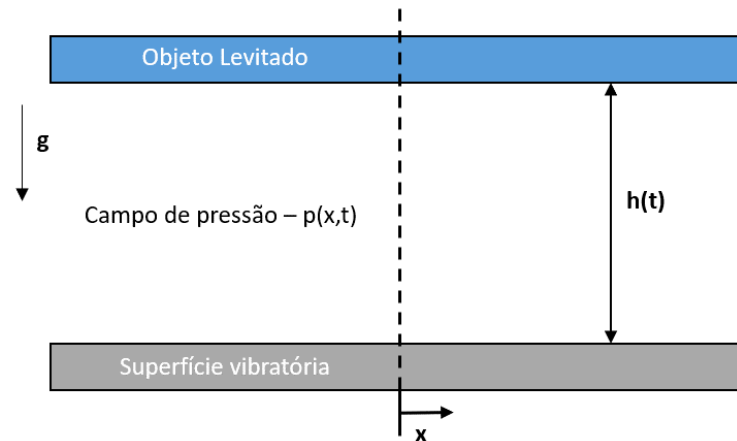


Figura 9 - Modelo gráfico do sistema simplificado.

Para simplificar a análise do campo de pressão gerado neste sistema, o objeto a levitado será considerado fixo com uma distância média h_0 da superfície vibratória, que será mantida oscilando de forma senoidal com amplitude δh e frequência constante ω .

Desta forma, o espaço entre os discos pode ser representado pela equação a seguir.

$$h(t) = h_0 + \delta h \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

3.2 Modelo matemático referente ao filme de gás

De acordo com Zhao (2010), o comportamento do filme de compressão entre o objeto e a superfície vibratória é representado pela equação de Reynolds em coordenadas cartesianas apresentadas pela Eq.(3.2).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \mu \frac{\partial (p h)}{\partial t} \quad (3.2)$$

Em que p representa a distribuição da pressão, x a distância, t é o tempo. h é a distância entre as duas superfícies e μ é a viscosidade dinâmica do ar.

3.3 Obtenção do campo de pressão gerado

Durante essa análise assumiu-se que a distância entre as superfícies levitadas e de condução é pequena quando comparada às outras dimensões do sistema. Além disso, o movimento angular do objeto levitado é desconsiderado.

Após uma sequência de simplificações a equação de Reynolds pode ser reescrita da seguinte maneira.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{h^2}{12\mu} \left(\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right) - \frac{p}{h} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.3)$$

A equação de Reynolds é resolvida na forma adimensional. Para tanto, os parâmetros não dimensionados são definidos na Eq.(3.4).

$$P = \frac{p}{p_0}, H = \frac{h}{h_0}, X = \frac{x}{L}, T = \omega t, \sigma = \frac{12\omega\mu L^2}{p_0 h_0^2}, \varepsilon = \frac{\delta h}{h_0} \quad (3.4)$$

em que σ é definido como número de compressão, L é o comprimento característico, p_0 é a pressão atmosférica e ε é a amplitude de vibração adimensional. Dessa forma, a Eq.(3.1) e a Eq.(3.2) podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$H = 1 + \varepsilon \sin(T) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(P H^3 \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \quad (3.6)$$

Assim como foi feito anteriormente para a equação na forma dimensional, é possível expandir a equação de Reynolds adimensionalizada.

H é constante em relação a X e, portanto, pode ser removido da derivada. A seguir é aplicada a regra do produto em ambos os lados da equação, tendo o seguinte resultado.

$$H^3 \frac{\partial}{\partial X} \left(P \frac{\partial P}{\partial X} \right) = \sigma \frac{\partial(PH)}{\partial T} \quad (3.7)$$

$$H^3 \left(\frac{\partial P}{\partial X} \frac{\partial P}{\partial X} + P \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} \right) = \sigma \left(\frac{\partial P}{\partial T} H + P \frac{\partial H}{\partial T} \right) \quad (3.8)$$

$$H \left(\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^2 + P \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} \right) = \sigma \left(\frac{\partial P}{\partial T} H + P \frac{\partial H}{\partial T} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{H^2}{\sigma} \left(\left(\frac{\partial P}{\partial X} \right)^2 + P \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} \right) - \frac{P}{H} \frac{\partial H}{\partial T} \quad (3.10)$$

3.4 Procedimento numérico

Na Equação (3.5), o parâmetro ε deve estar dentro do intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (SALBU, 1964). Para obter o perfil do campo de pressão no espaço, a Eq.(3.10) deve ser resolvida numericamente.

Neste trabalho, o método das diferenças finitas (abordagem centralizada) foi aplicado para discretizar a equação de Reynolds sem dimensões, Eq.(3.10), em N pontos, distantes um do outro por ΔX . A Equação (3.11) apresenta a equação de Reynolds obtida.

$$\frac{dP_i(T)}{dT} = \frac{P_i(T)}{H} \frac{dH}{dT} + \frac{H^2}{4X_i \Delta X^2 \sigma} \left[(X_i + X_{i+1})(P_{i+1}^2 - P_i^2) - (X_{i-1} + X_i)(P_i^2 - P_{i-1}^2) \right] \quad (3.11)$$

em que o subíndice i indica a discretização realizada ao longo do comprimento x . Neste caso, presume-se que a pressão inicial no intervalo é igual à pressão atmosférica, bem como a pressão na extremidade do disco (condição de contorno de Dirichlet). Além disso, a simetria é imposta no centro do disco. Assim, a derivada de pressão é nula em $x = 0$ (condição de

Neumann). As condições iniciais e de contorno consideradas são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 1 – Condições para solução numérica da equação de Reynolds

Condição inicial	$P(X, T = 0) = 1$
Condição de contorno de Dirichlet	$P(X = 0,5, T) = 1$
Condição de contorno de Neumann	$\frac{\partial P(X = 0, T)}{\partial X} = 0$

O perfil de pressão pode ser determinado para diferentes valores do σ e ε da Eq.(3.11).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da solução numérica da equação de Reynolds foi possível representar graficamente os resultados obtidos.

4.1 Campo de pressão

4.1.1 Campo de pressão variando parâmetro sigma

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam o perfil de pressão no espaço entre o objeto e a superfície vibratória para os valores de $\varepsilon = 0,5$ e $\sigma = 10, 100$ e 1000 , respectivamente. Considerando um tempo de simulação de $T = 8$ e $\sigma = 10$ resulta em uma pressão máxima de 160 KPa. É possível observar que o valor de pressão máxima está localizado perto do centro do disco e decai rapidamente à medida que ele se move em direção à borda do disco.

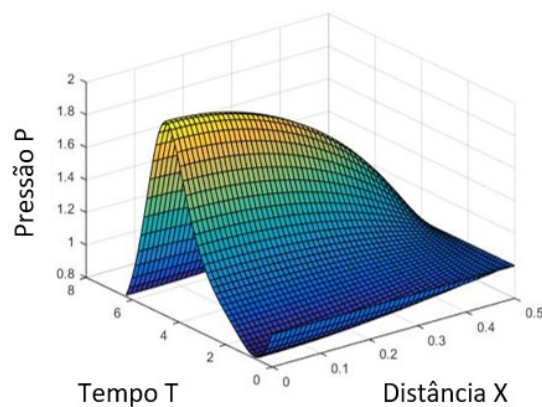


Figura 10 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 10$.

Para $\sigma = 100$, a pressão máxima foi 1,70 (equivalente a 170 KPa), em que esse valor permaneceu quase constante ao longo dos discos, diminuindo apenas para $x > 0,4$.

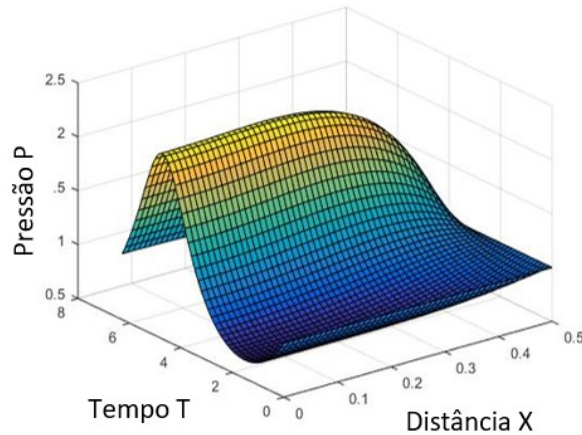


Figura 11 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 100$.

Para $\sigma = 1000$, observa-se um comportamento diferente. É visto que a pressão máxima $P = 2$ ($p = 200$ KPa) foi obtida perto da extremidade do disco ($x > 0,45$). Para a região próxima ao centro do disco, a pressão assumiu um valor $P = 1,5$ equivalente a $p = 150$ K Pa).

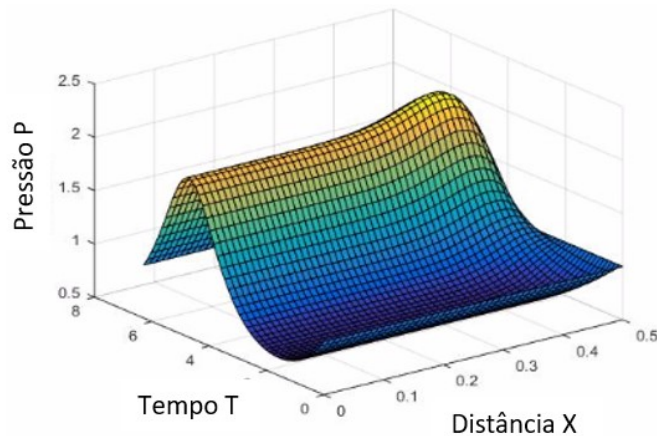


Figura 12 - Campo de pressão no intervalo variando com $\sigma = 1000$.

4.1.2 Campo de pressão variando parâmetro epsilon

É possível analisar nas figuras abaixo o comportamento do campo de pressão simulado para $\sigma = 100$ e $\epsilon = 0,01, 0,5$ e $0,9$ (Fig. 14, Fig. 15 e Fig. 16 respectivamente). Observou-se

que a distribuição da pressão ao longo do espaço tornou-se mais uniforme, começando a descer perto da borda do disco e mostrando um comportamento semelhante ao observado na Fig. 10.

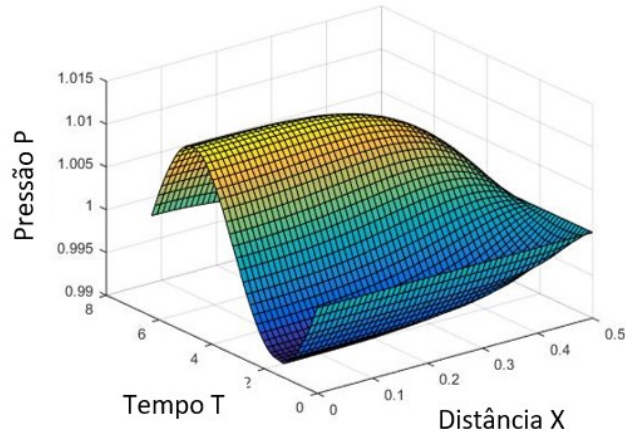


Figura 13 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.01$.

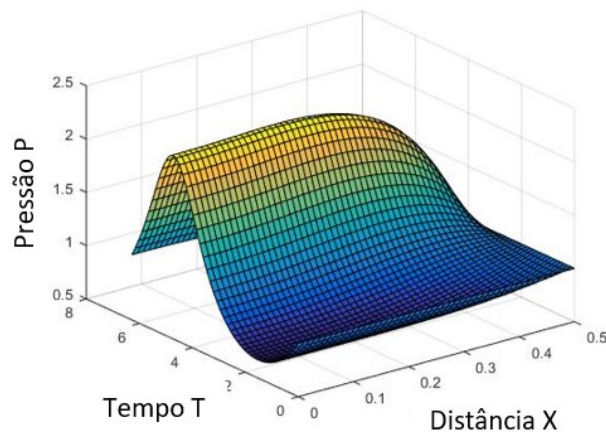


Figura 14 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.5$.

A uniformidade da distribuição de pressão no espaço entre o disco e o objeto está relacionada ao valor de σ , tendo pouca influência nesse comportamento. Por outro lado, o valor de ε exerce uma grande influência na amplitude do campo de pressão gerada. Assim, quanto maior o valor de ε , maior será o campo de pressão gerado no espaço e, conseqüentemente, a amplitude de vibração da superfície vibratória. Para $\varepsilon = 0,01$, a pressão máxima foi $P = 1,00$ ($p = 100$ KPa). Para $\varepsilon = 0,5$, $P = 1,75$ ($p = 175$ KPa) e para $\varepsilon = 0,9$, um valor de pressão $P = 9,10$ equivalente a 910 KPa.

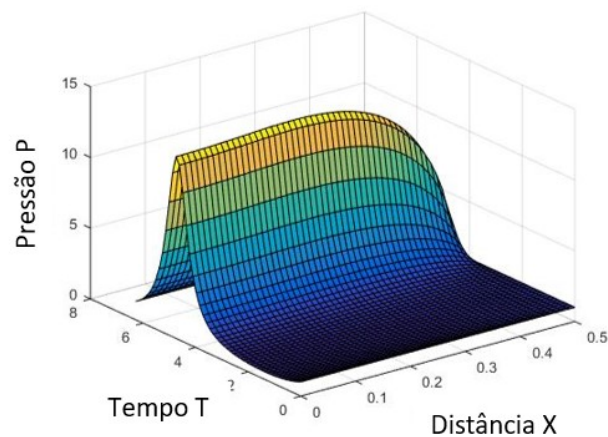


Figura 15 - Campo de pressão no intervalo variando com $\varepsilon = 0.9$.

4.1.3 Campo de pressão máxima

A Figura 16 apresenta as pressões máximas obtidas ao alterar os dois parâmetros ε e σ do sistema. Neste caso, $T = 8$, $10 \leq \sigma \leq 1000$ e $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Observe que σ exerce pequena influência sobre a pressão máxima gerada no campo de pressão, que é altamente dependente da amplitude de vibração da superfície vibratória (parâmetro ε). No contexto desta análise, pode-se observar que a pressão máxima gerada aumenta de acordo com a amplitude de vibração imposta na superfície de direção para qualquer valor de σ dentro da faixa considerada. Consequentemente, a levitação do sistema não está associada à frequência de excitação aplicada pela superfície de condução.

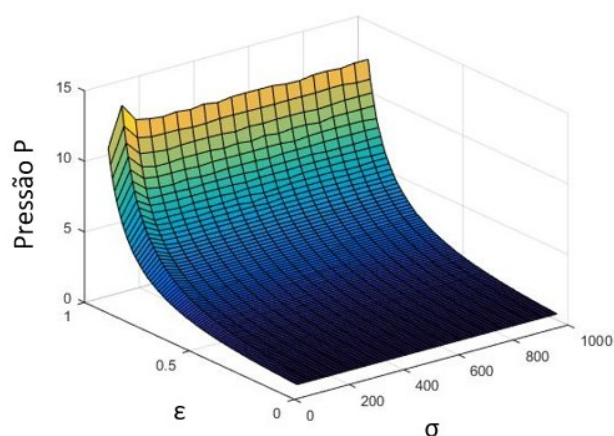


Figura 16 - Campo de pressão máxima no intervalo variando com ε e σ .

4.2 Combinação dos parâmetros sigma e epsilon para gerar levitação

As Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22, a seguir, resumem a capacidade de levitação da abordagem apresentada em termos de ϵ e σ , considerando diferentes massas para o objeto levitado. Neste caso, são avaliadas massas de 100, 50, 20, 10, 1 e 0,2 kg respectivamente, no instante de tempo $T = 6.1221$, onde foi observado os valores de pressão máxima e devido ao tempo de acomodação do sistema, considerado para todas as massas.

As regiões na cor azul representam as combinações de ϵ e σ em que pode ocorrer a levitação acústica e na cor vermelho mostra uma combinação que não é suficiente para gerar uma força capaz de levantar a massa referida.

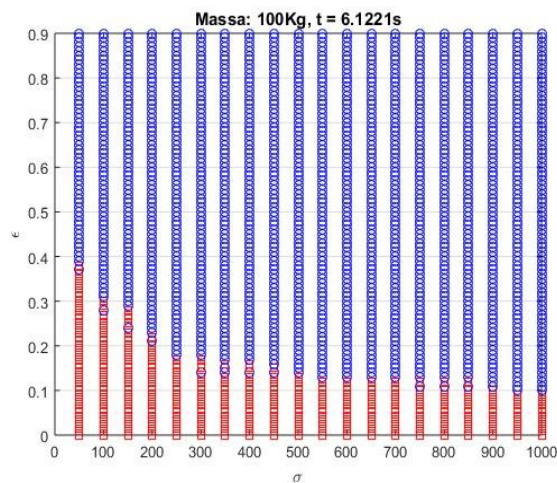


Figura 17 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $t = 6.12s$ e massa 100 kg.

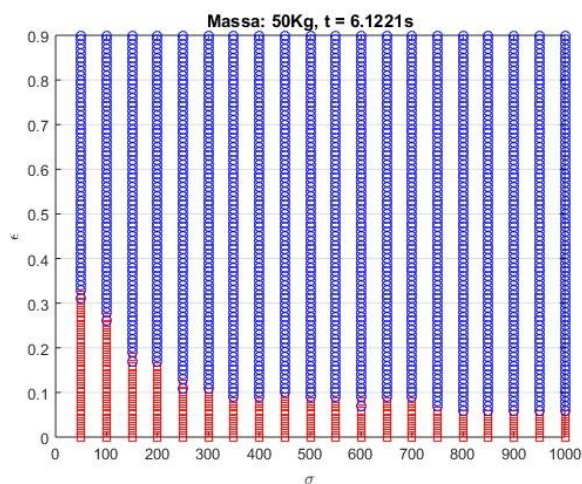


Figura 18 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $t = 6.12s$ e massa 50 kg.

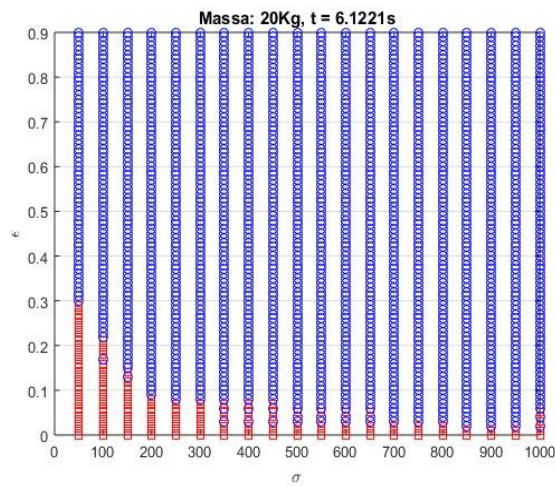


Figura 19 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $T = 6.12$ e massa 20 kg.

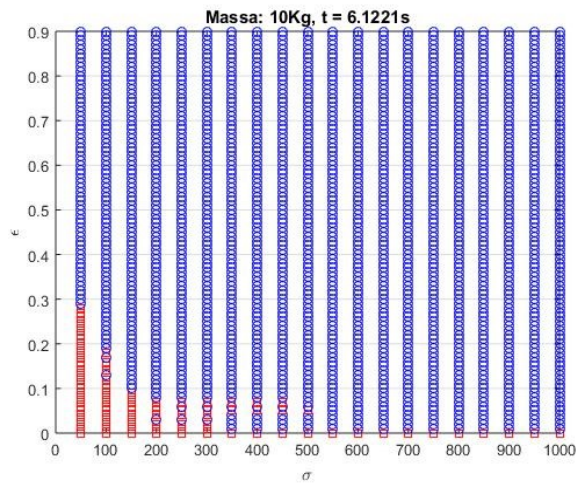


Figura 20 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $T = 6.12$ e massa 10 kg.

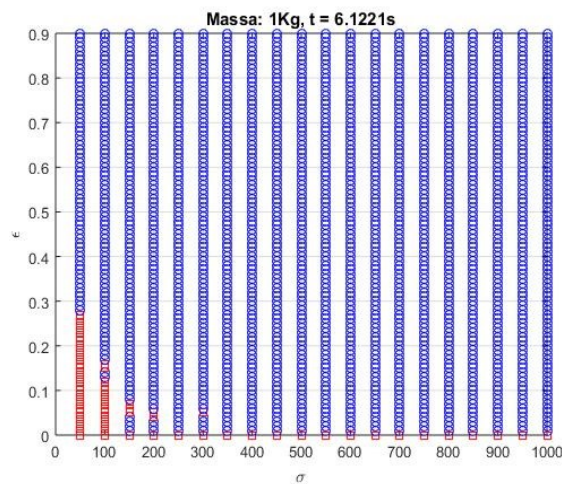


Figura 21 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $T = 6.12$ e massa 1 kg.

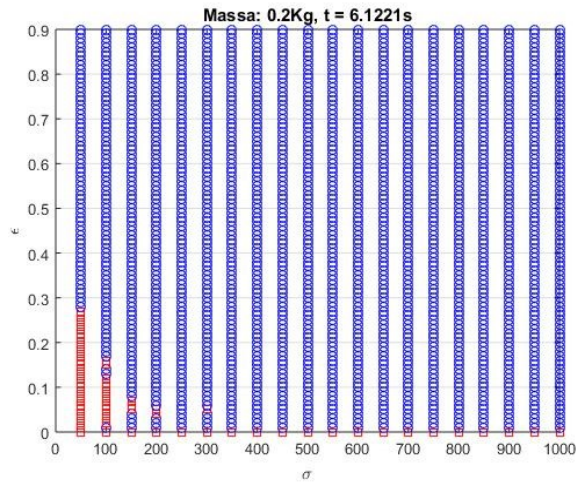


Figura 22 - Possíveis combinações de ϵ e σ no instante $T = 6.12$ e massa 0.2 kg.

Para uma massa de 100 Kg, Fig. 17, o valor mínimo de ϵ necessário para ocorrer a levitação é de 0,1 e o valor correspondente de σ é de 750. Por outro lado, para ocorrer a levitação no valor mínimo do número de compressão ($\sigma = 50$), é necessário ter $\epsilon > 0,4$. A medida que a massa diminui, o valor de ϵ necessário para promover a levitação também diminui e o sistema mantém o mesmo comportamento para as massas de 1,00, 0,20 e 0,05 Kg. Além disso, pode-se observar que para todas as massas analisadas, a levitação é alcançada à medida que σ diminui e ϵ aumenta.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliou-se numericamente a técnica de levitação acústica de campo próximo. O comportamento dinâmico do sistema foi determinado através da equação de Reynolds, que foi resolvida numericamente através da aplicação da técnica de diferenças centrada finitas para obtenção do campo de pressão formado entre o objeto levitado e a superfície vibratória.

A capacidade de levitação da abordagem apresentada foi verificada a partir de objetos com diferentes massas para uma gama de ε e σ . Foi possível concluir que a pressão máxima gerada entre os discos aumenta de acordo com ε . O parâmetro σ está relacionado à uniformidade da distribuição da pressão na lacuna. Quanto à capacidade de gerar uma força capaz de promover a levitação acústica do objeto, como esperado, mais combinações entre ε e σ resulta em levitação quanto menor é a massa do objeto.

Portanto, considerando os cenários investigados neste trabalho, os resultados obtidos são promissores, pois revelaram a capacidade da abordagem de levitação acústica em campo próximo para levantar massas até 100 kg. O esforço adicional de pesquisa será dedicado a uma futura verificação experimental dos resultados apresentados.

O estudo realizado permitiu também uma publicação no Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM) em 2017, intitulado Numerical Investigation of the Near-Field Acoustic Levitation Approach.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, M. A. B. **Estudo da força de radiação acústica em partículas produzida por ondas progressivas e estacionárias**. 2010. Dissertação de doutorado - Universidade de São Paulo.
- ANDRADE, M. A. B.; PEREZ, N.; ADAMOWSKI, J. C. **Levitação acústica**. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, v. 37, n. 2, p. 2304-1-2304-7, 2015.
- ANDRADE, M. A. B., **Estudo da força de radiação acústica em partículas produzida por ondas progressivas e estacionárias**. 2010. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo.
- CASTRO, A. **Manipulation of biomimetic objects in acoustic levitation**. 2013. Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- CHANG, D. E. Chang; REGAL, C. A. Regal; PAPP, S. B.; WILSON, D. J.; PAINTER, J. Ye, O.; KIMBLE, H. J.; ZOLLER, P. **Cavity opto-mechanics using an optically levitated nanosphere**. **PNAS**. 107 (3) 1005-1010, 2010.
- EMMERICH, C.L. **Piezoelectric oscillating bearing**, US Patent No. 3,351,393.
- FARRON, T.B.R.; JOHN, R. **Squeeze film bearings**, US Patent No. 3,471,205.
- GRIFFIN, W.S.; RICHARDSON, H.H.; YAMANAMI, S. **A study of fluid squeeze-film damping**. Journal of Basic Engineering, 88:451–456, 1966.
- HRKA, S. **Acoustic levitation**. Seminar, University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, 2015.
- ILSSAR; DOTAN; BUCHER, I. **On the slow dynamics of near-field acoustically levitated objects under High excitation frequencies**. Journal of Sound and Vibration 354:154-166, 2015.

ISART, O; JUAN, M. L.; QUIDANT, R.; CIRAC, J. I. **Towards Quantum Superposition of Living Organisms**, 2009.

OTUSUKA T.; HIGUCHI K.; SEYA, K. **Ultrasonic levitation by stepped circular vibrating plate**. 1989. The 10th Symposium on Ultrasonic Electronics, p 170.

PRICE, C. J.; DONNELLY, T.D.; GILTRAP, S.; STUART, N.H.; PARKER, S.; PATANKAR, S.; LOWE, H. F.; DREW, D.; GUMBRELL, E.. T.; SMITH, R. A. **An *in-vacuo* optical levitation trap for high-intensity laser interaction experiments with isolated microtargets**. 2015.

SALBU, E.O.J. **Compressible squeeze films and squeeze bearings**. Journal of Basic Engineering, 86:355–366, 1964.

SCRANTON, R. N. **Planar and cylindrical oscillating pneumatodynamic bearings**, US Patent No. 4,666,315.

VANDAELE, V; LAMBERT, P; DELCHAMBRE, A. **Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation**. Precision engineering. 29: 491-505, 2005.

WARNOCK Jr., L.F. **Dynamic gas film supported inertial instrument**, US Patent No. 3,339,421.

ZHAO, S.; MORJRZISH, A.; WALLASCHEK, J. **An ultrasonic levitation journal bearing able to control spindle center position**. 2012.

ZHAO, S. **Investigation of non-contact bearing systems based on ultrasonic levitation**. 2010. Doctoral dissertation - Paderborn, University.

Sala de Física Geo Cities. Disponível em
<<http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/levitacao.html>> Acesso em: 14 fev. 2018.