

## **APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ESTUDO DE PROBLEMAS DE INTERAÇÃO FLUIDO ESTRUTURA EM ENGENHARIA CIVIL**

NASCIMENTO, Anne Caroline de Paula

*Discente, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (annecaroline\_010292@hotmail.com)*

TEODORO DA SILVA, Agnaldo Antônio Moreira

*Professor Mestre, Bacharelado em Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA - Centro Universitário de Anápolis (professoragnaldoantonio@gmail.com)*

### **RESUMO**

A interação entre fluido-estrutura é um fenômeno multifísico que acontece constantemente em qualquer meio, desde coisas naturais como o vento nas folhas das árvores ou o sangue nas artérias sanguíneas, até as áreas desenvolvidas pela engenharia como o vento em turbinas eólicas ou rotores das máquinas rotativas. Neste trabalho estuda-se o acoplamento fluido-estrutura em sistemas bidimensionais e qual a interferência que um tem sobre o outro. Esse estudo é feito com descrição Lagrangeana para o sólido e Euleriana para o fluido utilizando o método dos elementos finitos (MEF). A aplicação deste método é feita no software ANSYS, o qual demonstrará as frequências necessárias para o estudo e suas formas modais. O software utilizado foi validado em um primeiro caso com equações analíticas, demonstrando que os erros são razoavelmente baixos para malhas refinadas. Os casos considerados neste trabalho são exemplos reais ou similares à realidade, com o intuito de avaliar os fenômenos estudados na hidráulica. Compreender esses efeitos é importante para que se faça um dimensionamento mais criterioso dos sistemas envolvidos, a fim de se evitar problemas futuros.

### **PALAVRAS CHAVE**

Interação fluido estrutura. Método dos elementos finitos. ANSYS.

## 1 INTRODUÇÃO

A interação que se dá dos fluidos nas estruturas vem desde os primórdios da humanidade e persistirá pelo restante dos anos. A variedade de sistemas que envolvem essa interação é muito grande, e podemos citar as turbinas eólicas, o vento sobre as edificações, válvulas sanguíneas, e outras. O Estudo dessas interações está se tornando cada dia mais viável e utilizado em diversas engenharias, no campo da engenharia civil podemos citar trabalhos como os de Pedroso (1982), Morais (2000), Souza (2007), Silva (2018) e outros.

Segundo Amaral (2016) a interação fluido-estrutura (IFE) é o elo em que se envolvem diferentes leis da física, sobressaltando a mecânica estrutural e dinâmica dos fluidos, e a solução para os problemas dessa interação é melhor analisada quando feita de forma acoplada para que se obtenham os melhores resultados.

Com intuito de estudar estruturas de grande porte em contato com o fluido o presente trabalho aplicará análise modal usando como ferramenta matemática MEF por ser um procedimento que subdivide em parte o domínio do problema, resultando em vantagens como o melhor carregamento das condições de contorno e suas deformidades, uma análise mais completa da estática e dinâmica do sistema analisado, dentre outras. Esse método permite assim uma melhor análise da IFE analisando o deslocamento potencial da estrutura e deformação e pressão do fluido exercido.

## 2 METODOLOGIA

O estudo da IFE surge da necessidade de analisar diversos sistemas da engenharia, onde diversos equipamentos contêm ou estão contidos em meios líquidos ou gasosos e a pressão que o fluido exerce na estrutura é importante para entender o comportamento de ambas e assim prevenir e detectar anormalidades no equipamento.

Inicialmente o trabalho parte de uma pesquisa exploratória onde foi proporcionado conhecimentos sobre o tema desenvolvido e sobre assuntos relacionados que são importantes. Nessa pesquisa foi feita uma análise sobre interação fluido estrutura, método dos elementos finitos, suas aplicações e trabalhos realizados.

A partir do estudo teórico a respeito da IFE, o trabalho realizará estudos de caso de estruturas de grande porte fazendo a modelagem de sistemas acoplados e

desacoplados no *software* ANSYS V 19.0 *Student License*, onde é realizada a simulação computacional utilizando o MEF.

### 3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

#### 3.1 INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Segundo Cicigliano (2010) a interação fluido-estrutura trata-se do efeito em que o fluido traz para determinada estrutura, e é o acoplamento de diferentes leis da física, as mais importantes para o presente trabalho são: dinâmica dos fluidos e dinâmicas da estrutura. Esta conexão, leva em consideração o campo de pressão, velocidades, viscosidade, vibração, efeito térmico e outros, para uma análise estrutural, e suas consequências estruturais no plano incidente.

Segundo Sousa Junior (2006), na engenharia a interação entre a mecânica dos meios contínuos diferentes aparece em diversos problemas, e a solução não é possível individualmente, apenas de forma simultânea. Esses problemas podem ser classificados em acoplamento forte ou fraco, dependendo do grau de interação. Zienkiewicz (1985) apud Souza Junior (2006) apresentou duas classes de problemas acoplados, sendo elas classe I e II, a primeira envolve casos em que o acoplamento ocorre em uma interface via imposição de condições de contorno, os meios sofrem diferentes processos de discretização, mas na interface há o acoplamento. E a segunda classe, caracteriza a superposição de domínios, o acoplamento se dá nas equações diferenciais que governam diferentes fenômenos físicos. O autor defende ainda que existem duas formas clássicas de abordar a IFE: Formulações Lagrangeanas e as Eulerianas. Para uma análise dos sólidos é ideal que se faça uma formulação de um sistema isolado, gerado por descrição Lagrangeana, à medida que para uma análise dos fluidos o mais aconselhável é uma formulação obtida através do emprego de volume de controle, com descrição Euleriana.

#### 3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Mirlisenna (2016) explica que os finitos elementos pontuados são conectados entre si por pontos chamados nós ou pontos nodais, as linhas entre um ponto e outro, são as arestas. O conjunto menor desses pontos é chamado de elementos. Ao conjunto de todos

esses itens se dá o nome de malha. Vale ressaltar que a precisão do MEF depende do tamanho da malha analisada, quanto menor forem os vãos e maior o número de nós, mais preciso será o resultado da análise.

O MEF abrange modelar a estrutura usando pequenos elementos interconectados, formando as malhas. Para cada nó presente nessa malha estão associadas funções de deslocamento, e estes são conectados direta ou indiretamente a todos os outros elementos do meio.

O *software* utilizado para desenvolvimento do trabalho é o ANSYS V19.0 *Student License*, um programa comercial que utiliza o método dos elementos finitos. A principal característica deste *software* é a facilidade e a agilidade na avaliação de problemas acoplados e desacoplados representando as formas modais da estrutura e do fluido. Os resultados numéricos encontrados nesse *software* serão validos a partir de equações analíticas apresentadas por Pedroso (2006) apud Silva (2018).

### 3.3 ANÁLISE MODAL

Nobrega e Hanai (2005) definem a análise modal como um processo de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático do comportamento dinâmico do sistema com o objetivo de determinar fatores como as frequências naturais, parâmetros modais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal. As frequências naturais representam o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela, essa função é direta da rigidez e inversa da massa de estrutura, embora uma estrutura tenha diversas frequências naturais, a mais importante é a primeira, que é designada como fundamental. Os modos de vibração podem ser classificados como a forma que a estrutura vibra, ou seja, para cada frequência natural existe um modo de vibração específico. A propriedade interna da estrutura em dissipar a energia é chamada de amortecimento, é essa taxa que dissipará a energia cinética do movimento.

Para Almeida (1990) é importante ter conhecimento do mecanismo comportamental de estruturas e seus componentes, pois através desse conhecimento é que se pode formular um modelo matemático o qual representará o sistema. E através da determinação das propriedades dinâmicas de uma estrutura pela identificação de seus modos de vibração é possível de se realizar uma análise modal do sistema.

### 3.4 EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA VALIDAÇÕES

As análises dos sistemas desacoplados a estrutura e do fluido, e dos acoplados são feitas com as formulações apresentadas por Pedroso (2006) apud Silva (2018).

#### 3.4.1 Solução desacoplada da estrutura

A determinação da frequência natural da estrutura é determinada através da Equação 8, contudo ela depende das equações de frequência de vigas com deformação de cisalhamento e flexão, respectivamente  $\omega_c$  e  $\omega_f$  podem ser obtidas por intermédio de Equações específicas 9 e 10. A frequência natural axial de uma viga engastada é dada pela Fórmula 11.

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega_c^2} + \frac{1}{\omega_f^2} \quad (1)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda_{ic}}{2\pi L} \sqrt{\frac{KG}{\rho}} \quad (2)$$

$$\omega_f = \frac{\lambda_{if}^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \quad (3)$$

$$\omega_A = \frac{\lambda_{iA}}{2\pi L} \sqrt{\frac{EA}{\bar{m}}} \quad (4)$$

Sendo que:

$\lambda_{ic}$ ,  $\lambda_{if}$  e  $\lambda_{iA}$  são coeficientes adimensionais, respectivamente Equações 12, 13 e 14.

$$\lambda_{ic} = \frac{(2i-1)\pi}{2} \quad i = 0,1,2,3,4 \dots \quad (5)$$

$$\lambda_{if} = \left[ 1,8751 \ 4,6340 \ 7,8548 \ 10,9955 \ 14,1371 \ \frac{(2i-1)\pi}{2} \right] \quad (6)$$

$$i \geq 5$$

$$\lambda_{iA} = \frac{(2i-1)\pi}{2} \quad i = 0,1,2,3,4 \dots \quad (7)$$

K representa o coeficiente de cisalhamento, Equação 15;

$$K = \frac{10(1 + \nu)}{12 + 11\nu} \quad (8)$$

G é o modulo de elasticidade transversal, Equação 16;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (9)$$

Onde:  $\rho$  representa a densidade do material, E é o modulo de elasticidade, I é o momento de inercia da seção transversal, A é a área da seção transversal, L é o comprimento,  $\bar{m}$  é a massa por unidade de comprimento da estrutura.

### 3.4.2 Solução desacoplada do fluido

Para o estudo do fluido desacoplado serão feitas duas análises, uma para a superfície livre do fluido onde ocorre o efeito de sloshing, e uma para a pressão nula exercida sobre a água. A cavidade é entendida como a composição de duas cavidades 1D, aberta-fechada na direção y e fechada-fechada na direção x.

- Cavidade aberta - fechada

Na condição de contorno aberta-fechada a pressão  $p_1$  é nula e a vazão mássica  $q_2$  é nula, assim encontramos a fórmula para determinação da frequência representada pela Equação 17.

$$\omega_x = \frac{C}{L} \pi \left( i + \frac{1}{2} \right) \quad (10)$$

Onde  $i$  é o número de modos = 0,1,2,3,4 ...

- Cavidade fechada - fechada

Na condição de contorno fechada – fechada a vazão acústica que é nula, considera-se  $q_1$  e  $q_2$  nulos, assim se obtém uma matriz de transferência que após resolvido o sistema temos a Equação 18 de frequência.

$$\omega_y = \frac{i\pi C}{L} \quad (11)$$

As frequências naturais para a cavidade 2D é determinada pela raiz quadrada de  $\omega_x$  e  $\omega_y$ , ambos os termos elevados ao quadrado, como mostra a Equação 19.

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (19)$$

A frequência da superfície líquida livre, onde ocorre o efeito de *sloshing* é dada pela Equação 20 a seguir:

$$\omega_{sl}^2 = \frac{i \cdot \pi}{2L} \cdot g \cdot \tanh\left(\frac{i\pi H}{2L}\right) \quad (20)$$

### 3.4.3 Solução acoplada do fluido- estrutura

Para análise do sistema acoplado é usado a composição de duas cavidades 1D, na direção x pistão-pistão e na direção y cavidade aberta-fechada, respectivamente, Equações 21 e 22.

$$\left[ \frac{\omega_x^2 L^2 m_e}{c^2 m_f} - \frac{\omega_x L}{c} \left( \cot \frac{\omega_x L}{c} \mp \operatorname{cosec} \frac{\omega_x L}{c} \right) \right] = K \frac{1}{\rho c^2 S} \quad (21)$$

$$\omega_y = \frac{c \cdot \pi \cdot (j + 0.5)}{H} \quad (22)$$

O primeiro modo da massa adicional deve ser calculado pela Equação 23.

$$\omega_x = \sqrt{\frac{K}{m_e + \frac{m_f}{2}}} \quad (23)$$

A partir das equações realizadas, as frequências naturais para cavidade 2D são dadas pela Equação 24.

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (24)$$

### 3.5 ERRO RELATIVO

O erro relativo entre os dois métodos foi dado pela Equação 25.

$$\varepsilon = \left| \frac{\text{frequência analítica} - \text{frequência numérica}}{\text{frequência numérica}} \right| \cdot 100 \quad (25)$$

## 4 ESTUDO DE CASO

O caso apresentado trata-se de um modelo de sistema acoplado fluido estrutura semelhante ao sistema do Canal do Panamá, como mostra a Figura 1.

**Figura 1 – Representação esquemática do modelo 2D acoplado fluido estrutura**



**Fonte: Própria autora, 2018.**

A estrutura sólida, com dimensão de 10 m da altura e 1 m de largura é engastada no apoio e a parte superior é livre. O fluido é uma cavidade quadrada de 10 m, com fundo e lateral com pressão nula e superfície livre, ora analisada com pressão 0, outra aplicada superfície livre onde acontece o *sloshing*.

As propriedades físicas adotadas são: módulo de Young  $E=211$  GPa, coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$  e massa específica  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup> para a estrutura de aço, O fluido tem massa específica  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup> e a velocidade do som  $c= 1500$  m/s.

A Tabela 1 apresenta as frequências numéricas obtidas pelo *software* e as analíticas por meio das equações para uma viga engastada livre. A tabela também expõe



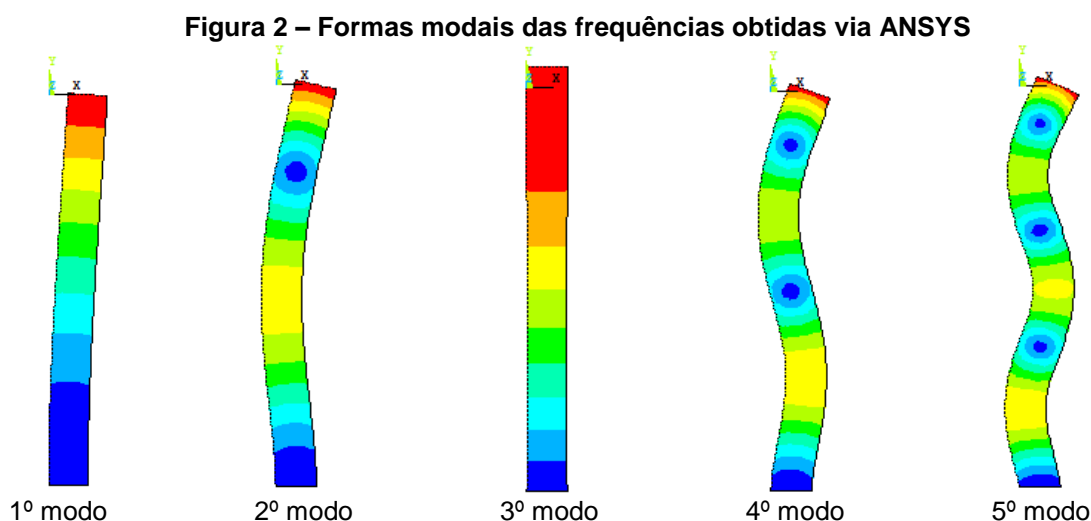
o erro relativo que em comparação entre ambos os métodos o máximo foi de 4,92%, tal discrepância se dá ao refinamento da malha de elementos finitos.

**Tabela 1 – Frequências numéricas e analíticas da estrutura desacoplada**

Modo	Método numérico	Método analítico	Erro (%)
	Frequência (Rad/s)	Frequência (Rad/s)	
1	52,44	52,45	0,01
2	314,77	321,97	2,28
3	818,00	816,98	0,12
4	829,69	861,06	3,64
5	1508,91	1587,02	4,92

Fonte: Própria autora, 2018.

A Figura 2 apresenta formas modais da estrutura desacoplada extraídas do ANSYS. Os modos da estrutura são divididos em modo flexional e modo axial. Observa-se que o modo 3 apresenta uma deformação tracional caracterizando um modo axial, enquanto os outros modos tiveram deformações laterais, assim chamada de modos de flexão.



Fonte: Própria autora, 2018.

O efeito de *sloshing* é considerado no fluido e analisado em sua forma desacoplada a fim de saber quais são as frequências do fluido. A Tabela 2 apresenta o comparativo entre o método numérico e o analítico para a superfície livre.

**Tabela 2 – Frequências numéricas e analíticas do fluido desacoplado considerando o efeito de sloshing**

Modo	Método numérico	Método analítico	Erro (%)
	Frequência (Rad/s)	Frequência (Rad/s)	
1	1,72	1,74	1,00
2	2,47	2,47	0,01
3	3,02	3,02	0,04
4	3,49	3,49	0,06
5	3,91	3,91	0,05

Fonte: Própria autora, 2018.

O comparativo entre os métodos de análise para o fluido desacoplado cavidade acústica é apresentado na Tabela 3, o método analítico quando comparado ao numérico apresentou um erro relativo máximo de 0,92% demonstrando que o processo de resolução adotado no presentado trabalho está em concordância com a literatura e os fenômenos estudados.

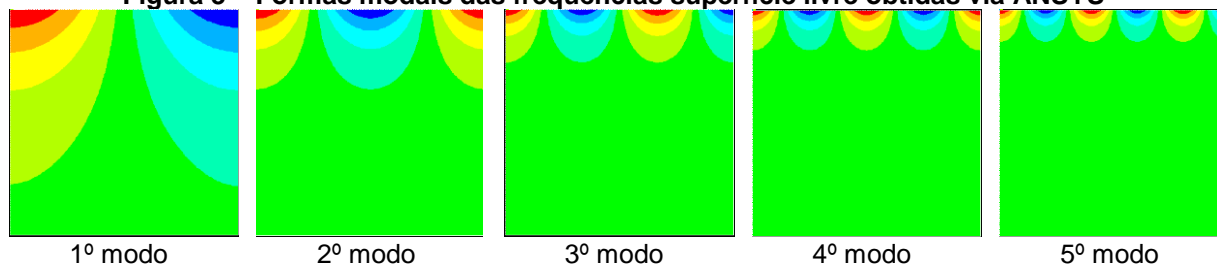
**Tabela 3 – Frequências numéricas e analíticas do fluido desacoplado cavidade**

Modo	Método numérico	Método analítico	Erro (%)
	Frequência (Rad/s)	Frequência (Rad/s)	
1	235,62	235,61	0,00
2	522,71	526,86	0,79
3	706,92	706,85	0,01
4	847,03	849,53	0,29
5	962,58	971,48	0,92

Fonte: Própria autora, 2018.

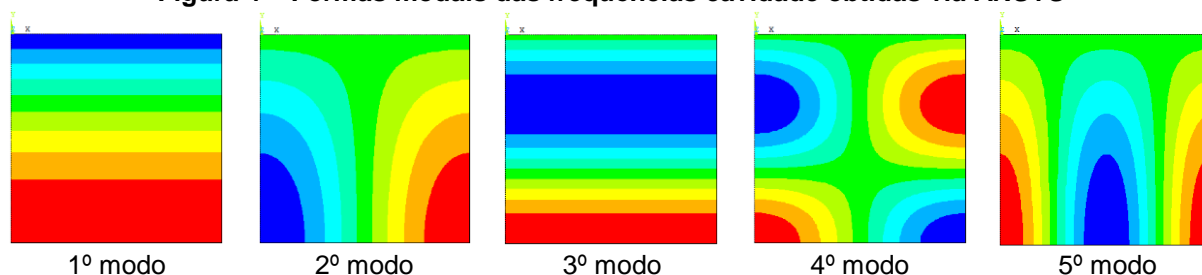
As formas modais do fluido desacoplado com efeito de *sloshing* na superfície são apresentadas na Figura 3 e a Figura 4 representa as formas modais para o fluido cavidade.

**Figura 3 – Formas modais das frequências superfície livre obtidas via ANSYS**



Fonte: Própria autora, 2018.

**Figura 4 – Formas modais das frequências cavidade obtidas via ANSYS**



Fonte: Própria autora, 2018.

O efeito de *sloshing* considerado anteriormente de forma desacoplada, agora é analisado acoplado, a partir desse estudo se observa a pressão que o fluido exerce na estrutura. A Tabela 4 representa os valores numéricos e analíticos encontrados para esse acoplamento com superfície livre e a tabela 05 apresenta os resultados de frequências para a cavidade acústica.

**Tabela 4 – Frequências numéricas e analíticas do sistema acoplado com pressão 0**

Modo	Método analítico	Método Numérico	Erro (%)
	Frequência (Rad/s)	Frequência (Rad/s)	
1	1,74	1,75	0,27
2	2,47	2,48	0,38
3	3,02	3,04	0,44
4	3,49	3,51	0,40
5	3,91	3,92	0,25

Fonte: Própria autora, 2018.

Como dito anteriormente, a solução analítica para o sistema acoplado fluido estrutura se dá por meio da combinação de algumas equações. As frequências naturais analíticas e numéricas obtidas são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 05 – Frequências numéricas e analíticas do sistema acoplado com pressão 0**

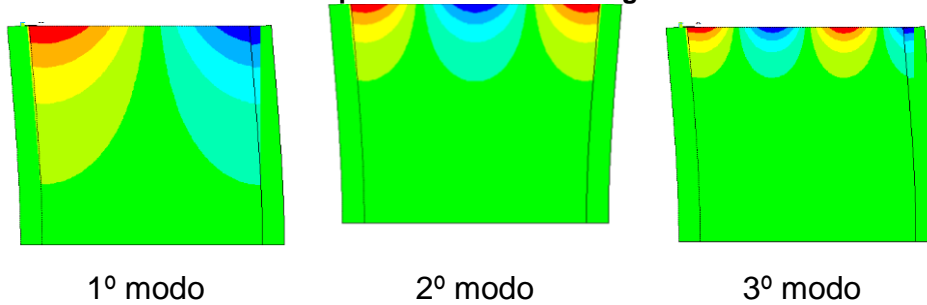
Modo	Método numérico	Método analítico	Erro (%)
	Frequência (Rad/s)	Frequência (Rad/s)	
1	45,17	43,50	3,85
2	46,87	43,58	7,55
3	234,99	213,20	10,22
4	275,20	237,30	15,97
5	370,77	316,03	17,32

Fonte: Própria autora, 2018.

Nota-se que a porcentagem de erro entre os dois métodos na superfície livre é muito baixa, sendo inferior a 1%, sendo considerada uma boa margem. A Figura 5 demonstra as formas modais da estrutura acoplada com superfície livre, e a Figura 6 representa as formas modais da cavidade acústica.

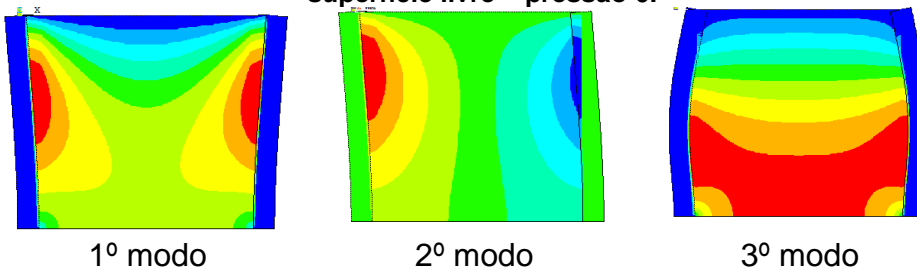
Ao observar as frequências naturais para os casos com e sem superfície livre constata-se que a superfície livre não interfere nas frequências de cavidade. A superfície livre é desacoplada do sistema.

**Figura 5 – Formas modais do sistema acoplado fluido estrutura com superfície livre – Sloshing**



Fonte: Própria autora, 2018.

**Figura 6 – Formas modais do sistema acoplado fluido estrutura com superfície livre – pressão 0.**



Fonte: Própria autora, 2018.

Os modos são classificados em modos de massa adicional (MA), modos estrutura (ME) e modos cavidade (MC). Cada modo é determinado observando as frequências dos casos desacoplados e comparando-as com os casos acoplados. Conhecer quem domina em cada modo é de grande importância para o dimensionamento de cada elemento. A Tabela 6 apresenta um comparativo entre a estrutura desacoplada e a acoplada e apresenta qual o tipo de modo ela é classificada.

Tabela 66 – Comparativo frequências naturais desacoplada e acoplada

Modos de vibração	Frequências naturais (Rad/s)			
	Estrutura desacoplada	Cavidade desacoplada	Cavidade acoplada	Análise do modo dominante
1	52,44	235,61	45,17	MA
2	314,77	522,71	46,87	MA
3	818,00	706,92	234,99	ME
4	829,69	847,03	275,20	MC
5	1508,91	962,58	370,77	ME

Fonte: Própria autora, 2018.

## 4 CONCLUSÃO

Ao longo da pesquisa é apresentado um estudo do que é a IFE, a ação e a reação que o fluido e o sólido têm quando são forçados um contra o outro gerando campos de pressão no sistema. Esses campos de pressão foram calculados por meio de equações analíticas para validação do sistema numérico, obtido no ANSYS, um *software* que utiliza o MEF para fazer a análise do sistema. O estudo baseou-se em uma formulação variacional com descrição Lagrangeana para o sólido e Euleriana para o fluido e foi discretizado pelo MEF. Ressalta-se que a nível acadêmico, os estudos dessas formulações não foram aprofundados, visto que o objetivo é o apresentar o resultado encontrado.

Na cavidade acústica o fluido pode ser considerado hidroelástico ou vibroacústico. No centro da cavidade ele é considerado vibroacústico, onde o fluido é considerado compressível, visto que devido ao peso da água ela pode sofrer algum tipo de compressão. Já na superfície da cavidade, onde é aplicado o efeito de *sloshing* o fluido é considerado incompressível, ou seja, hidroelástico, pois a única força que atua sobre ele é a da atmosfera e ela não é grande o suficiente para comprimir o fluido.

O MEF foi aplicado em uma análise bidimensional dos casos, foram discretizados e subdivididos em malhas refinadas, onde os resultados já não sofrem grandes alterações devido ao momento chamado de convergência de resultados. As tensões e efeitos foram padronizados a fim de que se tivesse uma linha de equações a ser seguida nos estudos dos casos. A análise modal posteriormente realizada fez um estudo das vibrações do sistema, primeiro desacoplado da estrutura e do fluido, logo em seguida acoplada dos dois elementos, com o intuito de obter as frequências naturais e formas modais. Com essa análise é possível determina o modo de frequência como flexional ou torcional.

A presente pesquisa também demonstra a importância de se estudar vibrações a nível de graduação incitando os estudantes da área de projetos a importância de estudar o efeito de vibrações na estrutura e conceitos iniciais importantes para o estudo na área.

## 5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Márcio T de. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. 2. ed., São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

AMARAL, Luiz. **Interação Fluido Estrutura: O que é?** Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/interacao-fluido-estrutura-o-que-e/>>. Acesso em: 15 maio 2018.

CICIGLIANO, Emerson Carlos dos Santos. **Análise numérica do escoamento de fluido em tubos elásticos**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia - UNESP, Ilha Solteira - SP, 2010.

MIRLISENNA, Giuseppe. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: O QUE É?** 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 31 maio 2018.

MORAIS, Marcus Vinicius Girão de. **Modelagens numéricas pelo método dos elementos finitos em problemas de interação fluido estrutura**. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

NÓBREGA, Petrus Gorgônio B. da; HANAI, João Bento de. **A análise modal na avaliação de estruturas de concreto pré-moldado**. São Carlos, 2005.

PEDROSO, Lineu José. **Alguns aspectos da interação fluido estrutura em estruturas "off shore"**. 1982. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1982.

SILVA, Agnaldo Antônio Moreira Teodoro da. **Acoplamento fluido estrutura U-P não simétrica de problemas vibroacústicos e hidroelásticos por elementos finitos 2D isoparamétricos**. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Integridade de Materiais da Engenharia, Universidade de Brasília, Gama, Distrito Federal, 2018.

SOUSA JUNIOR, Luis Carlos de. **Uma aplicação dos métodos dos elementos finitos e diferenças finitas à interação fluido estrutura**. 2006. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUZA, Soraya Mendes de. **Contribuição para uma metodologia de análise acoplada fluido estrutura em cavidades acústicas com paredes flexíveis**. 2007. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.