



**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE PROBLEMAS DE INTERAÇÃO
DINÂMICA FLUIDO-ESTRUTURA COM APLICAÇÃO A BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO**

DAVIDSON DE OLIVEIRA FRANÇA JÚNIOR

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE
PROBLEMAS DE INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO-ESTRUTURA
COM APLICAÇÃO A BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO

DAVIDSON DE OLIVEIRA FRANÇA JÚNIOR

ORIENTADOR: LINEU JOSÉ PEDROSO

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD-03A/22
BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE
PROBLEMAS DE INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO-ESTRUTURA
COM APLICAÇÃO A BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO**

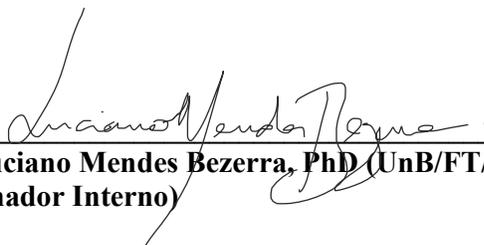
DAVIDSON DE OLIVEIRA FRANÇA JÚNIOR

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:



**Prof. Lineu José Pedroso, Dr. Ing. (UnB/FT/ENC)
(Orientador)**



**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB/FT/ENC)
(Examinador Interno)**



**Prof. Selênio Feio da Silva, DSc. (UFPA/ITEC)
(Examinador Externo)**



**Prof. Neander Berto Mendes, DSc. (UEG-CCET/ANH)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 02 DE AGOSTO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

FRANÇA JR, DAVIDSON DE OLIVEIRA

Estudo analítico-numérico e experimental de problemas de interação dinâmica fluido-estrutura com aplicação a barragens e eclusas de concreto. [Distrito Federal] 2022.

xxx, 262p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2022).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. Barragens | 2. Eclusas |
| 3. Interação Fluido-estrutura | 4. Método dos elementos finitos |
| 5. Artificio do Campo de Pressão Prescrito | 6. <i>Sloshing</i> |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FRANÇA JR, D. O. (2022). Estudo analítico-numérico e experimental de problemas de interação dinâmica fluido-estrutura com aplicação a barragens e eclusas de concreto. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-03A/22, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 262p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Davidson de Oliveira França Júnior

TÍTULO: Estudo analítico-numérico e experimental de problemas de interação dinâmica fluido-estrutura com aplicação a barragens e eclusas de concreto.

GRAU: Doutor

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Davidson de Oliveira França Júnior

SHCES 1107, Bloco A, Entrada B, Apartamento 403 – Cruzeiro Novo

CEP: 70658-1171 Brasília/DF - Brasil

e-mail: davidson.francajunior@gmail.com

DEDICATÓRIA

**Dedico esta conquista a minha família!
Em especial a minha mãe, meu irmão, minha irmã e meu pai.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus familiares, em especial a minha mãe Maria Aparecida pelo amor incondicional, pela educação, conselhos diários e tudo na vida, pois sem você nada na minha vida faria sentido. Ao meu irmão José Marques e minha irmã Denise França pelo amor incondicional, por todo apoio, amizade e companheirismo. Ao meu pai Davidson França, pelo incentivo e ensinamentos de como ser honesto.

Agradeço ao meu orientador, professor Lineu José Pedroso, pelos grandiosos ensinamentos, apoio, incentivo e por me tornar uma melhor pessoa. A sua dedicação, ética, comprometimento e presteza na sua função de professor é algo admirável que irei levar sempre como exemplo para minha carreira profissional.

Aos professores Luciano Mendes Bezerra, Guilherme Santana Alencar, Selênio Feio da Silva e Neander Berto Mendes, pelas correções e contribuições neste trabalho. Ao professor Paulo Marcelo Vieira Ribeiro por todas as sugestões, reuniões e dicas. Me sinto muito honrado em poder ter tido um aprendizado com todos vocês.

Aos meus amigos de todos os lugares pela amizade e companheirismo na vida. Primeiro, àquela que esteve presente todos os dias, tornando-se uma excelente companheira, Jéssica Borges. E àqueles com quem compartilhei risadas e dificuldades ao longo dos tempos de PECC, cito aqui alguns: Carlos Araújo, Bryan, Vanessa, Mariana Ximenes, Stephanie, Divino, Dyorgge Alves, Thiago Arnaud, Álvaro Neto, Thiarly, Pedro Filipe, Jerfson, João Paulo Xavier, Robson Lopes, Iago, Danilo Nunes, Luiza Rodrigues, Laís Bandeira e Gabriel Lima.

Agradeço aos amigos do GDFE, em especial, a Iarly Vanderlei, Nailde Amorin, Maurício Vitali e Mário Freitas. Obrigado pelas dicas e amizade.

Agradeço à UnB, ao PECC e em especial a CAPES pelo auxílio financeiro durante o doutorado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação, a vocês o mais sincero agradecimento.

RESUMO

ESTUDO ANALÍTICO-NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE PROBLEMAS DE INTERAÇÃO DINÂMICA FLUIDO-ESTRUTURA COM APLICAÇÃO A BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO

Autor: Davidson de Oliveira França Júnior

Orientador: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Agosto de 2022

As barragens e eclusas de gravidade em concreto são estruturas, quase sempre de grande porte, as quais possuem acentuada variedade de uso, conforme a necessidade de cada região, onde são implantadas. Na engenharia dessas estruturas é imprescindível a garantia das mínimas condições de segurança, uma vez que o rompimento delas, pode gerar verdadeiras catástrofes tanto no âmbito econômico quanto no social e ambiental. Decorrente disso, este trabalho aborda um estudo analítico-numérico e experimental de problemas de interação dinâmica fluido-estrutura, com aplicação em barragens e eclusas de gravidade em concreto. A princípio, uma metodologia analítica simplificada, denominada Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP), foi feita para determinar as frequências naturais desacopladas e acopladas fluido-estrutura associadas aos modos dominantes de massa adicional em um regime incompressível. O ACPP abrange estruturas com inércia constante ou linearmente variável, bem como possibilita obter as frequências associadas as pressões hidrodinâmicas impulsivas para diferentes modos de vibração em um problema acoplado barragem-reservatório e eclusa-reservatório. Os resultados obtidos pelo ACPP foram confrontados com o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* ANSYS®, com o Método Pseudo-dinâmico, com o Método da Matriz de Transferência Modificado (MMTM) e com resultados disponíveis na literatura. Os estudos comparativos foram aplicados em diversas geometrias de barragens e eclusas. As respostas das frequências foram satisfatórias e demonstraram diferenças percentuais inferiores a 5% no regime incompressível. No regime compressível as diferenças percentuais são maiores (em torno de 10 a 20%). O ACPP também foi aplicado na determinação das frequências na barragem de Pina Flat, barragem de Tsuruda e barragem de Koyna. Um estudo paramétrico avaliando a influência de parâmetros atrelados as dimensões geométricas do reservatório acoplado a barragens e eclusas foi apresentado. Além disso, na análise da interação eclusa-reservatório, um estudo foi feito para investigar as frequências naturais e modos de vibração associados as ondas de superfície livre *sloshing* com aplicação na eclusa de Tucuruí. Por fim, para complementar o

estudo do *sloshing*, o trabalho contempla uma abordagem experimental. Uma mesa vibratória harmônica foi construída e utilizada para estudar os efeitos de superfície livre *sloshing* em reservatório com fronteiras rígidas. Nessa perspectiva, a Técnica de Captura de Movimento por Vídeo (TCMV) foi utilizada para aquisição dos resultados experimentais. Os estudos comparativos nas frequências naturais e pressões convectivas (*sloshing*) obtidas analiticamente, numericamente e experimentalmente apresentaram diferenças percentuais máximas de 7,32%. Portanto, este trabalho contribui em diversos aspectos relacionados à interação fluido-estrutura em barragens e eclusas.

Palavras-chave: *Barragens, Eclusas, Interação Fluido-Estrutura, MEF, Artificio do Campo de Pressão Prescrito, Sloshing.*

ABSTRACT

ANALYTIC-NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC FLUID-STRUCTURE INTERACTION PROBLEMS WITH APPLICATION TO CONCRETE DAMS AND LOCKS

Author: Davidson de Oliveira França Júnior
Advisor: Lineu José Pedroso, Dr. Ing.
Postgraduate Program in Structural Engineering and Construction
Brasília, August 2022

Concrete gravity dams and locks are structures, almost always large in size, which have a wide variety of uses, according to the needs of each region where they are implemented. In the engineering of these structures, it is essential to guarantee minimum safety conditions, once their rupture can generate real catastrophes both economically and socially and environmentally. As a result, this paper addresses an analytical-numerical and experimental study of dynamic fluid-structure interaction problems, with application to concrete gravity dams and locks. At first, a simplified analytical methodology, called the Prescribed Pressure Field Artifice (PPFA), was made to determine the decoupled and fluid-structure coupled natural frequencies associated with the additional mass dominant modes in an incompressible regime. The PPFA covers structures with constant or linearly varying inertia, and makes it possible to obtain the frequencies associated with impulsive hydrodynamic pressures for different vibration modes in a dam-reservoir and lock-reservoir coupled problem. The results obtained by PPAF were compared with the Finite Element Method (FEM), using ANSYS® software, with the Pseudo-dynamic Method, with the Modified Transfer Matrix Method (MTMM) and with literature results. The comparative studies were applied to several dam and lock geometries. The responses were satisfactory and showed percentage differences of less than 5% in the incompressible regime. In the compressible regime the percentage differences were larger (around 10 to 20%). The PPAF was also applied in determining frequencies at Pina Flat Dam, Tsuruda Dam and Koyna Dam. A parametric study evaluating the influence of parameters related to the geometric dimensions of the reservoir coupled with dams and locks was presented. Furthermore, in the analysis of lock-reservoir interaction, a study was done to investigate the natural frequencies and vibration modes associated with free surface sloshing waves with application to Tucuruí lock. Finally, to complement the study of sloshing, the work includes an experimental approach. A harmonic vibrating table was built and used to study the free surface sloshing effects in a reservoir with rigid boundaries. In this perspective, the Motion Capture by Video

Technique (MCVT) was used to acquire the experimental results. The comparative studies on natural frequencies and convective (sloshing) pressures obtained analytically, numerically and experimentally showed maximum percentage differences of 7.32%. Therefore, this work contributes to several aspects related to fluid-structure interaction in dams and locks.

Keywords: *Dams, Locks, Fluid-Structure Interaction, FEM, Prescribed Pressure Field Artifice, Sloshing.*

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE FIGURAS..... | xv |
| LISTA DE TABELAS | xxv |
| LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES | xxvii |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. GENERALIDADES | 1 |
| 1.2. PROBLEMÁTICA GERAL..... | 4 |
| 1.2.1. Problemática Estudada | 5 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 11 |
| 1.3.1. Objetivo Geral | 11 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos | 11 |
| 1.4. METODOLOGIA..... | 12 |
| 1.5. CONTRIBUIÇÕES DA TESE..... | 17 |
| 1.6. MOTIVAÇÃO..... | 19 |
| 1.7. ABRANGÊNCIAS E LIMITAÇÕES | 19 |
| 1.8. DESENVOLVIMENTO DO CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE..... | 20 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 22 |
| 2.1. INTRODUÇÃO..... | 22 |
| 2.2. EPRINCIPAIS PESQUISAS NA ÁREA | 22 |
| 2.2.1. Estudos Analíticos e Numéricos em Barragens e Eclusas de Concreto Gravidade..... | 22 |
| 2.2.2. Estudos Experimentais em Barragens e Eclusas de Concreto Gravidade | 29 |
| 2.2.3. Estudos Experimentais do Efeito de Superfície Livre <i>Sloshing</i> | 41 |
| 2.3. MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO (MÉTODO DE CHOPRA) | 46 |
| 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 48 |
| 3. GENERALIDADES SOBRE BARRAGENS E ECLUSAS | 49 |
| 3.1. INTRODUÇÃO..... | 49 |
| 3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS E ECLUSAS | 49 |
| 3.3. ELEMENTOS CONSTITUINTES DAS BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO..... | 53 |
| 3.4. AÇÕES ATUANTES EM BARRAGENS E ECLUSAS | 55 |
| 3.4.1. Ações Estáticas | 55 |
| 3.5. ESTABILIDADE GLOBAL E VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE BARRAGENS..... | 56 |
| 3.6. BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO NO BRASIL..... | 58 |
| 3.6.1. Barragem e Eclusa de Itaipu | 58 |
| 3.6.2. Barragem e Eclusa de Tucuruí..... | 59 |
| 3.6.3. Eclusa de Sobradinho - BA | 61 |
| 3.6.4. Eclusa de Jupia | 62 |
| 3.6.5. Eclusa de Três Irmãos..... | 62 |
| 3.6.6. Demais Eclusas no Brasil | 63 |
| 3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 63 |
| 4. FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA O DOMÍNIO ESTRUTURAL | 64 |
| 4.1. INTRODUÇÃO..... | 64 |
| 4.2. ESTRUTURA DE BARRAGEM FLEXÍVEL | 64 |
| 4.2.1. Vibrações Flexionais | 65 |
| 4.2.2. Vibrações Cisalhantes..... | 69 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.2.3. | Vibrações Flexionais e Cisalhantes | 70 |
| 4.3. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 72 |
| 5. | FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA DOMÍNIO DO FLUIDO..... | 73 |
| 5.1. | INTRODUÇÃO..... | 73 |
| 5.2. | EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA EM MEIO ACÚSTICO FLUIDO 74 | |
| 5.2.1. | Equação Diferencial da Onda Unidimensional (1D)..... | 74 |
| 5.2.2. | Solução para Cavidade com Condição de Contorno Fechada-Aberta..... | 76 |
| 5.2.3. | Solução para Cavidade com Condição de Contorno Fechada-Fechada | 77 |
| 5.2.4. | Solução para Cavidade com Condição de Contorno Aberta-Aberta | 78 |
| 5.2.5. | Solução para uma cavidade acústica bidimensional (2D) e tridimensional (3D) 78 | |
| 5.3. | FORMULAÇÃO ENERGÉTICA APLICADA EM CAVIDADES ACÚSTICAS RETANGULARES | 79 |
| 5.4. | ONDAS DE SUPERFÍCIE LIVRE (<i>SLOSHING</i>) EM MEIOS ACÚSTICOS... 80 | |
| 5.4.1. | Formulação Básica | 81 |
| 5.5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 88 |
| 6. | FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA 89 | |
| 6.1. | INTRODUÇÃO..... | 89 |
| 6.2. | ESTRUTURA-CAVIDADE ACOPLADOS PELO MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA MODIFICADO (MMTM) | 90 |
| 6.2.1. | Análise dos Parâmetros de Massa (μ), de Rigidez (α) e de Compressibilidade (λ) 92 | |
| 6.3. | ESTRUTURA-CAVIDADE ACOPLADOS PELO ARTIFÍCIO DO CAMPO DE PRESSÃO PRESCRITO (ACPP) | 94 |
| 6.3.1. | Solução Analítica Para IFE De Uma Estrutura Rígido-móvel Acoplada com uma Cavidade de Condição de Contorno IFE-A-F-F..... | 95 |
| 6.3.2. | Solução Analítica para IFE de uma Estrutura Rígida-móvel Acoplada com Cavidade Acústica de Condição de Contorno IFE-A-F-A | 99 |
| 6.3.3. | Solução Analítica para IFE de uma Estrutura Flexível Acoplada com uma Cavidade de Condição de Contorno F-A-F-A..... | 105 |
| 6.3.4. | Aplicação do ACPP para Análise da IFE em Estruturas de Eclusas | 108 |
| 6.4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 109 |
| 7. | FORMULAÇÃO NUMÉRICA E ASPECTOS COMPUTACIONAIS | 111 |
| 7.1. | INTRODUÇÃO..... | 111 |
| 7.2. | FORMULAÇÃO NUMÉRICA PARA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA 111 | |
| 7.2.1. | Montagem das Matrizes Estruturais pelo MEF | 111 |
| 7.2.2. | Equação de Movimento da Estrutura com Pressões do Fluido na Interface Fluido- Estrutura..... | 117 |
| 7.2.3. | Equação da Onda Acústica (Helmholtz) para Meios Fluidos com Deslocamentos da Estrutura na Interface Fluido-Estrutura | 118 |
| 7.2.4. | Montagem do Problema Acoplado Barragem-Reservatório..... | 123 |
| 7.3. | ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO <i>SOFTWARE</i> ANSYS® | 124 |
| 7.3.1. | Breve Descrição do <i>Software</i> ANSYS® | 124 |
| 7.3.2. | Descrição dos Tipos de Elementos Finitos Utilizados no ANSYS® | 124 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 7.3.3. | Tipos de Análise no ANSYS® | 128 |
| 7.4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 129 |
| 8. | ASPECTOS TEÓRICOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL | 130 |
| 8.1. | INTRODUÇÃO..... | 130 |
| 8.2. | IDENTIFICAÇÃO MODAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA | 130 |
| 8.2.1. | Transformada de Fourier..... | 130 |
| 8.2.2. | Método Básico no Domínio da Frequência (BFD – Basic Frequency Domain)..... | 134 |
| 8.2.3. | Identificação das Razões de Amortecimento | 134 |
| 8.3. | SIMULADORES DE VIBRAÇÃO (MESA VIBRATÓRIA) | 136 |
| 8.4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 138 |
| 9. | CONSTRUÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE | |
| | VIBRAÇÕES DINÂMICAS..... | 139 |
| 9.1. | INTRODUÇÃO..... | 139 |
| 9.2. | ESTRUTURA DO SIMULADOR UNIAXIAL PROPOSTO | 139 |
| 9.3. | DISPOSITIVO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS | 142 |
| 9.4. | TESTES INICIAIS NA MESA VIBRATÓRIA COM A TCMV | 144 |
| 9.4.1. | Teste na Mesa Harmônica Vibratória..... | 145 |
| 9.4.2. | Modelo de um Pórtico Plano com Um Pavimento | 149 |
| 9.5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 155 |
| 10. | RESULTADOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS..... | 157 |
| 10.1. | INTRODUÇÃO..... | 157 |
| 10.2. | ESTRUTURAS DESACOPLADAS..... | 157 |
| 10.2.1. | Descrição e Parâmetros dos Modelos..... | 157 |
| 10.2.2. | Frequências Naturais e Deformadas Modais | 158 |
| 10.2.3. | Estudo Paramétrico..... | 160 |
| 10.3. | CAVIDADE ACÚSTICA (FLUIDO DESACOPLADO)..... | 166 |
| 10.3.1. | Descrição e Parâmetros dos Modelos..... | 166 |
| 10.3.2. | Frequências Naturais..... | 167 |
| 10.3.3. | Deformadas Modais de Pressão (Pressão Hidrodinâmica Impulsiva)..... | 168 |
| 10.4. | INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA | 178 |
| 10.4.1. | Comparativo entre MMTM e ACPP para Estrutura Rígida-Móvel Acoplada com uma Caverna F-A-F..... | 178 |
| 10.4.2. | Aplicação do ACPP para Estrutura Flexível e Esbelta (Engastada-Livre) Acoplada com uma Caverna Acústica..... | 181 |
| 10.4.3. | Aplicação do ACPP para Estrutura Flexível e Espessa (Engastada-livre) Acoplada com uma Caverna Acústica (Caso da Barragem) | 189 |
| 10.5. | ESTUDOS DE CASOS EM BARRAGENS REAIS | 196 |
| 10.5.1. | Aplicação do ACPP na Análise da Barragens Reais..... | 196 |
| 10.5.2. | Estudo Paramétrico com Análise da Barragem de Koyna | 205 |
| 10.6. | ESTUDOS DE CASOS EM ECLUSAS | 220 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 10.6.1. | Aplicação do ACPP na Análise de Eclusas Flexíveis, Esbeltas e com Inércia Constante 220 | |
| 10.6.2. | Aplicação do ACPP na Análise de Eclusa Flexível, Espessa e com Inércia Variável (Eclusa de Tucuruí) | 229 |
| 10.7. | CONCLUSÕES | 237 |
| 11. | RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS | 238 |
| 11.1. | INTRODUÇÃO | 238 |
| 11.2. | ESTRUTURA RÍGIDA ACOPLADA COM FLUIDO | 238 |
| 11.2.1. | Descrição e Parâmetros do Modelo | 238 |
| 11.2.2. | Resultados do efeito de superfície livre <i>sloshing</i> (Pressões Convectivas) | 240 |
| 11.3. | CONCLUSÕES | 246 |
| 12. | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS | 247 |
| | REFERÊNCIAS | 250 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Exemplo de estruturas de barragens de concreto: (a) barragem de gravidade e (b) barragem em arco-gravidade (Fonte: FERREIRA, 2019). | 3 |
| Figura 1.2 – Estruturas de Eclusa: (a) Eclusa de Sobradinho e (b) Eclusa de Tucuruí (Fonte: DNIT, 2021)..... | 3 |
| Figura 1.3 – Variáveis que influenciam no comportamento acoplado barragem-reservatório-fundação. | 5 |
| Figura 1.4 – Problemática em estudo das pressões hidrodinâmicas impulsivas em uma barragem. | 7 |
| Figura 1.5 – Ilustração da alteração da problemática de interação barragem-reservatório para interação eclusa-reservatório devido à proximidade das estruturas. | 7 |
| Figura 1.6 – Problemática em estudo: (a) pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas em uma eclusa rígida e (b) pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas em uma eclusa flexível em modo de fase. | 8 |
| Figura 1.7 – Diagramas com a metodologia deste trabalho: (a) Abordagem analítica e numérica e (b) abordagem analítica, numérica e experimental. | 12 |
| Figura 2.1: Arquivo histórico do ISMES de modelos experimentais em barragens apresentados por Chiorino e Neri (2020): (a) modelo da barragem de Beauregard em 1951, (b) modelo da barragem Valle di Lei em 1957, (c) modelo da barragem Pieve di Cadore em 1946 e (d) modelo da barragem de Vajont Dam em 1957..... | 30 |
| Figura 2.2: Abordagem experimental realizada por Niwa e Clough (1980): (a) modelo de barragem em arco e (b) modelo da barragem de Koyna..... | 31 |
| Figura 2.3: Abordagem experimental realizada por Donahey e Hall (1989): (a) seção da eclusa com sensores para captar as pressões do solo e (b) seção da eclusa com <i>strain gages</i> | 31 |
| Figura 2.4: Abordagem experimental realizada por Donlon e Hall (1991): (a) esquema do experimento, (b) dispositivo experimental com barragem e reservatório e (c) protótipo da barragem com fissuras após ensaio. | 32 |
| Figura 2.5: Abordagem experimental realizada por Mir e Taylor (1995): (a) perfil da barragem e configuração experimental e (b) fissura originada na base da barragem..... | 32 |
| Figura 2.6: Abordagem experimental realizada por Proulx e Paultre (1997): (a) barragem do Outardes 3 e (b) motor de massa excêntrica e acelerômetros na crista da barragem. | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.7: Abordagem experimental realizada por Rosca (2008): (a) vista a montante do protótipo da barragem em arco e (b) vista a jusante do protótipo da barragem em arco. ... | 34 |
| Figura 2.8: Abordagem experimental realizada por Saleh e Madabhushi (2010): (a) diagrama do modelo flexível em alumínio e (b) diagrama do modelo rígido em concreto. | 35 |
| Figura 2.9: Abordagem experimental realizada por Mendes (2010)..... | 35 |
| Figura 2.10: Abordagem experimental realizada por Chen et al. (2012): (a) modelo da seção ensaiado e (b) tanque de água com dissipador de energia. | 36 |
| Figura 2.11: Abordagem experimental realizada por Tarinejad et al. (2014): (a) excitação com duplo motor, (b) excitação com simples motor e (c) modelo numérico pelo MEF..... | 37 |
| Figura 2.12: Abordagem experimental realizada por Cheng et al. (2018): (a) montagem do ensaio e (b) acelerômetros instalados. | 37 |
| Figura 2.13: Abordagem experimental realizada por Sevim e Altunisik (2018): (a) barragem com reservatório vazio e parcialmente cheio de água e (b) reservatório totalmente cheio..... | 38 |
| Figura 2.14: Abordagem experimental realizada por Pereira et al. (2019): (a) Acelerômetro uniaxial com cabo e (b) vibrador de massa excêntrico..... | 39 |
| Figura 2.15: Abordagem experimental realizada por Wang et al. (2019): (a) modelo da seção do vertedouro fabricado e (b) visão geral do ensaio do modelo..... | 39 |
| Figura 2.16: Abordagem experimental realizada por Kadhim et al. (2021): (a) modelos de barragem em arco e (b) mesa vibratória para os testes..... | 40 |
| Figura 2.17: Abordagem experimental realizada por Alegre et al. (2021): (a) perfil da barragem do Cabril e acelerômetros instalados e (b) perfil da barragem de Bassa e acelerômetros instalados..... | 41 |
| Figura 2.18: Abordagem experimental realizada por Battaglia et al. (2018). | 42 |
| Figura 2.19: Abordagem experimental realizada por Ning et al. (2019): (a) Aparato experimental, (b) <i>sloshing</i> sem camada de espuma e (c) <i>sloshing</i> com camada de espuma. | 42 |
| Figura 2.20: Aparato experimental para o estudo do <i>sloshing</i> submetido a acelerações verticais (Constantin et al., 2020, adaptado). | 43 |
| Figura 2.21: Aparato experimental utilizado por Kamarroudi et al. (2021)..... | 44 |
| Figura 2.22: Abordagem experimental realizada por Thirunavukkarasu e Rajagopal (2021): (a) vista superior do aparato experimental e (b) vista dos roletes na base. | 44 |
| Figura 2.23: Abordagem experimental realizada por Agresta et al. (2021): (a) taque com fundo plano, (b) tanque de fundo inclinado e (c) tanque com fundo circular. | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.24: Abordagem experimental realizada por Han et al. (2021): (a) configuração experimental para o teste de <i>sloshing</i> e (b) movimento <i>sloshing</i> do fluido. | 46 |
| Figura 2.25 – Gráfico para o cálculo de R_1 (Fonte: USACE, 1995; Ribeiro, 2006). | 47 |
| Figura 3.1 – Tipos de barragem quanto a geometria e tipo de material, (a) Barragem de terra homogênea, (b) Barragem de terra zoneada, (c) barragem de enrocamento com núcleo central e (d) barragem de enrocamento com camada impermeabilizante a jusante (Fonte: Adaptado de COSTA, 2012). | 50 |
| Figura 3.2 – Tipos de barragem quanto a geometria e tipo de material, (a) concreto de gravidade, (b) concreto de gravidade aliviada, (c) concreto arco simples, (d) concreto em contraforte e (e) concreto arco duplo (Fonte: Adaptado de COSTA, 2012). | 51 |
| Figura 3.3 – Estruturas de eclusa de Tucuruí (Fonte: Adaptado de NEVES, 2014). | 52 |
| Figura 3.4 –Seção transversal das estruturas da parede de concreto da eclusa de Tucuruí (a) eclusa à jusante e (b) eclusa à montante (Fonte: LIMA, 2014). | 53 |
| Figura 3.5 – Elementos de uma barragem (Fonte: Adaptado de COUTO, 2019). | 53 |
| Figura 3.6 – Elementos de uma eclusa (Fonte: Adaptado de NEVES, 2014). | 54 |
| Figura 3.7 – Ações estáticas em barragem. | 56 |
| Figura 3.8 – Barragem de Itaipu. (Fonte: ITAIPU, [s.a.]). | 58 |
| Figura 3.9 – Barragem de Itaipu seção transversal da lateral direita, seção em contraforte. (Fonte: ITAIPU, [s.a.]). | 59 |
| Figura 3.10 – Barragem de Tucuruí (Fonte: GAMA et al, 2006). | 60 |
| Figura 3.11 –Seção transversal do bloco BG12 da Barragem de Tucuruí (Fonte: Adaptado de ALVES e SAMPAIO, 2007). | 60 |
| Figura 3.12 – Eclusa de Tucuruí (Fonte: LIMA, 2014). | 61 |
| Figura 3.13 – Eclusa de Sobradinho (Fonte: DNIT, 2021). | 61 |
| Figura 3.14 – Eclusa de Jupia (Fonte: CTG Brasil, 2018). | 62 |
| Figura 3.15 – Eclusa de Três Irmãos (Fonte: Adaptado de DNIT, 2020). | 62 |
| Figura 4.1: Metodologia de cálculo assumida no modelo analítico simplificado. | 64 |
| Figura 4.2: Representação da geometria: (a) barragem com inércia constante da base a crista e (b) barragem com inércia variando linearmente da base a crista. | 67 |
| Figura 4.3: Esquema da deformada modal do 1º modo associada ao flexional e cisalhante em uma barra. | 71 |
| Figura 5.1: Condições de contorno da cavidade acústica desacoplada estudada. | 74 |
| Figura 5.2: Condições de contorno da cavidade acústica com efeito <i>sloshing</i> | 74 |
| Figura 5.3: Cavidade acústica unidimensional (1D) (Adaptada de Pedroso, 2003). | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.4 – Esquemas de uma cavidade retangular com superfície livre (Fonte: Adaptado de PEDROSO, 1995)..... | 81 |
| Figura 6.1: Modelo Analítico Unidimensional (1D) (Adaptada de Pedroso, 2003)..... | 90 |
| Figura 6.2: Análise dos parâmetros da equação transcendental: (a) $0 \leq \lambda \leq 0.1\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (b) $0 \leq \lambda \leq 0.3\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (c) $0 \leq \lambda \leq 0.49\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (d) $0 \leq \lambda \leq 0.5\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (e) $0 \leq \lambda \leq 0.7\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (f) $0 \leq \lambda \leq 2.8\pi$ e $0 \leq \mu \leq 50$; | 92 |
| Figura 6.3: Exemplo de raízes da equação transcendental pelo MMTM: (a) varredura dos parâmetros α , μ e λ e (b) exemplo de obtenção das raízes na equação transcendental. | 93 |
| Figura 6.4: Modelo analítico do ACPP com respectivas condições de contorno..... | 95 |
| Figura 6.5: Campo de pressão idealizado para acoplamento fluido-estrutura unidirecional. | 96 |
| Figura 6.6: Distribuição de pressão hidrodinâmica de uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A. | 100 |
| Figura 6.7: Equivalência entre a massa adicional de Westergaard (1933) para uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPP. | 102 |
| Figura 6.8: Análise da convergência da série para expressão da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974). | 103 |
| Figura 6.9: Equivalência entre a massa adicional de Chakrabarti & Chopra (1974) para uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica F-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPP. | 104 |
| Figura 6.10: Análise da convergência da série para expressão da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974). | 106 |
| Figura 6.11: Equivalência entre a massa adicional de Chakrabarti & Chopra (1974) para uma barragem flexível acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPP. | 107 |
| Figura 6.12: Esquema do ACPP e equivalência entre a massa adicional simplificada para condição de contorno engastada-livre e diferentes modos. | 108 |
| Figura 6.13: Esquema de Eclusa: (a) modo em oposição de fase e (b) modo em fase..... | 109 |
| Figura 6.14 - Esquema com a sequência de cálculo do Método Pseudo-Dinâmico e do Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP)..... | 110 |
| Figura 7.1: Exemplo de sistema de interação barragem-reservatório (PEDROSO, 2003). | 119 |
| Figura 7.2: Elemento finito BEAM189. (Adaptado de Biblioteca do ANSYS®). | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.3: Elemento finito PLANE183. (Adaptado de Biblioteca do ANSYS®). | 126 |
| Figura 7.4: Elemento finito SOLID95. (Biblioteca do ANSYS®). | 126 |
| Figura 7.5: Elemento finito COMBIN14. (Biblioteca do ANSYS®). | 127 |
| Figura 7.6: Elemento finito FLUID29. (Biblioteca do ANSYS®). | 128 |
| Figura 7.7: Elemento finito FLUID30. (Biblioteca do ANSYS®). | 128 |
| Figura 8.1: Decomposição de uma série temporal em ondas sinusoidais. (OLIVEIRA, 2012; MENDES, 2010). | 131 |
| Figura 8.2: Resposta de vibração livre de um sistema subamortecido. (CLOUGH e PENZIEN, 1995). | 135 |
| Figura 8.3: Exemplo de mesas vibratórias. (Adaptado de Huang, 2018). | 137 |
| Figura 9.1: Esquema da mesa vibratória desenvolvida: (a) Vista Frontal e (b) Vista Superior. | 141 |
| Figura 9.2: Esquema da mesa vibratória. | 142 |
| Figura 9.3: Exemplo do procedimento de ensaio utilizando a TCMV. | 143 |
| Figura 9.4: Exemplo de obtenção da resposta dinâmica no <i>software</i> CvMob utilizando a TCMV. | 144 |
| Figura 9.5: Região de leitura na plataforma, indicada no ponto A. | 145 |
| Figura 9.6: Resultados no ponto A para um intervalo de tempo entre 0 e 20 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações. | 146 |
| Figura 9.7: Resultados no ponto A para um intervalo de tempo entre 10 e 15 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações. | 147 |
| Figura 9.8: Espectro de frequência no ponto A para um intervalo de tempo entre 0 e 20s. | 148 |
| Figura 9.9: Análise experimental em um pórtico plano. | 149 |
| Figura 9.10: Análise de Estrutura de Pórtico Plano. | 150 |
| Figura 9.11: Resultados no pórtico para um intervalo de tempo entre 0 e 18 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações. | 152 |
| Figura 9.12: Resultados no pórtico para um intervalo de tempo entre 10 e 15 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações. | 153 |
| Figura 9.13: Espectro de frequência no pórtico para um intervalo de tempo entre 0 e 18s. | 154 |
| Figura 10.1: Modelos desacoplados avaliados. | 158 |
| Figura 10.2: Deformadas modais numéricas das diferentes geometrias de barragens. | 159 |

| | |
|--|-----|
| Figura 10.3: Frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes relações altura <i>vs</i> largura (H/B) da barragem com inércia constante. | 161 |
| Figura 10.4: Deformadas modais analíticas e numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia constante. | 162 |
| Figura 10.5: Deformadas modais numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia constante. | 162 |
| Figura 10.6: Estudo paramétrico das frequências naturais fundamentais <i>versus</i> a relação H/B para estrutura com inércia variável. | 164 |
| Figura 10.7: Deformadas modais analíticas e numéricas para diferentes relações geométricas da barragem com inércia variável. | 165 |
| Figura 10.8: Deformadas modais numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia variável. | 166 |
| Figura 10.9: Ilustração das condições de contorno estudadas e da simbologia das dimensões da cavidade acústica. | 167 |
| Figura 10.10: Modelo numérico da cavidade acústica no plano. | 167 |
| Figura 10.11: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-A-F-F. | 170 |
| Figura 10.12: Posição do corte transversal e longitudinal na cavidade acústica. | 170 |
| Figura 10.13: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas avaliadas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-A-F-F. | 171 |
| Figura 10.14: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas avaliadas no corte longitudinal da base da cavidade acústica F-A-F-F. | 171 |
| Figura 10.15: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-A-F-A. | 172 |
| Figura 10.16: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-A-F-A. | 173 |
| Figura 10.17: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas no corte longitudinal da base da cavidade acústica F-A-F-A. | 174 |
| Figura 10.18: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-F-F-A. | 175 |
| Figura 10.19: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-F-F-A. | 176 |
| Figura 10.20: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas no corte longitudinal na base da cavidade acústica F-F-F-A. | 176 |

| | |
|---|-----|
| Figura 10.21: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica A-A-F-A. | 177 |
| Figura 10.22: Modelo numérico de estrutura rígido-móvel acoplada com a cavidade acústica F-F-F-A..... | 179 |
| Figura 10.23: Comparativo do campo de pressão acoplado no regime incompressível para uma estrutura rígido-móvel acoplada com a cavidade acústica F-F-F-A..... | 181 |
| Figura 10.24: Modelo numérico de estrutura flexível engastada-livre acoplada com a cavidade acústica (IFE-A-F-A). | 182 |
| Figura 10.25: Modo de vibração numérico da estrutura de viga flexível desacoplada para os dez primeiros modos..... | 184 |
| Figura 10.26: Modo de vibração numérico da estrutura de viga flexível desacoplada e acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$). | 185 |
| Figura 10.27: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura flexível acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$). | 186 |
| Figura 10.28: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura de viga flexível acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$)..... | 187 |
| Figura 10.29: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura de viga flexível acoplada com fluido associadas as dez primeiras frequências. | 188 |
| Figura 10.30: Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes espessuras da barragem flexível com inércia constante acoplada com fluido..... | 191 |
| Figura 10.31: Deformadas modais numéricas U_x da estrutura para diferentes relações (H/B) da barragem flexível com inércia constante e acoplada com fluido. | 192 |
| Figura 10.32: Pressões hidrodinâmicas numéricas para diferentes relações (H/B) da barragem flexível com inércia constante acoplada com fluido. | 192 |
| Figura 10.33: Comparativo das frequências naturais fundamentais com diferentes relações H/B para a estrutura com inércia variável e acoplada com fluido. | 194 |
| Figura 10.34: Deformadas modais numéricas U_x da barragem flexível com inércia variável e acoplada com fluido..... | 195 |
| Figura 10.35: Pressões hidrodinâmicas numéricas da barragem flexível com inércia variável e acoplada com fluido..... | 195 |
| Figura 10.36: Barragens reais estudadas e suas respectivas dimensões (Adaptado de Chopra, 2020). | 198 |
| Figura 10.37: Modelos numéricos das barragens reais analisadas neste trabalho..... | 200 |

| | |
|--|-----|
| Figura 10.38: Modos de vibração fundamental (1º modo) obtido nas análises numéricas das barragens reais desacopladas. | 202 |
| Figura 10.39: Quatro primeiros modos de vibração numéricos de pressão hidrodinâmica da cavidade acústica desacoplada de condição de contorno F-A-F-A. | 203 |
| Figura 10.40: Deformada modal da estrutura e das pressões hidrodinâmicas acoplada obtidas da análise numérica das barragens reais. | 205 |
| Figura 10.41: Modelos numéricos da barragem de Koyna para diferentes relações (Lx/Lz). | 206 |
| Figura 10.42: Comparação das deformadas modais numéricos com os modos apresentados por Chopra (2012): (a) primeiro modo, (b) segundo modo, (c) terceiro modo e (d) quarto modo. | 207 |
| Figura 10.43 : Deformadas modais da barragem na sequência dos quatro modos de vibração para barragem desacoplada. | 208 |
| Figura 10.44: Posição do corte transversal e longitudinal na cavidade acústica. | 209 |
| Figura 10.45: Modos de pressão do fluido desacoplado para uma relação Lx/Lz=4,2. | 209 |
| Figura 10.46: Modos de pressão do fluido desacoplado para uma relação Lx/Lz=4,2 e Lx/Lz=7,0. | 210 |
| Figura 10.47: Deformadas modais da estrutura para os quatro primeiros modos de vibração e relações: (a) Lx/Lz=1, (b) Lx/Lz=4,2 e (c) Lx/Lz=7. | 212 |
| Figura 10.48: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação Lx/Lz=1,0. | 213 |
| Figura 10.49: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação Lx/Lz=4,2. | 214 |
| Figura 10.50: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação Lx/Lz=4,2. | 215 |
| Figura 10.51: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para o primeiro modo acoplado e diferentes relações Lx/Lz. | 216 |
| Figura 10.52: Ponto de aplicação da carga harmônica e de obtenção dos resultados no modelo numérico para diferentes relações Lx/Lz. | 217 |
| Figura 10.53: Espectro de frequência com os deslocamentos da estrutura (Ux) obtido na crista da barragem (ponto B). | 218 |
| Figura 10.54: Espectro de frequência com as pressões hidrodinâmicas (P) obtido no fundo do reservatório (ponto C). | 219 |

| | |
|--|-----|
| Figura 10.55: Propagação das pressões hidrodinâmicas no reservatório devido a varredura da frequência de excitação para relação $L_x/L_z=4,2$ | 220 |
| Figura 10.56: Modelos numéricos de estruturas flexíveis engastada-livre (eclusas) acoplada com a cavidade acústica (IFE-IFE-F-A)..... | 221 |
| Figura 10.57: Três primeiros modos de vibração obtidos nas análises numéricas das eclusas desacopladas. | 222 |
| Figura 10.58: Deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas das cavidades acústicas desacopladas de condição de contorno F-F-F-A e com diferentes relações geométricas L_x/L_z | 224 |
| Figura 10.59: Comparativo entre as quatro primeiras frequências naturais analíticas e numéricas das cinco eclusas acopladas com fluido. | 225 |
| Figura 10.60: Deformadas modais estruturais e de pressão hidrodinâmica do primeiro modo acoplado (1º modo em oposição de fase) e diferentes relações geométricas L_x/L_z | 226 |
| Figura 10.61: Deformadas modais estruturais e de pressão hidrodinâmica do segundo modo acoplado (1º modo em fase) e diferentes relações geométricas L_x/L_z | 227 |
| Figura 10.62: Deformadas modais estruturais e pressões hidrodinâmicas do primeiro e segundo modo acoplado para diferentes relações geométricas L_x/L_z | 228 |
| Figura 10.63: Dimensões dos modelos estudados da Eclusa de Tucuruí (jusante). | 230 |
| Figura 10.64: Modelos numéricos discretizados da Eclusa de Tucuruí. | 231 |
| Figura 10.65: Modos de vibração da estrutura e do fluido desacoplado da eclusa de Tucuruí. | 233 |
| Figura 10.66: Modos de vibração da estrutura e de pressão hidrodinâmica do fluido para a eclusa de Tucuruí..... | 234 |
| Figura 10.67: Vista frontal dos modo de vibração antissimétrico e simétrico de <i>sloshing</i> da Eclusa de Tucuruí com seção transversal aproximada e seção transversal real. | 236 |
| Figura 11.1: Abordagem experimental do reservatório..... | 239 |
| Figura 11.2: Construção do modelo experimental do reservatório. | 239 |
| Figura 11.3: Modelo experimental e modelo numérico (vista isométrica)..... | 239 |
| Figura 11.4: Procedimento experimental: (a) Ponto de Análise dos Resultados e (b) Leitura pela TCMV. | 240 |
| Figura 11.5: Resultados experimentais das ondas <i>sloshing</i> para um intervalo de tempo entre 0 e 14 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações..... | 241 |
| Figura 11.6: Espectro de frequência do <i>sloshing</i> para um intervalo de tempo entre 0 e 14s no primeiro modo. | 242 |

| | |
|---|-----|
| Figura 11.7: Modo de vibração antissimétrico do 1º modo de <i>sloshing</i> : (a) análise experimental, (b) modelo numérico 3D e (c) modelo numérico 3D IFE. | 243 |
| Figura 11.8: Modo de vibração antissimétrico do 1º modo de <i>sloshing</i> : (a) análise experimental e (b) Comparativo entre amplitudes numéricas e experimentais..... | 244 |
| Figura 11.9: Segundo e terceiro modo de vibração <i>sloshing</i> na direção longitudinal (Lx). | 246 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1.1 – Casos analisados neste trabalho associados ao problema de IBR. | 14 |
| Tabela 1.2 – Casos analisados neste trabalho associados ao problema de IER..... | 16 |
| Tabela 3.1– Eclusas Brasileiras. | 63 |
| Tabela 5.1 – Resumo das equações de frequências de <i>sloshing</i> (em Rad/s) com base na teoria de ondas de água..... | 88 |
| Tabela 9.1 – Frequências analíticas, numéricas e experimentais do pórtico plano. | 155 |
| Tabela 10.1 – Parâmetros geométricos dos casos A, B e C avaliados. | 158 |
| Tabela 10.2 – Frequências naturais analíticas e numéricas fundamentais (1º modo) dos diferentes casos analisados. | 159 |
| Tabela 10.3– Geometrias, dimensões e parâmetros generalizados referentes ao 1º modo fundamental da estrutura desacoplada com inércia constante. | 160 |
| Tabela 10.4– Frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura desacoplada com inércia constante. | 161 |
| Tabela 10.5– Geometrias, dimensões e parâmetros generalizados referentes ao 1º modo fundamental da estrutura desacoplada com inércia variável. | 163 |
| Tabela 10.6– Frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura desacoplada com inércia variável. | 164 |
| Tabela 10.7– Frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes condições de contorno da cavidade acústica. | 168 |
| Tabela 10.8– Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas para estrutura rígida-móvel acoplada com cavidade F-A-F-F..... | 179 |
| Tabela 10.9– Frequências naturais analíticas e numéricas para estrutura flexível engastada-livre desacoplada e acoplada com cavidade (IFE-A-F-A)..... | 183 |
| Tabela 10.10– Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura com inércia constante acoplada com fluido..... | 190 |
| Tabela 10.11– Comparativo das frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas da estrutura com inércia variável e acoplada com fluido. | 193 |
| Tabela 10.12– Propriedades físicas, mecânicas do sistema barragem-reservatório (CHOPRA, 2020). | 198 |
| Tabela 10.13– Parâmetros geométricos e generalizados obtidos pelo ACPP. | 199 |
| Tabela 10.14– Frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas das barragens desacopladas (vácuo). | 201 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 10.15 - Frequências naturais (F) em Hz da cavidade acústica desacoplada. | 202 |
| Tabela 10.16– Frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas das barragens acopladas com fluido. | 204 |
| Tabela 10.17– Frequências naturais da barragem de Koyna desacoplada (vácuo). | 207 |
| Tabela 10.18– Frequências naturais da cavidade acústica desacoplada para diferentes relações (Lx/Lz)..... | 208 |
| Tabela 10.19 - Frequências naturais (F) acopladas barragem-reservatório (Hz). | 211 |
| Tabela 10.20– Parâmetros generalizados, frequências naturais analíticas e numéricas das estruturas de eclusas desacopladas. | 222 |
| Tabela 10.21– Frequências naturais analíticas e numéricas das cavidades acústicas desacopladas com condição de contorno F-F-F-A. | 223 |
| Tabela 10.22– Frequências naturais analíticas e numéricas da Eclusa de Tucuruí com seção transversal aproximada e seção transversal real. | 232 |
| Tabela 10.23– Frequências naturais analíticas e numéricas (em Hz) das ondas de <i>sloshing</i> da eclusa de Tucuruí..... | 235 |
| Tabela 11.1– Frequências analíticas, numéricas e experimentais do 1º modo de <i>sloshing</i> | 243 |
| Tabela 11.2– Frequências analíticas e numéricas dos três primeiros de <i>sloshing</i> longitudinais (Lx). | 245 |

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

a – Aceleração

A - Analítica

A – Área da seção transversal

A – Coeficiente de amplitude longitudinal

A-A-F-A – Condição de contorno aberta-aberta-fechada-aberta

F-A-F-A – Condição de contorno fechada-aberta-fechada-aberta

F-F-F-A – Condição de contorno fechada-fechada-fechada-aberta

F-F-F-SL – Condição de contorno fechada-fechada-fechada-superfície livre

IFE-A-F-A – Condição de contorno interação fluido-estrutura-aberta-fechada-aberta

B - Coeficiente de amplitude de pressão

c – Velocidade de propagação do som no fluido

C.C – Condição de contorno

CHP – Carga harmônica pontual

DC – Modo dominante cavidade

DE – Modo dominante estrutura

dV – Diferencial de volume infinitesimal

dA – Diferencial de área infinitesimal

e – Base de logaritmo neperiano

E – Módulo de elasticidade do material

F – Frequência natural

H – Altura da estrutura

i – Unidade imaginária

j – Índice modal

K^* – Rigidez generalizada

m^* – Massa generalizada

m – Número de meias-ondas longitudinais

Ma – Massa adicional virtual

MA – Modo de Massa adicional
MEF - Método dos elementos finitos
MM – Modo misto
N – Numérica
N – Ordem da frequência natural
 n – Número de ondas longitudinais
P – Vetor pressão
RA – Modo de rigidez adicional
 t – Tempo
 u – Deslocamento axial
U – Vetor deslocamento
 $U_X ; U_Y ; U_Z$ – Translações
 ν – Coeficiente de Poisson
VF – Vibração forçada
VL – Vibração livre
 V_r – Vetor velocidade do fluido
 w – Deslocamento radial
 x, y e z – Coordenadas do sistema cartesiano
 α_m - Coeficiente da equação transcendental
 β – Módulo adiabático
 Δ – Parâmetro de frequência
 ζ – Taxa de amortecimento
 θ – Ângulo da cavidade acústica
 λ_i – Coeficiente da equação transcendental
 λ – Parâmetro de Compressibilidade do Fluido
 ρ – Massa específica da estrutura
 ρ_f – Massa específica do fluido
 σ_i – Coeficiente da equação da função de deformada modal
 ν – Coeficiente de Poisson do material

ϕ – Ângulo

$\psi(z)$ – Função modal longitudinal

ω – Frequência natural

ω_a – Frequência natural analítica

ω_n – Frequência natural numérica

\bar{i} - Índice modal

\bar{n} - Índice modal

\bar{m} - Índice modal

∇^2 - Operador Laplaciano

[B_u] – Matriz deslocamento-deformação

[C_f] – Matriz de amortecimento do fluido

[C_s] – Matriz de amortecimento da estrutura

[FS] – Matriz de acoplamento fluido-estrutura

[K_f] – Matriz de rigidez do fluido

[K_s] – Matriz de rigidez da estrutura

[M_f] – Matriz de massa do fluido

[M_s] – Matriz de massa da estrutura

[N_p] – Funções de interpolação das pressões

[N_u] – Funções de interpolação dos deslocamentos

{F_e} – Vetor forças genéricas

{F_e} – Vetor forças genéricas

{F_i} – Vetor pressão na interface

{n} – Vetor na direção normal

{P_e} – Vetor pressões nodais

{P_i} – Auto-vetores do fluido

{U_e} – Vetor deslocamentos nodais

{U_i} – Auto-vetores para estrutura

Abreviaturas

| | |
|------------|---|
| ACPP | <i>Artifício do Campo de Pressão Prescrito</i> |
| ISFE | <i>Interação Solo-Fluido-Estrutura</i> |
| IFE | <i>Interação Fluido-Estrutura</i> |
| IBR | <i>Interação Barragem-Reservatório</i> |
| IER | <i>Interação Eclusa-Reservatório</i> |
| MMTM | <i>Método da Matriz de Transferência Modificado</i> |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CIBG/ICOLD | <i>International Commission on Large Dams</i> |
| ANA | <i>Agência Nacional de Águas</i> |
| ANM | <i>Agência Nacional de Mineração</i> |
| CBB | <i>Comitê Brasileiro de Barragens</i> |
| PNSB | <i>Plano Nacional de Segurança em Barragens</i> |

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

As barragens são estruturas, geralmente de grande porte, as quais possuem uma acentuada variedade de usos e finalidades, conforme a necessidade de cada região onde é implantada. Dentre a gama de possibilidades de uma barragem, destacam-se: a geração de energia, a regularização da vazão de um rio, o controle de enchentes e o armazenamento de água, bem como os de rejeitos de mineração. Vale destacar ainda, a importância dos estudos preliminares que antecedem a construção de uma barragem, garantindo o propósito e a eficácia desta. Assim, dada a importância de tais estudos, faz-se necessárias análises prévias, como o levantamento de dados relacionados aos aspectos topográficos, hidrológicos, ambientais, financeiro (recursos disponíveis), geológicos e geotécnicos da região (FONTENELLE et al., 2018).

Na área de engenharia de barragens ainda é imprescindível que sejam garantidas às mínimas condições de segurança, uma vez que o rompimento de tais estruturas pode gerar verdadeiras catástrofes, tanto econômicas quanto sociais. De forma direta, pode ocasionar perdas de vidas humanas, danos materiais na própria barragem e destruição da sua jusante, devido a zonas de inundação, além de incontáveis impactos ambientais. Por outro lado, de forma indireta, o rompimento pode acarretar a contaminação de outros mananciais que abastecem diferentes cidades, bem como impactos na psicultura, na paralização das atividades locais e perda de geração de energia elétrica e dos acessos viários a sua jusante (MENDES, 2018).

No Brasil, na última década, têm sido frequentes as polêmicas em torno dos impactos provocados pelo planejamento, implantação e operação das barragens. As metodologias de projeto e de execução destas estruturas têm sido cada vez mais alvo de críticas, em decorrência de seus impactos socioambientais. Evidência disso são os desmatamentos de florestas, os alagamentos de cidades, além da redução da vazão do rio à jusante devido à, principalmente, rupturas de algumas barragens, que por sua vez, geraram elevados danos ao ecossistema e às infraestruturas pública e privada (MEDEIROS et al, 2021).

Os rompimentos das barragens de rejeitos nas cidades de Mariana e de Brumadinho, no estado de Minas Gerais nos anos de 2015 e de 2019 respectivamente, causaram um dos maiores impactos ambientais, sociais e econômicos já registrados na história da construção

de barragens no Brasil. De acordo com a Agência Nacional de Mineração (AMN), até dezembro de 2021, o País tinha 40 barragens em nível de emergência de situação de ruptura iminente ou em curso. Isso revela a importância dos estudos e análises de tais estruturas no intuito de prevenir eventuais mazelas à sociedade.

Nesse sentido, ao analisar as especificidades estruturais das barragens, Costa (2012) afirma que elas se diferenciam, sobretudo quanto ao tipo de material utilizado na construção. Dessa forma, elas podem ser classificadas em barragens de terra, rejeito, enrocamento, concreto, madeira, alvenaria de pedra e mistas. Cada tipo apresenta suas particularidades estruturais e podem assumir diversas geometrias.

Durante o período da segunda revolução industrial no século XX, acompanhado de um intenso processo de urbanização da época, houve uma crescente demanda de energia no país. Em decorrência disso, também foi exigido uma maior diversificação da malha energética e, conseqüentemente, da necessidade de um maior número de barragens e de melhoras na tecnologia empregada em suas construções, impulsionando a implementação das barragens, sobretudo de concreto, tornando este, agente essencial nesse processo. Portanto, as barragens de concreto foram fundamentais na industrialização do país e, principalmente, na conquista de uma maior diversidade energética, com destaque para as energias ditas renováveis. Acerca dessas barragens, elas podem ser classificadas em alguns tipos como de gravidade, gravidade aliviada, contraforte, arco com simples ou dupla curvatura (SILVEIRA, 2018).

O objeto principal de estudo deste trabalho é a barragem de concreto do tipo gravidade. Ela é caracterizada pela estabilização do elemento pelo seu próprio peso, com a existência de tensões de compressão em todo o seu corpo. Contudo, para economia de material, é possível construí-la com a seção vazada, que por sua vez, caracteriza a barragem de concreto aliviada. A barragem de concreto em contraforte é outra possibilidade de reduzir a seção da estrutura e manter a sua estabilidade por meio da inclusão de contrafortes, onde o seu peso será reduzido e sua rigidez amplificada. Ademais, as barragens de arco beneficiam-se da propriedade do efeito arco de resistir a grandes cargas, transmitindo-as para suas ombreiras (COSTA, 2012).

A Figura 1.1 apresenta dois exemplos de barragens em concreto-gravidade. A imagem (a) apresenta a barragem de gravidade e a imagem (b) apresenta a barragem de arco-gravidade.



(a)

(b)

Figura 1.1 – Exemplo de estruturas de barragens de concreto: (a) barragem de gravidade e (b) barragem em arco-gravidade (Fonte: FERREIRA, 2019).

Normalmente, ao se construir uma barragem, o curso hidráulico perde a capacidade de navegação, pois é criado um obstáculo. Assim, caso exista uma demanda de transporte hidroviário na região de construção da barragem, é necessário o desenvolvimento, juntamente ao projeto, das eclusas de concreto (Figura 1.2). Estas são obras de engenharia hidráulica caracterizadas por duas câmaras de concreto com portões, geralmente de aço, que permitem o transporte de embarcações através dos rios ou mares, mesmo em locais onde existem barreiras. As eclusas atuam como uns verdadeiros elevadores aquáticos, permitindo que embarcações subam e desçam, transpondo rios ou canais. No geral, elas são instaladas em regiões de grandes barragens ou hidrelétricas, uma vez que estas estruturas são dispostas em locais de grande desnível no canal (DNIT, 2021).



(a)

(b)

Figura 1.2 – Estruturas de Eclusa: (a) Eclusa de Sobradinho e (b) Eclusa de Tucuruí (Fonte: DNIT, 2021).

Em virtude da importância das barragens e das eclusas de concreto-gravidade, a estabilidade adequada deve ser um parâmetro para ser analisado com sapiência, desde a fase inicial de construção até o final do período útil destas estruturas, uma vez que é responsável pela segurança do projeto frente às diversas cargas. Assim, para garantir a execução de um projeto

eficaz e seguro tanto de barragens quanto de eclusas, a análise estrutural estática e dinâmica deve ser avaliada de forma mais criteriosa possível, visto que ambas impõem características peculiares na determinação da resposta estrutural (esforços, tensões, deslocamentos, deformações, frequências naturais, modos de vibração) e da estabilidade (flutuação, tombamento, deslizamento, ruptura global etc.).

Dentre essas verificações, a análise dinâmica destaca-se como um indispensável objeto de estudo em várias pesquisas por meio de teorias analíticas, métodos numéricos e estudos experimentais. Apesar disso, sabe-se que ainda há um vasto campo de investigação para o comportamento dinâmico dessas grandes estruturas. Portanto, o estudo desta tese de doutorado está atrelado à análise dinâmica de barragens e eclusas concreto-gravidade, levando em consideração os principais aspectos da interação fluido-estrutura. No próximo tópico será visto a problematização acerca dessa análise dinâmica em barragens e eclusas.

1.2. PROBLEMÁTICA GERAL

A análise estrutural dinâmica em barragens e eclusas é complexa devido a ação concomitante de diversos fatores, influenciando a resposta dinâmica estrutural. Exemplificam alguns destes fatores o tipo e a posição da ação atuante (térmica, sísmica, harmônica, impulsiva etc.), as dimensões e geometria da estrutura, o nível do fluido armazenado, as condições de vinculação nos contornos da estrutura e do reservatório, presença ou não de sobrecargas na crista, o escoamento do fluido no vertedouro quando em operação, flexibilidade da fundação bem como do solo de apoio, a heterogeneidade das camadas de solo e seus efeitos não-lineares (refração e difração de ondas dinâmicas no solo), as condições de fronteira infinita do reservatório (superfícies de truncamento), o efeito da compressibilidade do fluido, a presença de material sólido no interior ou superfície do reservatório (ex. sedimentos ou placas de gelo em regiões frias), ondas de superfície livre (*sloshing*) na superfície do reservatório, entre outras variáveis. A Figura 1.3 apresenta algumas dessas diversas variáveis que estão atreladas às estruturas.

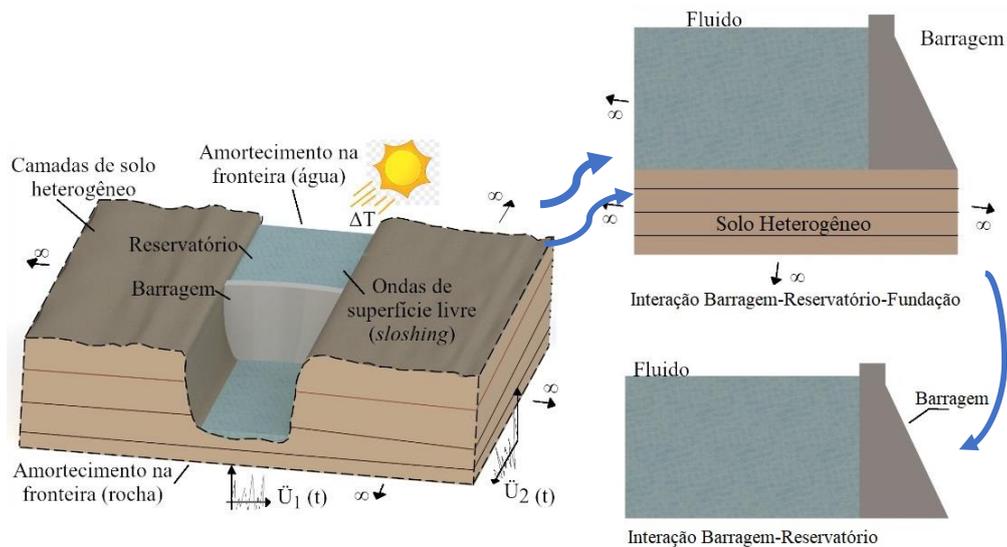


Figura 1.3 – Variáveis que influenciam no comportamento acoplado barragem-reservatório-fundação.

Com base no que foi exposto, verifica-se os três meios mais relevantes nas investigações em dinâmica de barragens e eclusas: a estrutura propriamente dita, o fluido do reservatório, o conjunto da fundação e do solo de apoio da estrutura. Quando analisados conjuntamente, tais meios formam o sistema acoplado de interação solo-fluido-estrutura (ISFE), que se mostra essencial em diversas análises, mas apresentam elevado grau de complexidade e criticidade, impactando diretamente na concepção do projeto.

Em relação aos meios componentes do sistema citado, a interação fluido-estrutura (IFE) é bastante significativa para o desenvolvimento da resposta dinâmica em vibrações livres e forçada, pois durante o fenômeno de vibração acoplada fluido-estrutura tanto os diversos parâmetros da estrutura quanto do fluido influenciam um no outro, produzindo um fenômeno complexo de IFE. Destarte, o estudo da análise acoplada da IFE, objeto de estudo deste trabalho, pode ser visto como um recorte específico da problemática geral.

1.2.1. Problemática Estudada

De uma forma geral, a barragem em situação estática tem os carregamentos atuantes de peso próprio, das pressões hidrostáticas e de subpressões na base (WEI et al, 2020). Por outro lado, durante o movimento de vibração do conjunto fluido-estrutura, tanto a massa da barragem quanto a massa do líquido oscilam em relação à posição de equilíbrio, fazendo com que surjam forças inerciais que maximizam os deslocamentos, esforços e, conseqüentemente, as tensões da estrutura nessas situações (CHOPRA e ASCE, 1968).

Nesse sentido, decorrente de alguma ação dinâmica (harmônica, sísmica, impulsiva etc.), a estrutura inicialmente se desloca fazendo uma pressão no fluido. Por sua vez, o fluido responde com uma pressão nesta interface com a da estrutura. Essa pressão de resposta é denominada de pressão hidrodinâmica ou pressão impulsiva. Então, a pressão hidrodinâmica está relacionada diretamente com as propriedades do fluido e com a magnitude e a forma (deformada modal) com que o fluido é perturbado pela estrutura (PEDROSO, 2003).

Além disso, durante o fenômeno de vibração, os movimentos da estrutura realizam uma perturbação na superfície do líquido, originando ondas de superfície livre. Este efeito é designado de *sloshing*. As ondas de superfície livre em contato com a interface fluido-estrutura fazem uma pressão chamada de pressão convectiva, a qual deve ser adicionada ao sistema. Outrossim, tanto os efeitos de pressões impulsivas quanto os de pressões convectivas são caracterizados por vibrações do fluido em torno do seu ponto de equilíbrio inicial. Dessa forma, ambos os efeitos podem ser analisados como um meio acústico, onde as propagações de ondas dinâmicas ocorrem.

A pressão hidrodinâmica impulsiva corresponde a propagação de onda no meio acústico de alta frequência, enquanto a pressão convectiva (*sloshing*) corresponde a oscilações de baixa frequência. No entanto, existe sempre um acoplamento entre as flutuações da superfície livre (*sloshing*) do líquido e as deformações estruturais (LAKIS e NEAGU, 1997).

Segundo Ozdemir et al. (2017) quando a frequência do movimento é próxima de uma das frequências naturais do líquido *sloshing*, são geradas grandes amplitudes de ondas. Dessa forma, as forças convectivas oriundas das ondas podem afetar a resposta global da estrutura e provocar um fenômeno complexo de interação fluido-estrutura (IFE).

No que concerne às pressões convectivas em barragens, o *sloshing* está relacionado às frequências mais baixas e seus modos podem produzir um efeito irrelevante na estrutura. Isso ocorre porque o reservatório possui grandes dimensões, e o fluido perturbado se desloca no sentido longitudinal do reservatório oposto a interface da barragem. Dessa maneira, as ondas de superfície livre, em tese, se desenvolvem na direção de um meio considerado infinito (CHOPRA, 1967). A Figura 1.4 apresenta a problemática estudada em barragens.

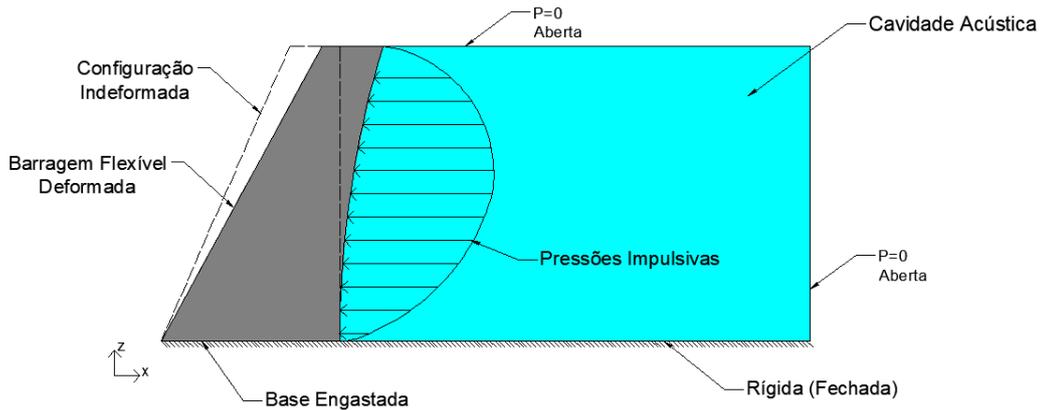


Figura 1.4 – Problemática em estudo das pressões hidrodinâmicas impulsivas em uma barragem.

A partir da Figura 1.4 é possível observar um dos diversos tipos de condições de contorno que podem ser aplicadas em um problema de IBR. As pressões hidrodinâmicas impulsivas ocorrem na interface fluido-estrutura, a fundação da estrutura e do reservatório são assumidos rígidos, na fronteira longínqua e na superfície livre a condição de contorno de pressão nula ($P=0$) reflete, respectivamente, em uma aproximação entre o reservatório assumido infinito e expressa uma irrelevância das pressões convectivas na análise.

Por outro lado, sabe-se que no caso da eclusa, o reservatório é confinado no seu entorno com estruturas relativamente próximas uma da outra. Então, o problema de IBR passa a se tornar um problema de interação eclusa-reservatório (IER), em que a proximidade de outra estrutura na fronteira longínqua altera o comportamento do conjunto acoplado fluido-estrutura. A Figura 1.5 ilustra a alteração da problemática da IBR para a IER com o efeito da proximidade das estruturas.

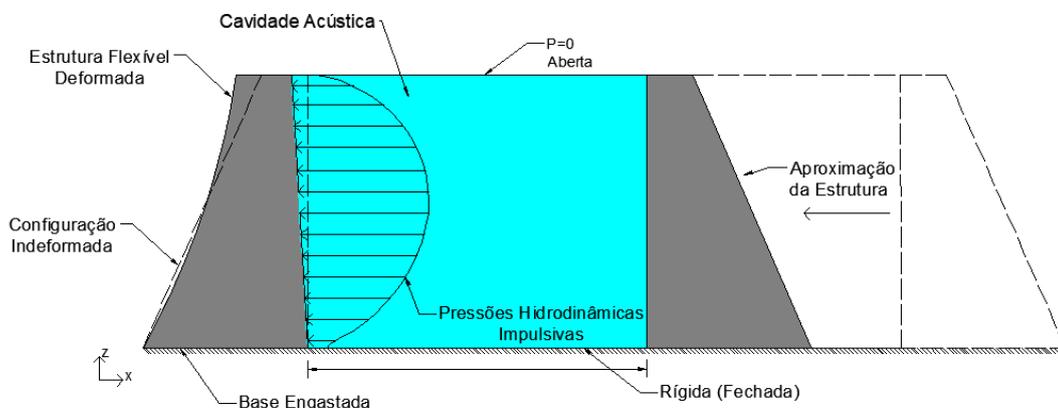


Figura 1.5 – Ilustração da alteração da problemática de interação barragem-reservatório para interação eclusa-reservatório devido à proximidade das estruturas.

Ao analisar a Figura 1.5 é possível notar que no caso das eclusas, as estruturas estão relativamente próximas e confinam o fluido do reservatório. Tal fato provoca uma mudança das condições de contorno do problema de IBR para o problema de IER da seguinte forma: na alteração condição de contorno de pressão nula da fronteira longínqua para condição fluido-estrutura tanto para estrutura rígida ou flexível e na consideração da condição de contorno na superfície livre por pressão nula ($p=0$) ou de ondas superfície livre *sloshing*, isso quando o objetivo da análise for voltada para pressões hidrodinâmicas impulsivas ou para as pressões hidrodinâmicas convectivas, respectivamente.

Assim, no problema IER, as estruturas que confinam o fluido podem ter elevada rigidez ou possuir uma certa flexibilidade, vibrando no mesmo sentido (em fase – F) ou em sentidos opostos (oposição de fase – OF), fazendo com que tanto as pressões hidrodinâmicas impulsivas quanto as pressões hidrodinâmicas convectivas sejam alteradas e dependam, além da proximidade destas estruturas, do efeito da rigidez delas. A Figura 1.6 apresenta a problemática da IER em uma eclusa de concreto-gravidade com a estrutura rígida (Figura 1.6 a) e em estruturas flexíveis (Figura 1.6 b).

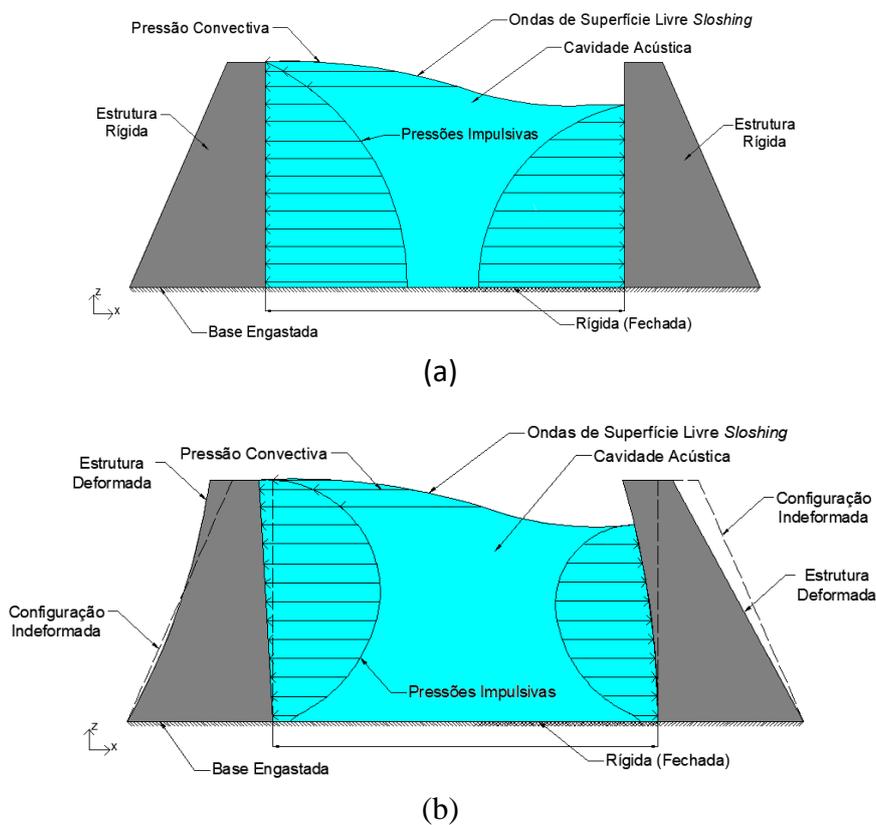


Figura 1.6 – Problemática em estudo: (a) pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas em uma eclusa rígida e (b) pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas em uma eclusa flexível em modo de fase.

A Figura 1.6 apresenta duas entre diversas formas existentes de se estudar problemas de interação dinâmica fluido-estrutura em eclusas. Com isso, avaliar parâmetros relacionados as pressões hidrodinâmicas impulsivas bem como ao efeito *sloshing* para estruturas de eclusas trata-se de uma abordagem pertinente.

Tanto na IER quanto na IBR, ao avaliar somente as pressões hidrodinâmicas impulsivas, ressalta-se que no fenômeno de vibração pode-se obter diferentes modos para o sistema acoplado, sendo eles: modos dominantes da estrutura (DE), modos dominantes da cavidade (DC), modos de onda plana (OP) e modos mistos (MM).

No modo dominante da estrutura (DE), a estrutura predomina e o fluido apenas acompanha as deformadas modais da estrutura da barragem ou eclusa, ou seja, não existe influência significativa das formas modais de pressão do fluido. Assim, este pode ser computado na análise como uma massa adicional na estrutura (MA), reduzindo as frequências naturais acopladas (SOUZA, 2007).

No modo dominante cavidade (DC), as formas modais acopladas reproduzem as formas modais de pressão da cavidade acústica (fluido), que por sua vez, introduz uma rigidez adicional (RA) à estrutura da barragem ou eclusa. Em decorrência disso, há um aumento das frequências naturais acopladas. Ademais, o modo de onda plana (OP) é caracterizado por um forte acoplamento em uma direção do movimento de corpo rígido da estrutura. Por fim, destaca-se o modo misto (MM), no qual os modos apresentam características dominantes da estrutura e do fluido misturadas (SOUZA, 2007).

A interação fluido-estrutura entre estrutura-reservatório é também caracterizada por duas hipóteses: o fluido considerado como incompressível ou compressível. A incompressibilidade do fluido está relacionada à vibração acoplada em uma baixa frequência. Nela, as moléculas do fluido se movimentam praticamente em conjunto, produzindo um efeito de massa adicional aderida na interface com a estrutura. Por outro lado, à medida que as frequências aumentam e se aproximam ainda mais da frequência da cavidade acústica, o efeito da compressibilidade também aumenta e as ondas de pressão acústicas se propagam no domínio do fluido (PEDROSO, 2003).

No que tange o efeito da compressibilidade do fluido, ressalta-se que para uma estrutura flexível, de frequência fundamental no vácuo (desacoplada) menor que a frequência fundamental da cavidade acústica (fluido desacoplado), ela é caracterizada pela primeira

frequência fundamental acoplada (1º modo) ser, maioritariamente, de um modo dominante estrutura de massa adicional (DE/MA) (CHEN ET AL, 2019). Tal afirmação, condiz com a hipótese de incompressibilidade do fluido. Ela ainda é melhor compreendida ao conceber a ideia de que quanto menor é a frequência, menor a rigidez e mais flexível é a estrutura. Então, ao aumentar a rigidez desta estrutura e torná-la muito rígida (indeformável), a frequência fundamental acoplada tende a primeira frequência fundamental da cavidade acústica com a condição de fronteira rígida naquela região.

É pertinente a análise do efeito da interação fluido-estrutura em barragens e eclusas pela massa adicional, uma vez que ela pode impactar diretamente na consideração do projeto dessas estruturas. Nesse sentido, na avaliação do comportamento dinâmico de barragens e eclusas, é necessário o cálculo da sua frequência natural do modo fundamental. Isso porque as frequências mais baixas produzem as maiores amplitudes de deslocamentos em uma análise dinâmica.

Portanto, as perguntas suscitadas neste trabalho em torno da problemática da IFE em barragens e eclusas são as seguintes: como a flexibilidade da estrutura (geometria, inércia, elasticidade etc.) e as condições de contorno da cavidade acústica influenciam nos modos de vibração acoplados impulsivos e convectivos? É possível, através de uma formulação simplificada, determinar as frequências fundamentais desacopladas e acopladas do modo dominante de massa adicional em barragens e eclusas de concreto-gravidade? Como a proximidade das estruturas afetam as pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas de *sloshing*? É possível realizar experimentos de baixo custo que avaliam as ondas de superfície livre *sloshing* do fluido?

Na tentativa de responder todas essas questões, fio condutor deste trabalho, estratégias foram articuladas para tal. Assim, um estudo analítico, numérico e experimental de baixo custo é realizado, através de uma metodologia progressiva de estudos que abordam desde estruturas mais simples (vigas) indo ao encontro com a problemática em diversas barragens e eclusas de concreto.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia analítica simplificada para investigar as frequências naturais desacopladas e acopladas fluido-estrutura em barragens e eclusas de gravidade em concreto, bem como realizar o estudo dos efeitos envolvidos neste tipo de problema através do MEF e de uma abordagem experimental.

1.3.2. Objetivos Específicos

No intuito de alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos são realizados através de uma metodologia evolutiva, sendo ela:

- Realizar o levantamento bibliográfico de estudos relevantes em barragens e eclusas de concreto-gravidade;
- Desenvolver uma metodologia analítica (artifício simplificado) para determinar as frequências, desacoplada e acoplada fluido-estrutura de massa adicional, em barragens e eclusas de concreto-gravidade de forma rápida e prática;
- Realizar um estudo paramétrico através de um comparativo da metodologia simplificada proposta com o método pseudo-dinâmico de Chopra (1978) e o método dos elementos finitos (via *software* ANSYS®);
- Aplicar as formulações analíticas e numéricas na determinação das frequências, desacoplada e acoplada fluido-estrutura, em barragens e eclusas reais;
- Investigar a influência de parâmetros nos problemas de interação eclusa-reservatório, com e sem o efeito de superfície livre *sloshing*.
- Proceder a construção de uma mesa de ensaios dinâmicos, que visa contribuir com a parte experimental do *sloshing*;
- Efetivar um estudo analítico, numérico (via *software* ANSYS®) e experimental, das ondas de superfície livre *sloshing* em uma cavidade acústica com fronteiras rígidas.

1.4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em, inicialmente uma busca por material bibliográfico correlato ao tema em estudo. Nessa perspectiva, buscou-se uma abordagem sobre a análise dinâmica de barragens e eclusas através de técnicas analíticas, numéricas e experimentos.

Para atingir o objetivo proposto, é necessária uma sequência lógica de procedimentos e análises. A proposta do trabalho envolve uma metodologia analítica simplificada, bem como a realização de discretizações numéricas pelo MEF através do *software* ANSYS® e a realização de um experimento. Destarte, a Figura 1.7 apresenta as duas vertentes realizadas neste trabalho, uma para avaliação dos fenômenos relacionados as pressões hidrodinâmicas impulsivas e a outra as pressões convectivas (*sloshing*).

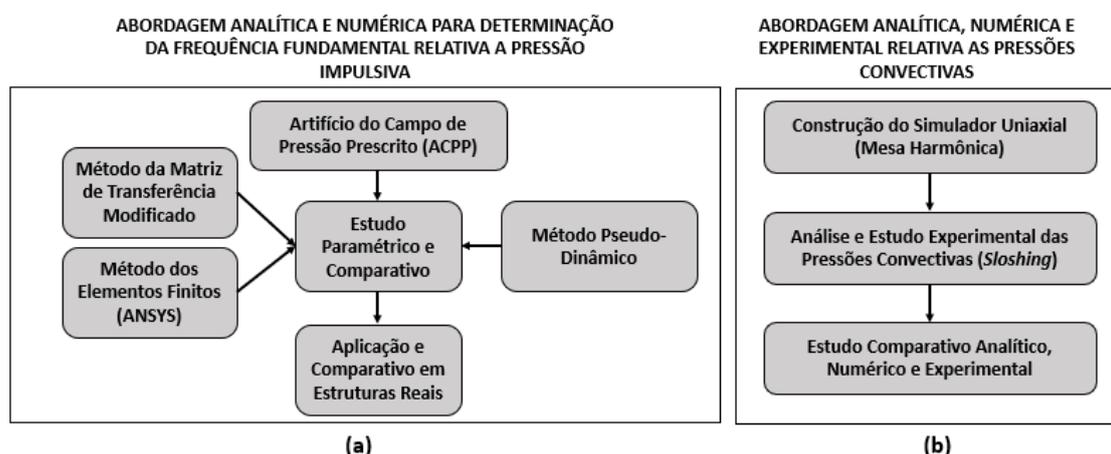


Figura 1.7 – Diagramas com a metodologia deste trabalho: (a) Abordagem analítica e numérica e (b) abordagem analítica, numérica e experimental.

A primeira vertente deste trabalho foi a abordagem analítica e numérica relacionada aos efeitos das pressões hidrodinâmicas impulsivas (Figura 1.7 a). Nesse sentido, foi elaborada e proposta nesta tese uma metodologia de cálculo simplificada, denominada de artifício do campo de pressão prescrito (ACPP). Este foi utilizado para avaliar as frequências naturais de barragens de seção transversal com inércia constante ou linearmente variável, esbelta ou espessa, desacoplada ou acoplada com fluido. A ideia do ACPP é proporcionar a obtenção das frequências naturais de massa adicional de forma mais rápida para qualquer barragem ou elemento de barra que respeite as premissas geométricas citadas.

Em seguida, o ACPP foi validado através de um estudo comparativo em relação ao método dos elementos finitos (via *software* ANSYS®), ao método da matriz de transferência

modificado (MMTM) e ao método pseudo-dinâmico desenvolvido por Chopra (1978). Dessa forma, um estudo paramétrico com diversas barragens de diferentes geometrias foi realizado. Além disso, a metodologia analítica de cálculo foi aplicada para estruturas de barragens reais. Na análise do problema de IER diversos casos de eclusa flexível com inércia constante foram analisados. A influência da relação altura e comprimento do reservatório relacionada aos efeitos das pressões hidrodinâmicas impulsivas foram investigadas. As formulações também foram aplicadas no estudo da eclusa de Tucuruí, onde tanto as pressões hidrodinâmicas impulsivas quanto as convectivas (*sloshing*) foram analisadas.

A segunda vertente deste trabalho está relacionada especificamente ao estudo dos efeitos das ondas de superfície livre (*sloshing*), sendo realizada uma abordagem analítica, numérica e experimental (Figura 1.7 b). Nessa perspectiva, uma mesa vibratória harmônica uniaxial foi construída para a realização de experimento relacionado a IFE. Ademais, por meio do *software* CvMob (desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal da Bahia), a técnica de captura de movimento por vídeo (TCMV) foi empregada para aquisição e leitura dos movimentos dinâmicos.

Posteriormente a construção da mesa vibratória, os parâmetros de deslocamentos, velocidade, acelerações, bem como os espectros de frequência para um experimento em um pórtico puderam fornecer embasamento para a validação da mesa e da TCMV. Por fim, foi realizado um experimento em um reservatório de paredes rígidas para avaliar o efeito *sloshing*. Então, foi possível realizar o estudo analítico, numérico e experimental das ondas de superfície livre *sloshing*.

Vale ressaltar ainda que, em todas as etapas do trabalho, as formulações analíticas foram implementadas no *software* MAPLE® e a abordagem numérica foi feita através do *software* ANSYS®. Além disso, a planilha do Microsoft Excel® possibilitou a análise dos registros e a realização das Transformadas de Fourier dos resultados da análise experimental feita.

De uma forma geral, a metodologia progressiva de casos estudados neste trabalho parte do problema de IBR no estudo de estruturas rígidas e flexíveis, com inércia constante e variável, englobando nas análises as pressões hidrodinâmicas impulsivas, ou seja, desprezando o efeito de ondas de superfície livre *sloshing*. Em seguida, de maneira análoga a IBR, foram estudados os casos relacionados ao problema de IER também contemplando o efeito das pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas (*sloshing*) nas análises. Por fim, o efeito

de superfície livre *sloshing* foi estudado experimentalmente em estrutura de um tanque e confrontado com teorias analíticas e com o MEF. Um resumo da metodologia progressiva dos casos estudados neste trabalho associados a IBR e IER são apresentados nas Tabela 1.1 e Tabela 1.2 , respectivamente.

Tabela 1.1 – Casos analisados neste trabalho associados ao problema de IBR.

| Descrição do Caso Estudado | Esquema do modelo | Abordagem |
|--|-------------------|----------------------|
| Estrutura Rígida-Móvel | | Analítica e Numérica |
| Barragem Esbelta, Flexível e de Inércia Constante | | Analítica e Numérica |
| Barragem Espessa, Flexível e de Inércia Constante | | Analítica e Numérica |
| Barragem Esbelta e Espessa, Flexível e de Inércia Variável | | Analítica e Numérica |
| Barragens Reais | | Analítica e Numérica |

Na Tabela 1.1 foram apresentados a metodologia progressiva dos casos analisados neste trabalho para o problema de IBR. Inicialmente, na análise em vibrações livres, o ACPD desenvolvido foi confrontado com o MEF e com o método da matriz de transferência modificado (MMTM) em um problema de uma estrutura rígido-móvel acoplada com um reservatório de parede rígida (todo fechado) na transversal e com a fronteira longínqua aberta na longitudinal.

Posteriormente, com o reservatório mantido com as mesmas condições de contorno de pressão nula na superfície livre e na fronteira longínqua, foram realizados progressivamente estudos paramétricos em mais quatro casos, sendo: análise da IBR contemplando a flexibilidade de uma estrutura esbelta com inércia constante; de uma estrutura espessa com inércia constante, de uma estrutura esbelta e espessa com inércia variável e, por fim, o estudo de caso em três barragens reais (Barragem de Pina Flat, Barragem de Tsuruda e Barragem de Koyna).

Na análise da barragem de Koyna, um estudo paramétrico de diferentes comprimentos de reservatórios acoplados a barragem submetida a carga harmônica foi realizado. O efeito da compressibilidade do fluido na IBR foi discutido.

Vale ressaltar que, em cada análise acoplada fluido-estrutura, em todos os casos mostrados foram realizados os estudos dos dois meios desacoplados, ou seja, análise da estrutura e da cavidade acústica isoladamente. Por fim, uma vez estudada o problema de IBR, o estudo foi estendido a problemática da IER. A Tabela 1.2 apresenta os casos analisados ao problema de IER.

Tabela 1.2 – Casos analisados neste trabalho associados ao problema de IER.

| Descrição do Caso Estudado | Esquema do modelo | Abordagem |
|---|-------------------|------------------------------------|
| Eclusa Esbelta, Flexível e de Inércia Constante (Sem <i>Sloshing</i>) | | Analítica e Numérica |
| Eclusa Espessa, Flexível e de Inércia Variável (Eclusa de Tucuruí / Sem <i>Sloshing</i>) | | Analítica e Numérica |
| Eclusa Espessa, Flexível e de Inércia Variável – Eclusa de Tucuruí (Com <i>Sloshing</i>) | | Analítica e Numérica |
| Tanque de Paredes Rígidas (Com <i>Sloshing</i>) | | Analítica, Numérica e Experimental |

A partir da Tabela 1.2 é possível observar que a metodologia progressiva é realizada no estudo da IER. Inicialmente, as ondas de superfície livre não são contempladas na análise, uma vez que o intuito foi de avaliar as pressões hidrodinâmicas impulsivas para estrutura de eclusa com inércia constante e variável. No estudo da estrutura com inércia variável a eclusa de Tucuruí foi escolhida para o estudo. Assim, na análise da IER a influência da proximidade das estruturas foi investigada, através da obtenção dos modos em fase (F) e em oposição de fase (OF). Por fim, para complementar o estudo da condição de superfície livre *sloshing*, uma mesa vibratória harmônica uniaxial foi construída. Nela foram realizadas análises

experimentais das vibrações em um modelo de pórtico plano (teste inicial) e das ondas de superfície livre *sloshing* em um tanque de paredes rígidas.

1.5. CONTRIBUIÇÕES DA TESE

De maneira análoga à metodologia apresentada, as contribuições desta tese são também entendidas em duas vertentes: uma analítica e outra experimental. Em relação a vertente analítica, ressalta-se que nas pesquisas bibliográficas foi observado a realização, bem como a resolução de diversos estudos sobre o comportamento dinâmico em barragens de concreto gravidade. Entretanto, na maioria destes estudos, as operações matemáticas envolveram um elevado grau de complexidade, implicando no uso de computadores para soluções envolvidas.

A proposta deste trabalho é uma metodologia analítica simplificada, denominada de Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP). Ela pode ser utilizada para determinar as frequências de uma estrutura rígida-móvel ou de uma estrutura flexível (estrutura de barragens ou eclusas), desacoplada ou acoplada com fluido (para modos de massa adicional), resolvendo apenas um sistema equivalente de um grau de liberdade.

Uma vez que se sabe que o estudo em vibrações livres é a primeira etapa de análise em um problema dinâmico, o ACPP poderá ser amplamente utilizado como uma metodologia simplificada e rápida para obtenção das frequências naturais desacopladas e acopladas fluido-estrutura em problemas de interação dinâmica barragem-reservatório e eclusa-reservatório, caracterizando-a como uma formulação para uso prático nessa área da engenharia.

O Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP) desenvolvido permite determinar as frequências naturais em estruturas esbeltas ou espessas, com inércia constante ou linearmente variável, desacopladas ou acopladas com fluido no regime incompressível.

Nesse sentido, para demonstrar e reforçar a contribuição do ACPP, logo abaixo são descritas algumas vantagens do método ACPP sobre outros métodos que foram utilizados nos estudos comparativos neste trabalho. Assim, quando o ACPP é comparado ao método clássico pseudo-dinâmico de Chopra (1978) e ao método da matriz de transferência modificado (MMTM), verifica-se que:

- No ACPP a estrutura pode ser rígida-móvel ou flexível. Se flexível, além do efeito da deformada modal; que por sua vez é assumido semelhante a uma viga engastada-livre, também é contemplado o efeito da variação de inércia na análise por funções lineares. Isso é uma vantagem em relação ao método pseudo-dinâmico de Chopra (1978), já que este não considera o efeito da variação inercial da estrutura;
- Nas estruturas esbeltas ou espessas, desacopladas ou acopladas com um fluido, as frequências podem ser obtidas pelo ACPP. Por outro lado, no método pseudo-dinâmico, apenas as estruturas espessas podem ter as frequências fundamentais obtidas;
- Na resolução das equações pelo ACPP, o sistema não recai em uma equação transcendental, demonstrando; embora pequena, uma vantagem sobre o método da matriz de transferência modificado;
- As frequências naturais, desacopladas ou acopladas com um fluido, associadas a diferentes modos de vibração podem ser obtidas pelo ACPP.

Acerca da vertente experimental, ressalta-se que a proposta deste trabalho é estudar, experimentalmente, alguns dos fenômenos complexos de interação fluido-estrutura que é o *sloshing*. Para isso, foi construída uma mesa de vibração harmônica, adquirindo seus dados por meio da técnica de captura de movimento por vídeo (TCMV).

Dessa forma, as seguintes contribuições são elencadas a respeito da abordagem experimental.

- A utilização do uso da técnica de captura de movimento por vídeo (TCMV), além de ser uma forma relativamente atual de se obter a resposta dinâmica em estruturas e fluidos, ela ainda é pouco utilizada no Brasil;
- O uso da TCMV possibilita o estudo em diversas análises experimentais em estruturas e fluidos, uma vez que é um sistema de baixo custo. Além disso, outro aspecto benéfico é a sua simplicidade de operação quando comparado com sistemas de acelerômetros, captadores de pressão piezoelétricos e componentes de aquisição de dados mais complexos, que por sua vez, possuem relativo alto custo e maior nível de complexidade;
- Os efeitos dos fenômenos de interação fluido-estrutura, sobretudo o *sloshing*, é didaticamente e fisicamente mais bem compreendido;

- Os aspectos relacionados a construção da mesa vibratória harmônica permitem que outros estudos já tenham conhecimento de algumas particularidades e dificuldades encontradas na área experimental do presente estudo.

1.6. MOTIVAÇÃO

Em nossas pesquisas bibliográficas, notamos que o Brasil possui, em geral, um reduzido número de investigações sobre barragens e eclusas, além de que dessas, a maioria são voltadas para a parte estática. Em consequência disso, dificilmente, são encontrados estudos com enfoque sobre a dinâmica dessas estruturas, considerando à interação fluido-estrutura. Portanto, compreender de forma adequada os efeitos desacoplados e acoplados fluido-estrutura, torna-se uma tarefa desafiadora e poderá contribuir na construção do conhecimento em questão.

Outro fator preponderante é a continuação do trabalho de mestrado, o qual foi desenvolvido seguindo a mesma linha de pesquisa. Na época, avaliou-se, através de métodos analíticos e numéricos, a influência das condições de contorno da casca cilíndrica nas vibrações livres desacopladas e acopladas com fluido. Já o presente estudo de doutorado, embora também se disponha dos métodos analíticos e numéricos, toma uma abordagem voltada para parte de barragens e eclusas, de forma a entender os efeitos da IFE nessas estruturas.

Por conseguinte, entre outros aspectos motivadores para a realização dessa pesquisa, ressalta-se o experimental. Isso porque os efeitos e fenômenos relacionados a interação fluido-estrutura são complexos. Então, a possibilidade de visualização de alguns desses efeitos de forma física, bem como sua melhor compreensão foi ponto chave para este estudo.

1.7. ABRANGÊNCIAS E LIMITAÇÕES

O presente trabalho envolve as seguintes abrangências e limitações:

- A estrutura da barragem e da eclusa é vertical e constituída de material linear, elástico, homogêneo e isotrópico;
- São assumidos regimes de pequenos deslocamentos e desprezados os efeitos inerciais de rotação;

- Tanto a fundação das estruturas quanto do reservatório é assumida rígida. Efeitos de flexibilização do solo não são contemplados;
- O fluido é considerado quiescente (estagnado) e invíscido (não-viscoso). Além disso, foi tratado como incompressível e compressível, dependendo da formulação utilizada;
- Não há escoamento do fluido, existindo somente vibração em torno de um ponto de equilíbrio (fluido acústico);
- A formulação numérica para o problema acoplado fluido-estrutura é baseada no deslocamento para a estrutura e pressão para o fluido (U-P);
- O simulador de vibrações desenvolvido para a abordagem experimental contempla movimentos harmônicos unidirecionais;
- A abordagem experimental não envolve o efeito escala entre estrutura real e o protótipo.

1.8. DESENVOLVIMENTO DO CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DA TESE

O trabalho foi organizado em 12 capítulos, incluindo este da introdução.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre a temática, englobando os principais estudos analíticos e numéricos sobre barragens e eclusas, bem como os trabalhos experimentais da área de barragens e do efeito de superfície *sloshing* em meios acústicos. Além disso, nele é apresentado o método pseudo-dinâmico desenvolvido por Chopra (1978), que por sua vez ainda é utilizado em comparação ao ACPP.

No terceiro capítulo são apresentadas as generalidades sobre barragens e eclusas em concreto gravidade. Nele, discorre-se sobre as principais classificações de barragens e eclusas, os elementos constituintes, as ações atuantes, comentários gerais acerca da estabilidade global e verificação da integridade. Além disso, ainda são apresentados alguns dos eminentes sistemas de barragens e de eclusas do Brasil.

No quarto capítulo, a formulação analítica simplificada para o domínio estrutural desacoplado é apresentada. Logo após, no quinto capítulo, a formulação analítica para o domínio da cavidade acústica (fluido desacoplado) também é exposta. Soma-se ainda nessa exposição a equação da onda unidimensional, a composição no espaço de frequência para obtenção das frequências acústicas em cavidades bidimensionais ou tridimensionais. Além

disso, a formulação variacional por métodos de energia aplicada em meios acústicos, bem como as equações das frequências naturais das ondas de superfície livre foram apresentadas.

No sexto capítulo é exibida a formulação analítica para interação fluido-estrutura, tal como o método da matriz de transferência modificado (MMTM). São demonstrados ainda o artifício do campo de pressão prescrito (ACPP) e as suas respectivas equivalências, com diferentes condições de contorno do meio acústico. Enfim, também são realizadas considerações da aplicação desta metodologia de cálculo em eclusas.

No sétimo capítulo é demonstrada a formulação numérica U-P (deslocamento da estrutura e pressão para fluido) utilizada pelo *software* ANSYS®. São denotados também os aspectos computacionais do ANSYS® e os tipos de elementos finitos utilizados.

No oitavo capítulo são apresentados os aspectos teóricos relacionados a análise experimental, assim como a Transformada de Fourier e o método de identificação modal. Vale destacar ainda que nesse tópico são retratados alguns tipos de simuladores de vibração.

No capítulo nove são indicados os aspectos práticos relacionados a construção da mesa vibratória que contribuíram para o estudo experimental. Inicialmente, é caracterizada a estrutura da mesa vibratória, em seguida os aspectos relacionados a forma de aquisição de dados. Em suma são discutidos os resultados dos testes iniciais da mesa, bem como de um modelo de pórtico plano, também utilizado para validação da TCMV.

No décimo capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos do estudo analítico e numérico. À primeira vista são mostrados os resultados referentes a formulação proposta na análise de estruturas desacopladas. Em seguida, denota-se os resultados da cavidade acústica desacoplada (domínio do fluido). Em síntese, são expostos os resultados das análises acopladas fluido-estrutura pelo método da matriz de transferência modificado (MMTM), do artifício do campo de pressão prescrito (ACPP) e do método pseudo-dinâmico.

No décimo primeiro capítulo são retratados e discutidos os resultados do estudo analítico, numérico e experimental. Ainda são denotados os resultados das pressões e das ondas de superfície livre.

Finalmente, no décimo segundo capítulo, são expostas as conclusões e perspectivas futuras acerca do trabalho realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

A interação dinâmica de barragens com fluido pertence a um campo de estudo interdisciplinar, que consiste na integração entre a dinâmica estrutural, hidrodinâmica, mecânica computacional e outras subáreas técnicas. A fim de obter uma visão sobre a natureza dos fenômenos associados a este assunto, foi conveniente dividir a revisão da literatura em três partes: principais pesquisas na área, generalidades em barragens e eclusas de gravidade em concreto e o método pseudo-dinâmico.

2.2. PRINCIPAIS PESQUISAS NA ÁREA

2.2.1. Estudos Analíticos e Numéricos em Barragens e Eclusas de Concreto Gravidade

Um dos primeiros estudos na análise dinâmica de problemas em interação barragem-reservatório foi realizado por Westergaard (1933), na qual considerou na análise dinâmica os aspectos de acoplamento inercial do líquido, ou seja, o fluido é representado por uma massa adicional virtual que é incorporada à massa da barragem, em que as pressões impulsivas são levadas em consideração. A solução sob a forma de coeficientes de massa adicional é obtida da solução da equação de Laplace, considerando de fluido incompressível a partir da equação de Helmholtz (Equação da onda), ambas descrevendo o problema de forma bidimensional (domínio 2D). A formulação desenvolvida por Westergaard (1933) serviu de base para vários projetos de barragens e é amplamente difundida até os dias atuais.

Chopra (1967) em seus estudos sobre interação dinâmica barragem-reservatório propôs uma formulação para o cálculo da pressão hidrodinâmica levando em consideração o efeito da compressibilidade do fluido. A barragem acoplada com fluido é assumida flexível com deformada fundamental assumida semelhante à primeira forma modal da estrutura no vácuo. De tal modo, no trabalho ficou evidenciado que o efeito da compressibilidade do fluido traz um maior campo de pressão hidrodinâmico na interface barragem-reservatório, ou seja, a compressibilidade do fluido produz efeitos mais desfavoráveis para o projeto de barragens.

A barragem de Koyna, localizada na Índia, tornou-se um instrumento de análise clássica no que diz respeito à análise sísmica de barragens a nível internacional, em função de tremores ocorridos inicialmente em 1962, que levaram à colocação de sismógrafos no local e, posteriormente, de um grande terremoto que atingiu a região em 1967, causando danos severos significativos à sua estrutura. Este acontecimento motivou estudos mais detalhados da interação dinâmica barragem-reservatório (CHOPRA e CHAKRABARTI, 1971).

Kishi et al. (1973) criaram ábacos para cálculo das frequências fundamentais de barragens. Os autores avaliaram barragens em geometria de cunha e contabilizaram o efeito da flexão e do cisalhamento na seção da barragem. O estudo mostrou que as pressões hidrodinâmicas são mais significativas quando o paramento de montante da barragem é vertical.

Chakrabarti e Chopra (1974) investigaram analiticamente a resposta estrutural dinâmica de barragens de gravidade de concreto acoplada com fluido. Uma análise no domínio da frequência e do tempo (devido à componente horizontal e vertical sísmica no solo) foram realizadas. As magnitudes de pressão hidrodinâmica e da aceleração da crista da barragem foram avaliadas levando em consideração o primeiro modo fundamental de vibração da estrutura, com o efeito da compressibilidade do fluido e da influência da deformabilidade da fundação. Na análise no domínio da frequência foi evidenciado que as frequências fundamentais acopladas fluido-estrutura dependem fortemente do módulo de elasticidade da estrutura (rigidez) e são menores que a frequência fundamental desacoplada do reservatório. As contribuições da componente horizontal e vertical do movimento do solo são de especial importância na resposta de barragens de gravidade de concreto para terremotos.

Chwang (1978) desenvolveu uma solução analítica exata para determinar as pressões hidrodinâmicas do reservatório acopladas com uma barragem de paramento à montante inclinado. O fluido no reservatório foi considerado incompressível e invíscido, enquanto a barragem é considerada rígida-móvel. Em seguida, Chwang & Housner (1978) avaliaram o efeito de massa adicional no paramento inclinado à montante da barragem. Em ambas as pesquisas citadas foi observado que a magnitude da pressão aumenta à medida que a face a montante da barragem se aproxima da vertical da superfície do reservatório.

Chopra (1978) desenvolveu um procedimento analítico simplificado para o cálculo manual da frequência fundamental desacoplada e acoplada fluido-estrutura em barragens. O procedimento é denominado de método pseudo-dinâmico e serviu de base para diversos

estudos em barragens de concreto-gravidade. O método engloba ainda a possibilidade de uma análise simplificada do espectro de resposta, que determina a resposta da estrutura no modo fundamental de vibração para um movimento horizontal do terreno.

Chopra e Chakrabarti (1981) desenvolveram um procedimento para a análise de resposta dinâmica de barragens gravidade de concreto a partir da equação de onda. Assim, o efeito da compressibilidade do fluido e da flexibilidade da fundação foram incluídos na análise, sendo que ambos os efeitos foram avaliados para as componentes horizontais e verticais do movimento sísmico do solo (terremotos). Neste estudo, uma discretização dos meios (estrutura, fluido e fundação) utilizando o método dos elementos finitos fornece a resolução do problema dinâmico.

Hall e Chopra (1982) criaram um procedimento de análise para determinar a resposta dinâmica em barragens de gravidade em concreto submetidas a movimentação sísmica em duas direções. A barragem, fluido e solo de apoio são modelados pelo método dos elementos finitos. Foram incorporados na discretização do reservatório os efeitos hidrodinâmicos em geometria irregular de canal, a compressibilidade do fluido e a fronteira infinita afastada à montante da barragem. A interação fluido-fundação é implementada na análise através de uma condição de limite de amortecimento aplicada ao longo do fundo do reservatório. Assim, os autores observaram que quando o limite da fronteira do fluido afastado da barragem é assumido infinita e com a base do reservatório rígido e horizontal, a ressonância na primeira frequência possui uma maior aproximação independente dos níveis de refinamento da malha empregados.

Fenves e Chopra (1984) propuseram uma solução analítica para determinar a resposta estrutural dinâmica em barragens de gravidade de concreto, desacopladas e acopladas com fluido e solo de apoio, frente a ações de terremotos. A influência da absorção de ondas no fundo do reservatório foi incorporada na formulação. A interação entre o fluido e os materiais do fundo do reservatório é modelada aproximadamente por uma condição de contorno que permite a absorção parcial das ondas de pressão hidrodinâmica no fundo do reservatório. Esta absorção parcial das ondas de pressão hidrodinâmica suaviza as frequências de resposta das pressões hidrodinâmicas que rebatem na fronteira do modelo de análise.

Hall (1986) obteve a resposta dinâmica de barragens em concreto acoplada com fluido e solo de apoio, sendo submetidas a um conjunto de registros de ações sísmicas. A presença do fluido e de sua compressibilidade, bem como a componente vertical do movimento do solo foram variáveis de estudo. A presença de água aumentou significativamente as respostas sísmicas das barragens.

Liu (1986) estendeu o trabalho de Chwang (1978) para obter uma solução analítica fechada para uma barragem rígida-móvel de face a montante inclinada acoplada a um reservatório de geometria triangular. Os resultados obtidos demonstraram um grande potencial da formulação proposta por Liu.

Gazetas e Dakoulas (1992) aplicou o método de viga de cisalhamento para apresentar uma equação para calcular o período fundamental de uma barragem. A variação inercial na geometria da estrutura e efeitos de flexibilidade da fundação não foram contemplados na equação.

Tsai (1992) desenvolveu uma solução analítica para distribuição de pressão hidrodinâmica em barragens com face a montante inclinada. O efeito da compressibilidade foi incluso na formulação. As pressões foram determinadas com base em um somatório de funções com coeficientes de amplitudes determinados usando o método de Galerkin na equação da onda. Os valores obtidos pela formulação foram comparados com soluções exatas disponíveis na literatura.

Bouaanani et al. (2002) estudaram a influência de uma cobertura de gelo no comportamento dinâmico de uma barragem. As formulações analíticas apresentadas foram comparadas com resultados experimentais. Os autores verificaram que a cobertura de gelo afeta as pressões hidrodinâmicas no reservatório e as respostas de aceleração e frequência.

Trentine et al (2003) estudaram através do método dos elementos finitos o comportamento estrutural do sistema de transposição de desníveis de Tucuruí, que é a cabeceira a jusante da eclusa 1. A modelagem foi realizada por meio do *software* ANSYS®.

Ftima e Léger (2006) desenvolveram uma análise no comportamento dinâmico da estrutura decorrentes de movimentos do solo, ampliando o estudo no que se diz respeito ao esforço de cisalhamento proveniente de grandes amplitudes de fissuração.

Silva (2007) utilizou a técnica de separação de variáveis e desenvolveu soluções analíticas para o campo de pressões hidrodinâmicas para a IFE em barragem rígida-móvel e flexível, em um regime incompressível e compressível. Além disso, uma proposta de amortecedor para a superfície de truncamento em reservatórios com domínio infinito foi realizada. O comparativo com condições de contorno utilizadas por Sommerfeld (1947), Zienkiewicz & Newton (1969), Sharan (1985) e Küçükarslan (2003) foram realizadas.

Ribeiro (2010) desenvolveu dois procedimentos analíticos para a solução das frequências e modos do sistema acoplado barragem-reservatório. A primeira consiste em um procedimento simplificado denominado de Método Pseudo-Acoplado, que depende da imposição de uma determinada deformada modal para construção da equação de frequências do modo associado. O segundo foi com a solução da equação diferencial envolvida (equação da viga), resultando em frequências e modos acoplados.

Bouaanani e Perrault (2010) criaram um procedimento analítico simplificado para determinar as frequências naturais e modos de vibração de pressão hidrodinâmica da interação barragem-reservatório. O efeito da flexibilidade da estrutura é incorporado por deformadas representadas por funções aproximadas (quadráticas, cúbicas etc.). A compressibilidade do líquido e absorção de ondas de fundo do reservatório foram incorporados na análise. Uma expressão simplificada foi proposta para análise simplificada do modo fundamental de barragens de gravidade submetida a ações sísmicas.

Papazafeiropoulos et al. (2011) desenvolveram as soluções analíticas para o cálculo de tensões em barragens. O método dos elementos finitos foi utilizado na análise de geometrias mais complexas do sistema estrutura-reservatório-fundação. As análises comparativas foram realizadas em termos da inclinação da face de montante e jusante da barragem, bem como dos sedimentos.

Mendes (2013) desenvolveu um estudo com foco nos aspectos relativos à interação fluido-estrutura, em que são estabelecidos comparativos analíticos-numéricos da resposta dinâmica de barragem em arco com simples e dupla curvatura submetida às componentes de um movimento do solo. Uma metodologia progressiva entre soluções analíticas de estruturas de casca cilíndrica e painel cilíndrico foram confrontadas com o MEF e aplicadas as estruturas da barragem de *Morrow Point*. A resposta dinâmica foi avaliada no domínio da frequência

(frequências e deformadas modais) e no domínio do tempo com obtenção dos deslocamentos, pressões hidrodinâmicas, esforços e envelopes de tensões.

Bouaanani e Miquel (2014) desenvolveram um método analítico simplificado para determinar a resposta dinâmica modal (frequências naturais) de vigas flexíveis acopladas com fluido. As soluções analíticas criadas abrangem a determinação das frequências naturais acopladas fluido-estrutura em vigas esbeltas com várias condições de contorno da estrutura. Para validar a metodologia, diversas modelagens numéricas foram realizadas. O procedimento simplificado criado pelos autores apresenta excelentes resultados quando comparado as soluções numéricas independentemente do número de modos incluídos.

Løkke e Chopra (2017) empregaram o método dos elementos finitos na análise da interação barragem-reservatório-fundação com amortecedores viscosos nos limites da discretização do solo para sistemas 3D. São apresentados procedimentos para aplicar as ações do terremoto nos limites da rocha de fundação e domínios fluidos. Vários exemplos foram realizados para validar a precisão do método de análise aplicado a problemas tridimensionais.

Mendes (2018) estudou a propagação de ondas e aplicação de sismo na análise dinâmica do sistema acoplado barragem em arco-reservatório-fundação. As análises foram baseadas pelo MEF com a modelagem do sistema por meio do *software* ANSYS®. Foram investigados os resultados dos deslocamentos e tensões de uma barragem em arco com dupla curvatura e submetida a um movimento do solo, correspondente ao terremoto de Taft Lincoln School Tunnel.

Silveira (2018) avalia a resposta dinâmica em termos das análises em vibração livre e sob carregamento harmônico e sísmico, desenvolvendo um estudo comparativo das frequências e deformadas entre os sistemas desacoplados e acoplados, considerando os três meios (barragem, reservatório e fundação) para a análise de vibração livre. Foram também obtidas respostas decorrentes da aplicação de uma carga harmônica aplicada na crista da barragem e, quanto à análise sísmica, foi feita com base em série histórica, permitindo avaliar tensões e deslocamentos em alguns pontos da barragem. Foi tomada para validação do modelo dinâmico a barragem de Koyna, obtendo-se os seis primeiros modos de vibração e suas respectivas frequências, com modelagem de três malhas de elementos finitos, distintas em refinamento, comparando os resultados com os valores disponíveis na literatura.

Aldemir (2018) propõe uma equação de predição para determinar o período fundamental de barragens de gravidade de concreto através da regressão não linear baseada em mais de 19000 modelagens numéricas tridimensionais de barragens. Os parâmetros para modelos 3D incluíram as encostas a jusante do corpo da barragem, o módulo de elasticidade da barragem e da fundação, a altura da barragem, o comprimento do vale e o comprimento das porções inclinadas da geometria do vale. A equação de predição desenvolvida por Ademir teve um valor de coeficiente de determinação de 0,93.

Løkke e Chopra (2019) apresentam uma metodologia para modelagem do problema de interação barragem-reservatório-fundação através da discretização pelo método dos elementos finitos. A influência de parâmetros atrelados a absorção de ondas nas fronteiras do domínio da fundação foi investigada. Além disso, também é apresentada a modelagem dos principais mecanismos não lineares para barragens de concreto e aspectos voltados a calibração do amortecimento no modelo numérico para garantir a coerência com valores medidos em barragens reais.

Araújo e Ribeiro (2020) realizaram um estudo do efeito da bidimensionalidade nos casos de eclusas de concreto através de um código desenvolvido em MATLAB implementado o método de elementos finitos. A análise modal foi realizada e seus resultados comparados com valores obtidos no *software* ANSYS®. Discussões sobre os modos de vibração e de parâmetros intervenientes no comportamento da estrutura foram feitos.

Mendes et al (2021) utilizaram um procedimento analítico simplificado através do método da matriz de transferência modificado para determinar a resposta dinâmica de uma eclusa submetida à componente horizontal S0E do terremoto ocorrido em El Centro. Foram avaliados os de câmara de água vazia e completamente cheia por meio de uma análise acoplada fluido-estrutura. Os resultados foram comparados com o método dos elementos finitos e demonstraram um bom acordo.

O Grupo de Dinâmica e Interação Fluido-Estrutura (GDFE) é um grupo de pesquisa consolidado que possui diversos trabalhos relacionados a área de dinâmica estrutural e interação fluido-estrutura. O grupo foi criado no ano de 1990, no Programa de Pós-Graduação em Estruturas de Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB) e produziu diversos trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado e materiais didáticos.

Além disso, o GDFE possui diversas parcerias, nacionais e internacionais, com outras universidades, empresas privadas e outros, tais como pode-se mencionar: *Institut National des Sciences et Techniques Nucleaires*- CEA/CEN-Saclay em Paris-FR, Pontificia Universidad Católica del Perú – PUC-Peru, Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - ELETRONORTE, entre outros. No decorrer dos anos, diversos trabalhos na área da dinâmica estrutural e interação fluido-estrutura foram produzidos pelo GDFE, tais como citam-se alguns que são correlatos e serviram de base para o desenvolvimento desta tese.

O estudo de aspectos da interação fluido-estrutura em cavidades acústicas encontradas nos trabalhos de Barbosa (1998), Morais (2000), Pedroso (2000), Pedroso (2004), Pedroso (2006), Souza Júnior e Pedroso (2004), Souza Júnior et al. (2006), Souza (2007), Melo et al (2013) e de Lopez (2020). Aplicação da interação fluido-estrutura em cascas cilíndricas podem ser estudadas nos trabalhos de Lopez (2014), Mendes (2013), Lopez (2016) e França Júnior (2018).

Alguns dos trabalhos que envolvem aspectos relacionados a interação barragem-reservatório, objetivo desta tese, são mencionados, tais como as pesquisas de Ribeiro (2006), Silva (2007), Ribeiro e Pedroso (2009), Ribeiro et al. (2009), Ribeiro (2010), Ferreira et al. (2013), Silveira (2018), Silveira e Pedroso (2018), Freitas (2019), Coelho (2016), Pedroso (2017), Mendes (2018), Mendes et al (2021), Silveira et al. (2021) e Pedroso (2022).

2.2.2. Estudos Experimentais em Barragens e Eclusas de Concreto Gravidade

O estudo experimental em barragens de concreto recebeu uma grande atenção de alguns pesquisadores no decorrer dos anos e ainda o faz atualmente. Chiorino e Neri (2020) apresentam um trabalho abrangendo aspectos históricos de diversas estruturas que foram ensaiadas experimentalmente após a segunda guerra mundial (período de 1951 a 1974) no *Istituto Sperimentale Modelli e Strutture* (ISMES) na Itália. Especificamente tratando da prototipagem em barragens, os autores relatam que até 1955 só existiam modelos relativos às estruturas italianas.

A partir do ano seguinte, começou um número consistente de ensaios nacionais e internacionais, tais como podemos modelos feitos em escala reduzida para: a barragem de *Drossen* na Áustria; a barragem suíça de *Reno di Lei*; a barragem de *Pieve di Cadoredam*; represa de *Forte Buso*; a barragem de *Kurobe* no Japão; a barragem Suíça de *Hongrin*; a

barragem em arco de dupla curvatura *Tolmezzo-Ambiesta*; a barragem de *Ambiesta* e outros diversos modelos para barragens no Japão, Iugoslávia, Alemanha, Bulgária, México, Irã, Argentina, Espanha, França e Austrália. A Figura 2.1 apresenta quatro modelos de barragens que foram feitas no ISMES.

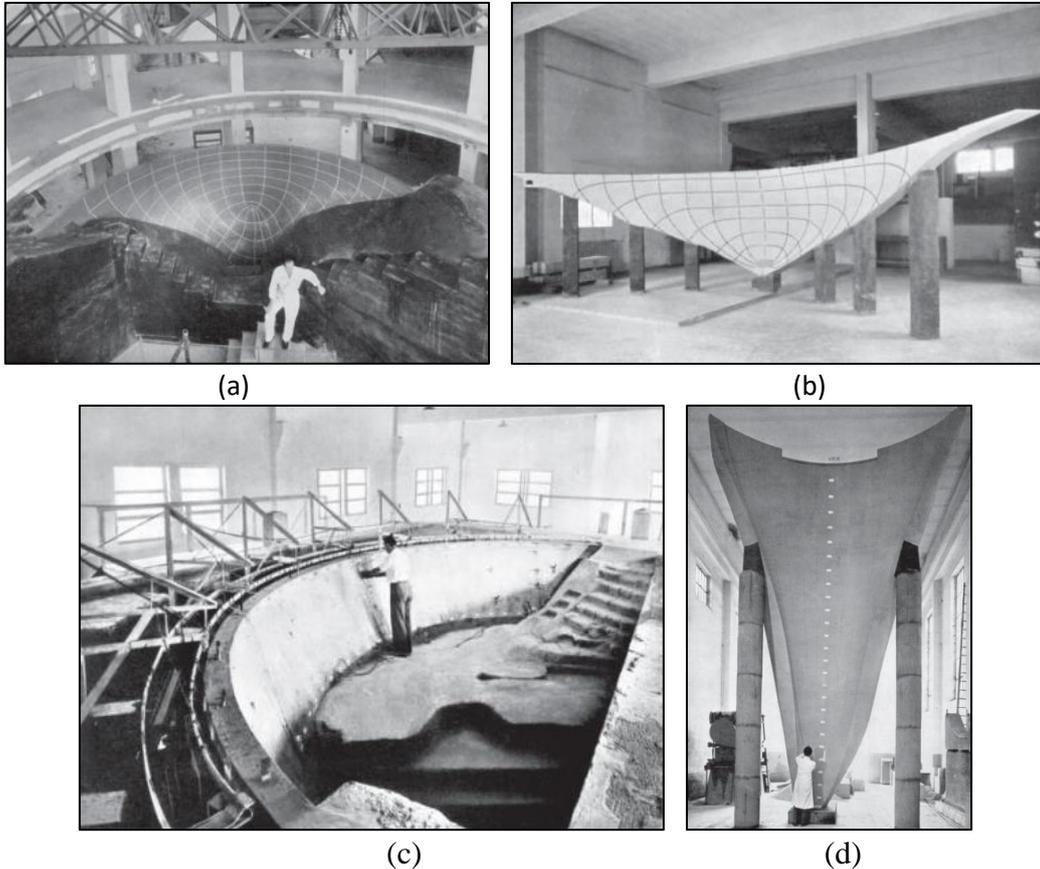


Figura 2.1: Arquivo histórico do ISMES de modelos experimentais em barragens apresentados por Chiorino e Neri (2020): (a) modelo da barragem de Beauregard em 1951, (b) modelo da barragem Valle di Lei em 1957, (c) modelo da barragem Pieve di Cadore em 1946 e (d) modelo da barragem de Vajont Dam em 1957.

Niwa e Clough (1980) investigaram a viabilidade de determinar a resposta linear de barragens em arco de concreto em uma mesa vibratória de 6 metros quadrados. Além disso, um modelo em escala reduzida da barragem de Koyna foi realizado. Uma vibração forçada (ação sísmica) foi introduzida na mesa vibratória e a resposta estrutural dinâmica no domínio do tempo e da frequência foram obtidos. As fissuras obtidas nos modelos serviram para avaliar seus mecanismos reais de falha da estrutura real. A Figura 2.2 apresenta o esquema experimental do ensaio.

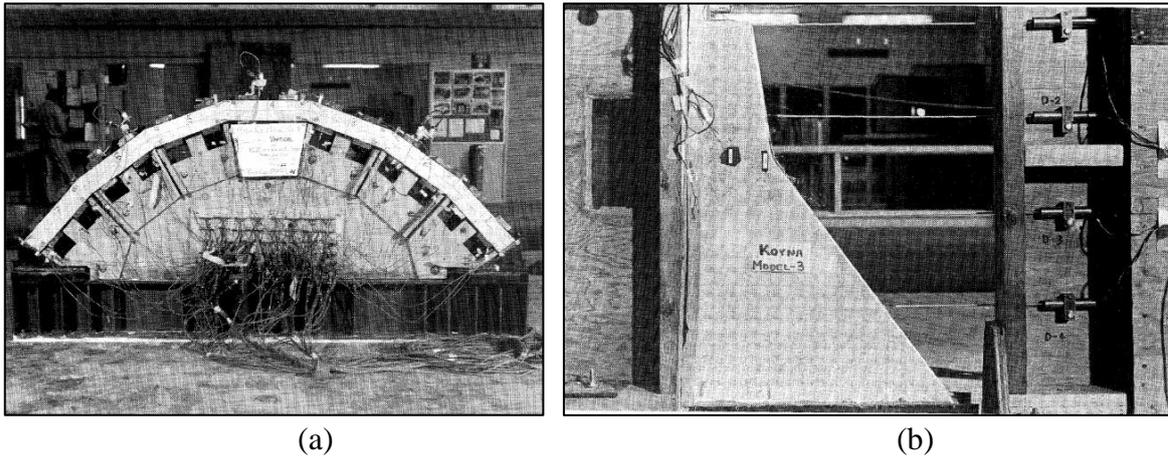


Figura 2.2: Abordagem experimental realizada por Niwa e Clough (1980): (a) modelo de barragem em arco e (b) modelo da barragem de Koyna.

Donahey e Hall (1989) realizaram uma análise estrutural estática no *software* CUFRAM e compararam com os resultados obtidos através da instrumentação da Eclusa e Barragem nº 1 do rio *Red*, localizado nos Estados Unidos. A eclusa estava vazia e o efeito do fluido não foi contemplado na análise, sendo analisada o efeito da pressão do solo na parte externa das paredes da eclusa. Estas pressões de solo foram medidas e usadas como pressões de entrada para o CUFRAM. Os esforços obtidos nos elementos estruturais das análises computacionais têm boa concordância com os esforços oriundos dos dados de deformação extraídas experimentalmente. Sensores do tipo *strain gage* foram instalados e captaram as deformações na base e nas paredes da eclusa. A Figura 2.3 apresenta a seção da eclusa com a posição da instrumentação dos sensores de pressão e com *strain gage*.

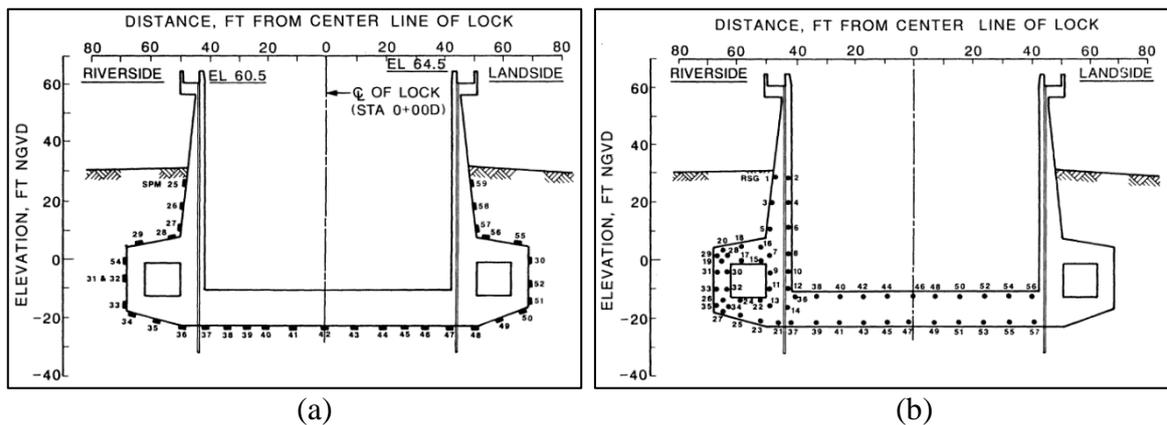


Figura 2.3: Abordagem experimental realizada por Donahey e Hall (1989): (a) seção da eclusa com sensores para captar as pressões do solo e (b) seção da eclusa com *strain gages*.

Donlon e Hall (1991) procederam com ensaios experimentais, em laboratório, de protótipos de barragem de gravidade em concreto em escala reduzida e submetida a vibração forçada em uma mesa sísmica. Um aparato experimental foi desenvolvido para o ensaio, com o

reservatório de líquido fixo e a estrutura da barragem deslocável. O objetivo dos testes era avaliar a resposta dinâmica no domínio do tempo, a natureza da formação de fissuras, bem como aferir a estabilidade da barragem na presença delas. A Figura 2.4 apresenta o esquema do ensaio experimental citado.

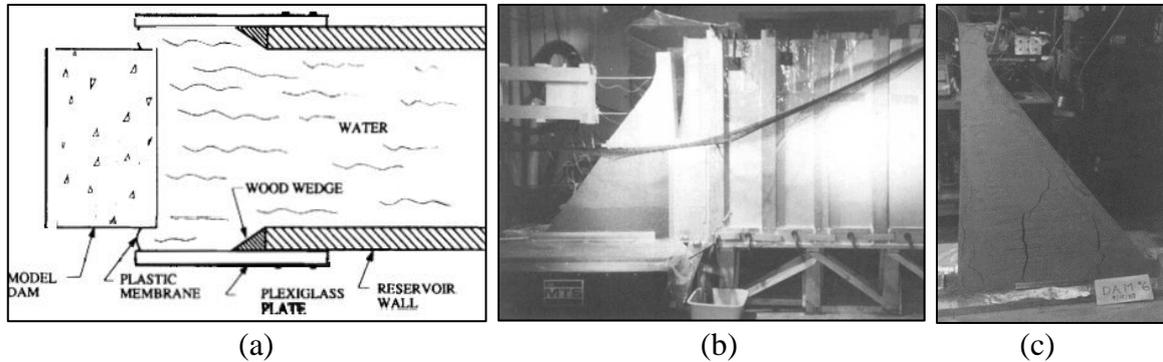


Figura 2.4: Abordagem experimental realizada por Donlon e Hall (1991): (a) esquema do experimento, (b) dispositivo experimental com barragem e reservatório e (c) protótipo da barragem com fissuras após ensaio.

Mir e Taylor (1995) desenvolveram um material para construir modelos, em escala reduzida, de um protótipo de barragem de gravidade de concreto. A abordagem experimental, feita no simulador de terremoto da Universidade de Bristol, testou os modelos até a ruptura. Assim, foram realizados diversos testes de vibração com o objetivo de avaliar possíveis mecanismos de falha sob movimentos simples e sísmicos. Os testes foram conduzidos com e sem a presença de pressão hidrostática. A pressão hidrodinâmica foi simulada usando massas presas na estrutura do modelo baseada na abordagem de massa adicional de Westergaard. Foi observado que a fissuração na base da estrutura era o principal mecanismo de falha. A Figura 2.5 apresenta o experimento.

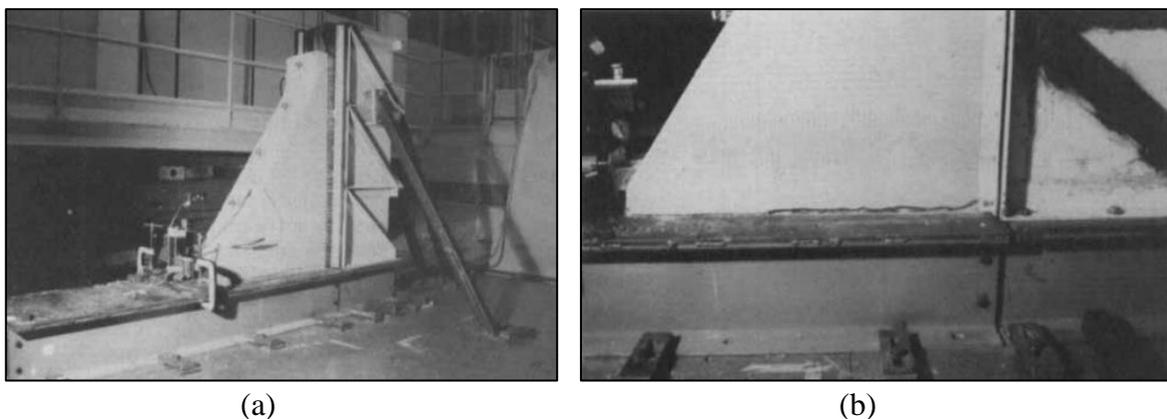


Figura 2.5: Abordagem experimental realizada por Mir e Taylor (1995): (a) perfil da barragem e configuração experimental e (b) fissura originada na base da barragem.

Proulx e Paultre (1997) realizaram ensaios de vibração forçada na barragem de gravidade Outardes 3 (Figura 2.6), localizada no Canadá. A abordagem experimental envolveu a captação das respostas de aceleração na barragem sob carga harmônica, produzidas por um motor de massa excêntrica. As pressões hidrodinâmicas também foram extraídas em vários locais do reservatório, em um limite de até 90 m da face da barragem. Os resultados experimentais foram comparados com uma discretização numérica, bidimensional e tridimensional, através do método dos elementos finitos. Assim, foi enfatizado que a abordagem bidimensional pode captar a ressonância fundamental do sistema barragem-reservatório com boa precisão. Para modos e frequências mais altas a modelagem tridimensional do sistema barragem-reservatório-fundação reproduz mais adequadamente o comportamento experimental.

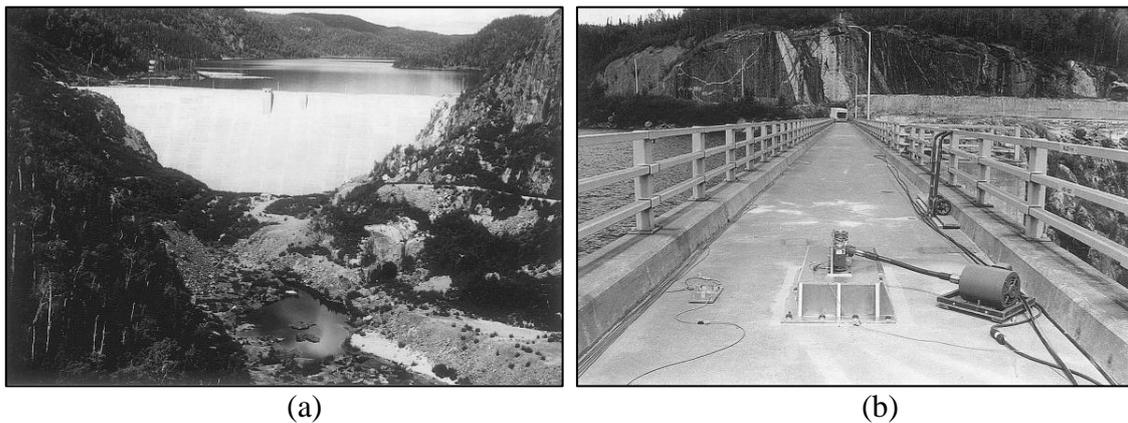


Figura 2.6: Abordagem experimental realizada por Proulx e Paultre (1997): (a) barragem do Outardes 3 e (b) motor de massa excêntrica e acelerômetros na crista da barragem.

Ghobarah e Ghaemian (1998) efetuaram um estudo experimental, de um modelo em pequena escala, da barragem de gravidade em concreto *Pine Flat*, localizada na Califórnia-EUA. Os ensaios foram realizados para simular a resposta estrutural da estrutura submetida as cargas hidrostáticas, hidrodinâmicas e sísmicas. Um mecanismo de carga com dois atuadores foi desenvolvido para aplicar quatro cargas concentradas na face a montante do modelo experimental da barragem. Assim, a carga estática que simula a pressão hidrostática foi aplicada e mantida constante. Por outro lado, a carga dinâmica foi aplicada ciclicamente por um atuador para representar os efeitos dinâmicos da carga do terremoto. Os resultados mostram que é possível simular a carga hidrodinâmica em um modelo reduzido de barragem utilizando um número finito de cargas concentradas cíclicas. Valores de tensões e deformações obtidas no modelo experimental foram condizentes com os valores encontrados em um protótipo analisado pelo método dos elementos finitos.

Rosca (2008) estudou o comportamento dinâmico da barragem em concreto de Odiaxere, localizada em Portugal, através de um modelo físico em escala reduzida feito no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Portugal. Ao determinar o comportamento da barragem frente a uma ação sísmica foi possível simular a possibilidade de abertura da junta deslizando entre blocos de concreto e as fissuras no concreto. A Figura 2.7 apresenta o protótipo experimental da barragem de Odiaxere.



Figura 2.7: Abordagem experimental realizada por Rosca (2008): (a) vista a montante do protótipo da barragem em arco e (b) vista a jusante do protótipo da barragem em arco.

Saleh e Madabhushi (2010) realizaram ensaios experimentais em modelos em escala reduzida de barragem, investigando os efeitos da flexibilidade da parede (paredes rígidas e flexíveis) nas pressões hidrodinâmicas. O modelo experimental da estrutura feito em alumínio e em concreto reproduz o efeito da parede do tanque flexível e rígida, respectivamente. Sensores de pressão na interface fluido-estrutura captam as amplitudes de pressão em diferentes profundidades do líquido. Os resultados experimentais obtidos das pressões hidrodinâmicas foram comparadas com a teoria de a equação de Westergaard que considera a barragem rígido-móvel, bem como o método de Chopra que incorpora a flexibilidade da estrutura. Os estudos comparativos analíticos e experimentais mostraram que a equação de Westergaard dá uma estimativa conservadora das pressões hidrodinâmicas e que o método de Chopra subestima as pressões hidrodinâmicas para baixas profundidades do reservatório, mas fornece previsões boas para maiores profundidades do reservatório. A Figura 2.8 apresenta o diagrama dos modelos ensaiados.

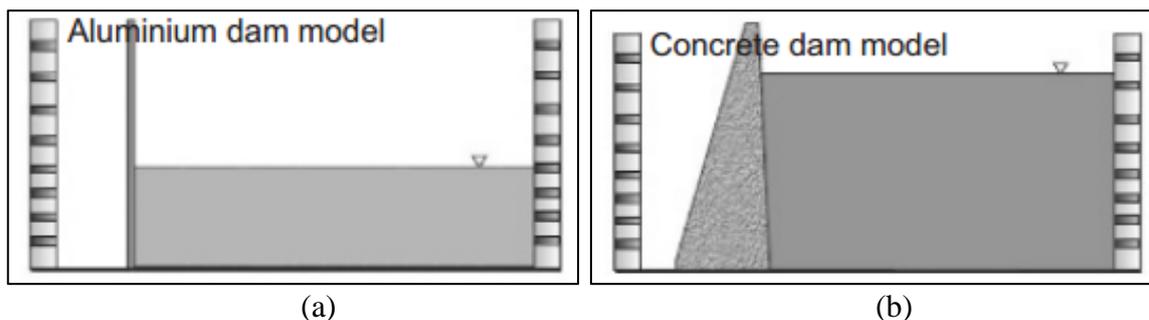


Figura 2.8: Abordagem experimental realizada por Saleh e Madabhushi (2010): (a) diagrama do modelo flexível em alumínio e (b) diagrama do modelo rígido em concreto.

Mendes (2010) estudou sistemas de monitorização, aplicados *in loco*, em barragens de concreto para determinar suas características dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração, amortecimentos modais) ao longo do tempo, tendo em conta diversos tipos de excitação (vento, vibração pelo funcionamento dos geradores de energia, micro tremores, sísmos etc.). Formulações da mecânica estrutural aplicadas através de discretização de modelos numéricos para a análise dinâmica, considerando a interação barragem-reservatório-fundação, foram utilizadas. Assim, o monitoramento da barragem do Cabril, localizada em Portugal, foi feito, com a qual são apresentadas uma gama de resultados experimentais, bem como as potencialidades do sistema de monitoramento do comportamento dinâmico. A Figura 2.9 apresenta a abordagem experimental citada.



Figura 2.9: Abordagem experimental realizada por Mendes (2010).

Chen et al. (2012) realizaram um ensaio experimental em escala reduzida de uma seção de uma casa de força de um modelo de barragem de gravidade em concreto usando a lei de similitude. O reservatório foi considerado no ensaio com um dissipador de energia no limite longitudinal do reservatório. A fundação e base do protótipo é assumida rígida. Foram investigadas as deformações elásticas, os danos e falhas em vários níveis de aceleração da base através de uma mesa de ensaios. Foram introduzidos na vibração um acelerograma sísmico reduzido de 1:8.66 em relação a duração real. Um modelo numérico foi realizado para um estudo comparativo, com resultados em boa concordância com aqueles obtidos a partir dos testes na mesa vibratória. A Figura 2.10 traz o ensaio experimental citado.

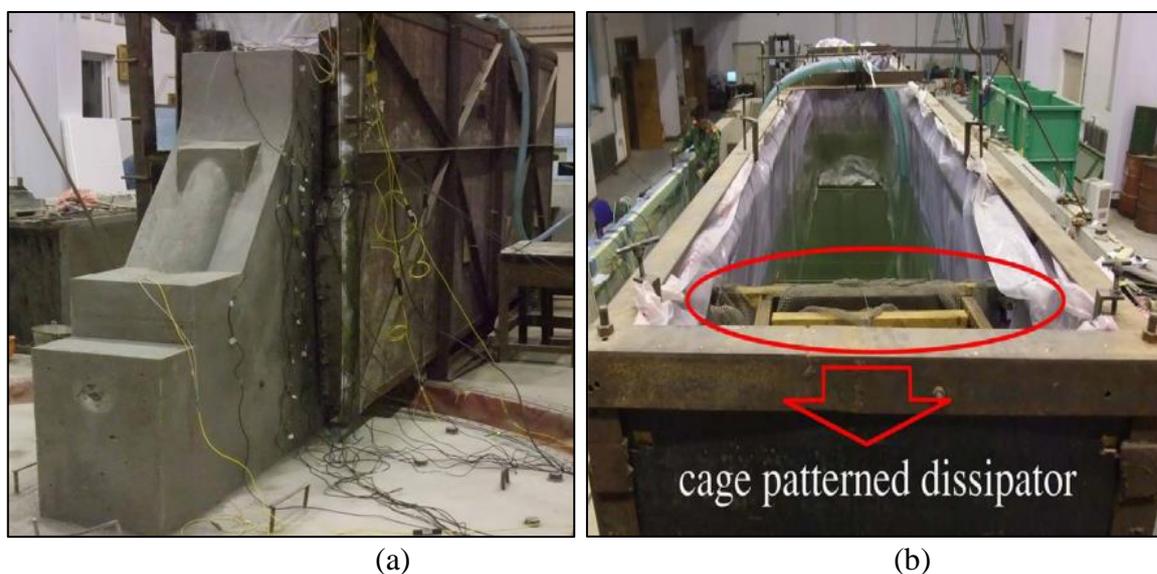


Figura 2.10: Abordagem experimental realizada por Chen et al. (2012): (a) modelo da seção ensaiado e (b) tanque de água com dissipador de energia.

Calcina et al. (2014) realizaram testes experimentais de vibração *in loco* em uma barragem em arco em duas épocas distintas a fim de avaliar a efeito produzido por dois níveis diferentes de água do reservatório nas propriedades de vibração estrutural. As medições foram feitas por meio de um único tromômetro triaxial de alta resolução e dois sismômetros de baixa frequência, colocados em pontos diferentes da estrutura. Além disso, um modelo tridimensional pelo método dos elementos finitos do sistema de arco barragem-reservatório-fundação foi desenvolvido para determinar as propriedades de vibração, como frequências naturais e formas modais, e suas mudanças relacionadas ao nível da água e com os resultados experimentais.

Tarinejad et al. (2014) realizaram testes de vibração forçada em campo (Figura 2.11) e estudos através do método dos elementos finitos da barragem de concreto Shahid Rajaei,

localizada no norte do Irã. As investigações foram realizadas para obter as propriedades dinâmicas do sistema acoplado barragem-reservatório-fundação. Dois tipos diferentes de unidades excitadoras (duplo e simples motor) foram parafusadas na crista da barragem, sendo utilizadas para realizar a excitação e obtenção de nove frequências naturais e modos de vibração do sistema. Os resultados entre valores experimentais e do modelo numérico calibrado foram satisfatórios e condizentes com os efeitos dinâmicos esperados.

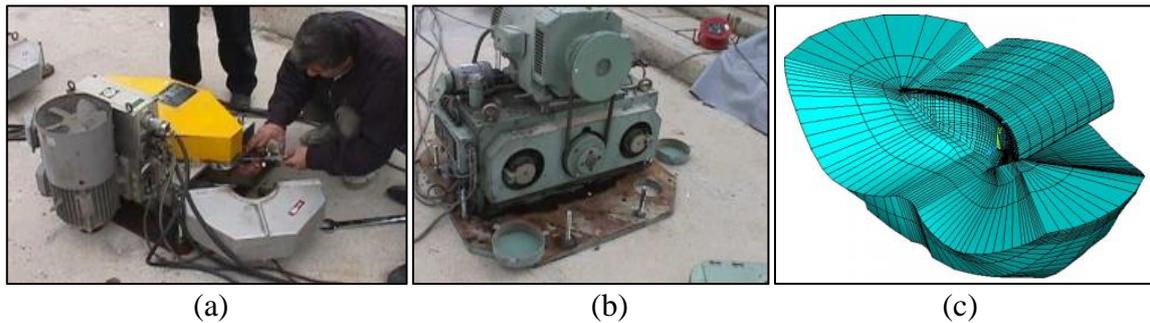


Figura 2.11: Abordagem experimental realizada por Tarinejad et al. (2014): (a) excitação com duplo motor, (b) excitação com simples motor e (c) modelo numérico pelo MEF.

Cheng et al. (2018) exploraram e compararam a aplicação dos dois métodos diferentes para realizar a retroanálise dos parâmetros dinâmicos de materiais para barragens gravitacionais de concreto com base em modelos multivariados de aprendizado de máquina (*Machine Learning Models*). Para isso, uma análise experimental de uma barragem de concreto de gravidade submetida a diferentes excitações foi feita em escala reduzida (relação de 1:160), utilizando material de concreto e seis sensores de aceleração unidirecional foram usados para medir a resposta de aceleração do modelo experimental. As características modais da estrutura foram avaliadas, bem como o módulo de elasticidade dinâmico do material. A Figura 2.12 apresenta o modelo experimental realizado.

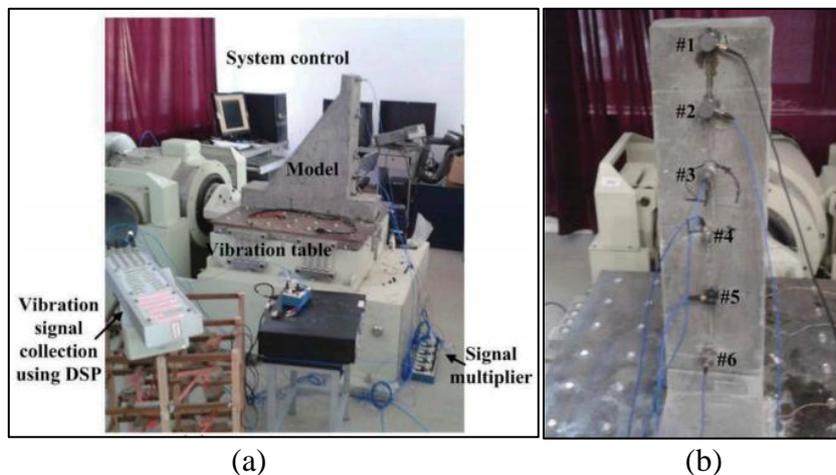


Figura 2.12: Abordagem experimental realizada por Cheng et al. (2018): (a) montagem do ensaio e (b) acelerômetros instalados.

Sevim e Altunisik (2018) determinaram numericamente e experimentalmente, em laboratório, a resposta dinâmica de uma barragem em arco em escala reduzida (Figura 2.13), utilizando testes de vibração ambiente e forçada. A vibração forçada foi feita através da excitação de um martelo de impacto. No teste de vibração ambiente um impulso também foi gerado, porém a identificação modal é caracterizada por conter somente dados de saída, não sendo medida a força de entrada. Assim, o protótipo da barragem em arco teve as características dinâmicas (frequências naturais, deformadas modais simétricas e anti-simétricas e razão de amortecimento) obtidas para diferentes níveis de água no reservatório, onde foram obtidos uma boa concordância entre valores numéricos e experimentais.

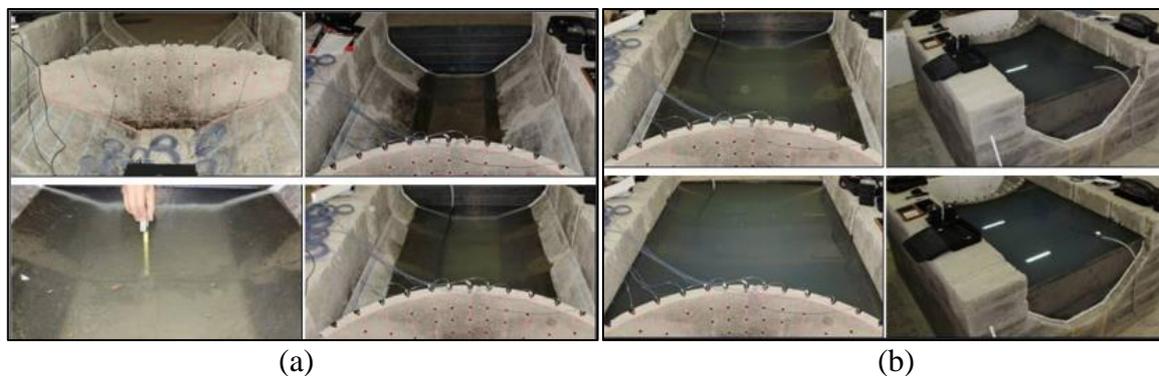


Figura 2.13: Abordagem experimental realizada por Sevim e Altunisik (2018): (a) barragem com reservatório vazio e parcialmente cheio de água e (b) reservatório totalmente cheio.

Pereira (2019) realizou ensaios de vibração *in loco* em um conjunto de seis barragens de concreto em Portugal. As barragens possuíam diferentes tipologias, idades e características tanto geométricas quanto físicas. No procedimento experimental foram instalados diversos sensores (fixos e móveis) para análise modal operacional, ou seja, captação dos modos de vibração e das frequências (mais baixas) das estruturas. O teste vibração realizado foi do tipo ambiente (excitação proporcionada pelo próprio ambiente), sendo empregado um sistema de aquisição de dados de alta qualidade e gravadores GPS portáteis. Além disso, Pereira (2019) realiza ensaios de vibração forçada (varredura senusoidal) na barragem do Baixo Sabor, em Portugal, através de um vibrador (motor) de massa rotacional excêntrica para avaliação das características dinâmicas desta barragem. Os resultados experimentais são comparados com modelagens numéricas e apresentaram um bom acordo. A Figura 2.14 apresenta o ensaio.



(a)

(b)

Figura 2.14: Abordagem experimental realizada por Pereira et al. (2019): (a) Acelerômetro uniaxial com cabo e (b) vibrador de massa excêntrica.

Wang et al. (2019) executaram ensaios experimentais (Figura 2.15) em dois modelos reduzidos feitos em argamassa para uma seção de vertedouro de uma barragem, com intuito de determinar a resposta sísmica e os locais de falha (fratura) da estrutura. No primeiro modelo foi aplicada uma onda sísmica do código chinês, enquanto que no segundo modelo uma onda sísmica de Wenchuan. Uma mesa sísmica, um módulo de aquisição de dados, sensores acelerômetros e extensômetros foram utilizados nos testes laboratoriais. Com base no estudo feito, os locais e formas de ruptura no final dos testes indicaram as áreas vulneráveis do vertedouro sob dois tipos de terremoto.



(a)

(b)

Figura 2.15: Abordagem experimental realizada por Wang et al. (2019): (a) modelo da seção do vertedouro fabricado e (b) visão geral do ensaio do modelo.

Kadhim et al. (2021) realizaram uma análise experimental (Figura 2.16) em modelos em escala reduzida e de geometria próxima a barragem em arco de concreto. O efeito das fissuras com a variação da pressão da água e devido à magnitude de um terremoto foi investigada.

Uma mesa vibratória foi construída para realização dos testes dinâmicos. O trabalho experimental abrangeu dois grupos de ensaios, sendo que cada grupo dispunha de dois graus diferentes de modelos de curvatura da barragem. Os resultados mostraram um bom comportamento de todas as barragens de arco sob ação de terremoto. Quanto maior o grau de curvatura do arco da barragem menor os deslocamentos, fissuras e tensões, melhorando a estabilidade do sistema.



Figura 2.16: Abordagem experimental realizada por Kadhim et al. (2021): (a) modelos de barragem em arco e (b) mesa vibratória para os testes.

Alegre et al. (2021) apresentam um estudo comparativo entre análises experimentais e numéricas sobre o comportamento dinâmico de barragens de concreto em condições operacionais, com base no monitoramento dinâmico das estruturas e da discretização pelo método dos elementos finitos, respectivamente. Os estudos de caso foram da barragem de Cabril (132 m de altura), localizada em Portugal monitorada desde 2008, e da barragem de Bassa (170 m de altura), em Moçambique que iniciou o monitoramento em 2010, sendo as duas barragens em arco. Sensores acelerômetros e módulos de aquisição de dados captam os dados. A evolução das principais frequências naturais ao longo do tempo, tendo em vista a influência do nível da água do reservatório nas propriedades dinâmicas do sistema barragem-reservatório-fundação foram investigadas, bem como a correlação das propriedades dinâmicas com a deterioração e o envelhecimento destas estruturas. A comparação entre as frequências experimentais e os valores numéricos mostraram que, mesmo com processo de deterioração existentes, o comportamento dinâmico de ambas as estruturas não modificaram no período avaliado. A Figura 2.17 apresenta a abordagem experimental citada.

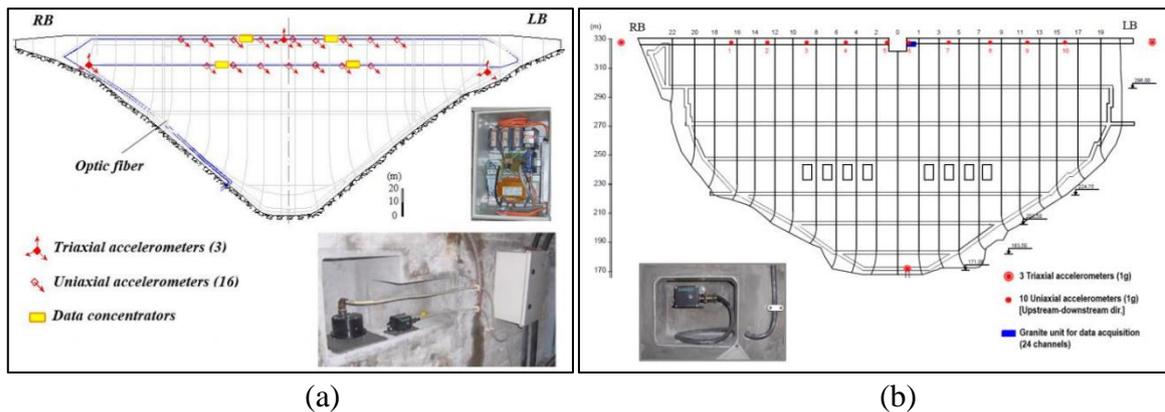


Figura 2.17: Abordagem experimental realizada por Alegre et al. (2021): (a) perfil da barragem do Cabril e acelerômetros instalados e (b) perfil da barragem de Bassa e acelerômetros instalados.

2.2.3. Estudos Experimentais do Efeito de Superfície Livre *Sloshing*

O efeito de superfície livre *sloshing* está presente em diversas aplicações no âmbito da engenharia civil e mecânica, como por exemplo, as cargas líquidas em um navio, o combustível líquido no tanque de uma aeronave ou foguete, o tanque de armazenamento de líquidos de um caminhão tanque, piscinas em edifícios submetido a movimentações de origem sísmicas ou vento, entre outras aplicações.

Durante o fenômeno do *sloshing* o fluido armazenado se move abruptamente de um lado para a outra extremidade quando o reservatório é submetido à excitação externa. A primeira frequência do modo de *sloshing* produz as maiores amplitudes de ondas sob excitação externa, então o primeiro modo de excitação têm maior importância nos estudos do *sloshing*.

Pesquisas experimentais sobre *sloshing* foram realizadas durante as últimas décadas, tais como pode ser mencionado os trabalhos de Battaglia et al. (2018), na qual efetuaram um estudo analítico, numérico e experimental do efeito de superfície livre *sloshing* em um tanque retangular de paredes rígidas. A mesa de ensaio submete o tanque a um movimento harmônico (unidirecional) controlado, sendo o estudo focado na resposta 3D que aparece em certas frequências e amplitudes da forma de onda sinusoidal imposta durante a vibração forçada, particularmente nas condições de ressonância. Para contabilizar o efeito da superfície livre são utilizados controladores de mesa e sensores ultrassônicos. Os experimentos também foram gravados em vídeo. Assim, as alturas máximas e mínimas de ondas foram extraídas durante diferentes regimes de vibração forçada periódica e mostraram um bom acordo com valores analíticos e numéricos. A Figura 2.18 demonstra o aparato experimental realizado por Battaglia et al. (2018).

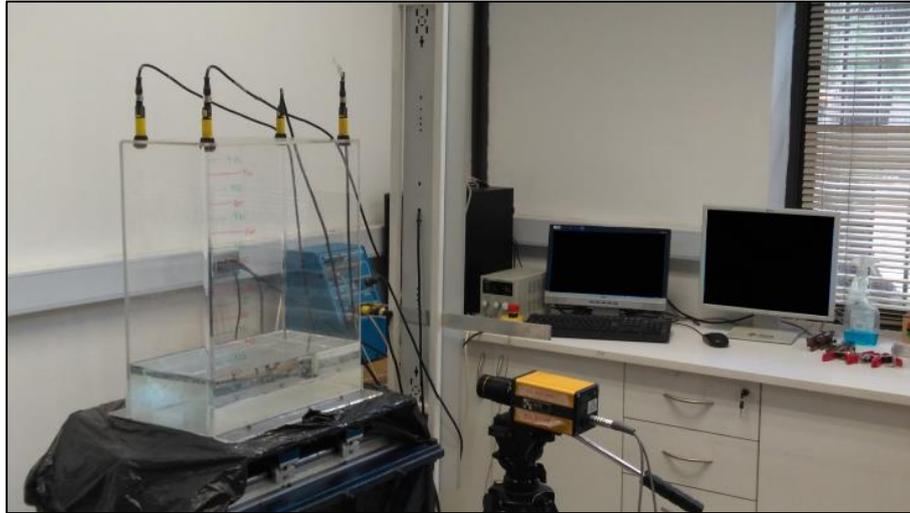


Figura 2.18: Abordagem experimental realizada por Battaglia et al. (2018).

Ning et al. (2019) realizaram uma análise experimental (Figura 2.19) do efeito *sloshing* em tanques de paredes rígidas contendo uma camada flutuante de espuma sólida sobre o fluido interno. Uma mesa vibratória produz uma excitação senusoidal no tanque. O experimento é gravado por uma câmera e sensores de pressão captam as pressões hidrodinâmicas. As análises tiveram objetivo de captar os efeitos da espessura da camada de espuma, da amplitude de excitação e da frequência de excitação sobre o *sloshing*. As camadas flutuantes de elementos de espuma sólida não afetaram o modo de vibração fundamental do líquido. Contudo, com a presença da espuma, durante a ressonância, a amplitude de altura máxima da onda é reduzida.

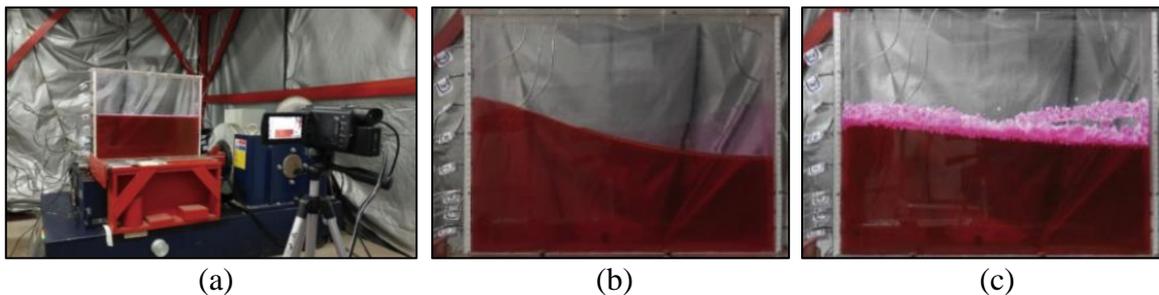


Figura 2.19: Abordagem experimental realizada por Ning et al. (2019): (a) Aparato experimental, (b) *sloshing* sem camada de espuma e (c) *sloshing* com camada de espuma.

Constantin et al. (2020) procederam com um ensaio experimental para avaliar o efeito da superfície livre do líquido *sloshing* em um tanque pequeno submetido a um movimento vertical oscilatório transitório. A intenção do estudo foi de prever com maior precisão os movimentos de superfície do fluido para aplicação em projetos aeroelásticos em asas de aeronaves. O aparato experimental consiste em um tanque acoplado na região central de uma viga flexível, com massa fixada e uma haste utilizada para impor a configuração deformada

do sistema (Ver Figura 2.20). Acelerômetro e uma câmera foram utilizados para leitura da resposta da estrutura e do *sloshing*, respectivamente. Assim, a análise dinâmica, referente a um único grau de liberdade vertical, foi realizada para avaliar a resposta transitória de duas formas: a primeira com a variação do nível de fluido no tanque para uma mesma deformada inicial da viga e a segunda com diferentes configurações iniciais de deformada da viga para três níveis de fluido. Além disso, o método da partícula hidrodinâmica suavizada (PHS) e uma formulação analítica de um mecânico equivalente com um grau de liberdade foi empregado. Os resultados comparativos foram satisfatórios.

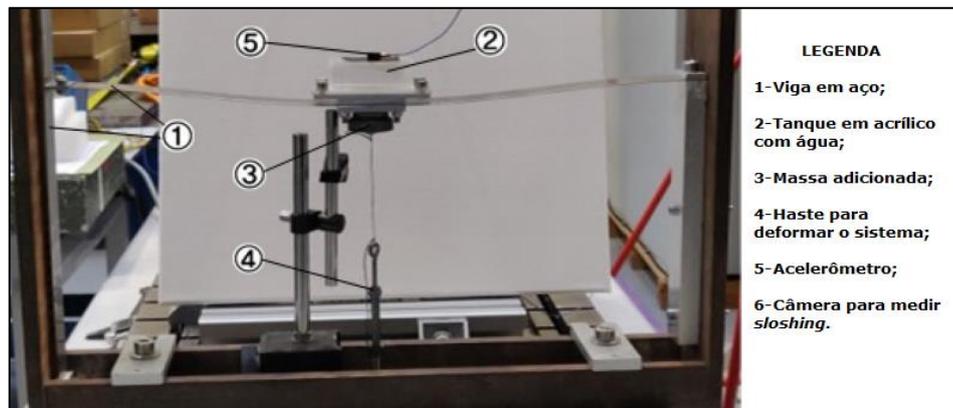


Figura 2.20: Aparato experimental para o estudo do *sloshing* submetido a acelerações verticais (Constantin et al., 2020, adaptado).

Kamarroudi et al. (2021) procederam com um estudo experimental (Figura 2.21) em tanques cilíndricos de paredes rígidas com o intuito de obter um conjunto de resultados para validar uma análise através do método dos elementos finitos. O tanque cilíndrico foi instalado sobre uma mesa vibratória capaz de criar simultaneamente uma excitação harmônica horizontal e vertical. Duas câmeras, um sensor ultrassônico, um motor elétrico e um dispositivo para variar a velocidade do motor integravam o aparato experimental. Assim, foram avaliadas diferentes frequências naturais para diversas profundidades da água. A partir disso, como o modelo numérico validado, a análise pelo MEF foi expandida para simular tanques elevados de diversos tamanhos reais com várias alturas de água, submetidos a terremotos com grandes componentes verticais. Por fim, foi proposto uma modificação no modelo analítico de massa-mola de Housner, que é utilizado para simular tanques, sendo adaptado para considerar excitações verticais. Os resultados indicaram que, devido ao efeito das excitações verticais do terremoto, a altura da onda *sloshing* e os esforços de momento na base no tanque aumentam cerca de 20% e 10%, respectivamente.

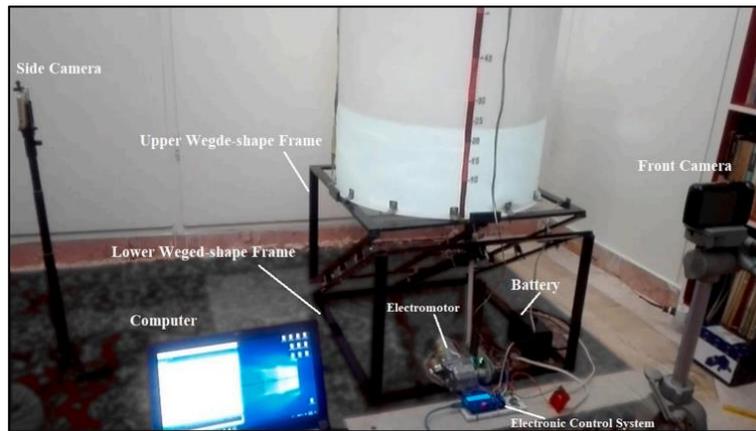


Figura 2.21: Aparato experimental utilizado por Kamarroudi et al. (2021).

Thirunavukkarasu e Rajagopal (2021) realizaram ensaios experimentais em um tanque retangular de paredes rígidas para avaliar o efeito *sloshing* com e sem a presença de dispositivo atenuantes (*baffles*) no interior do tanque. O tanque foi submetido a um movimento sinusoidal com amplitude de excitação fixa de 20 mm e frequência dependendo do nível de da água no tanque. O tanque foi feito de acrílico transparente que favorece o traçado do perfil de superfície livre do líquido interno pela técnica de vídeo gráfico. Um sensor de deslocamento ultrassônico é utilizado para captar o movimento horizontal do tanque. Além disso, uma simulação numérica foi realizada e validada com modelo experimental. O tanque com os dispositivos se mostrou eficiente na supressão de *sloshing* no tanque. A Figura 2.22 apresenta o aparato experimental utilizado.

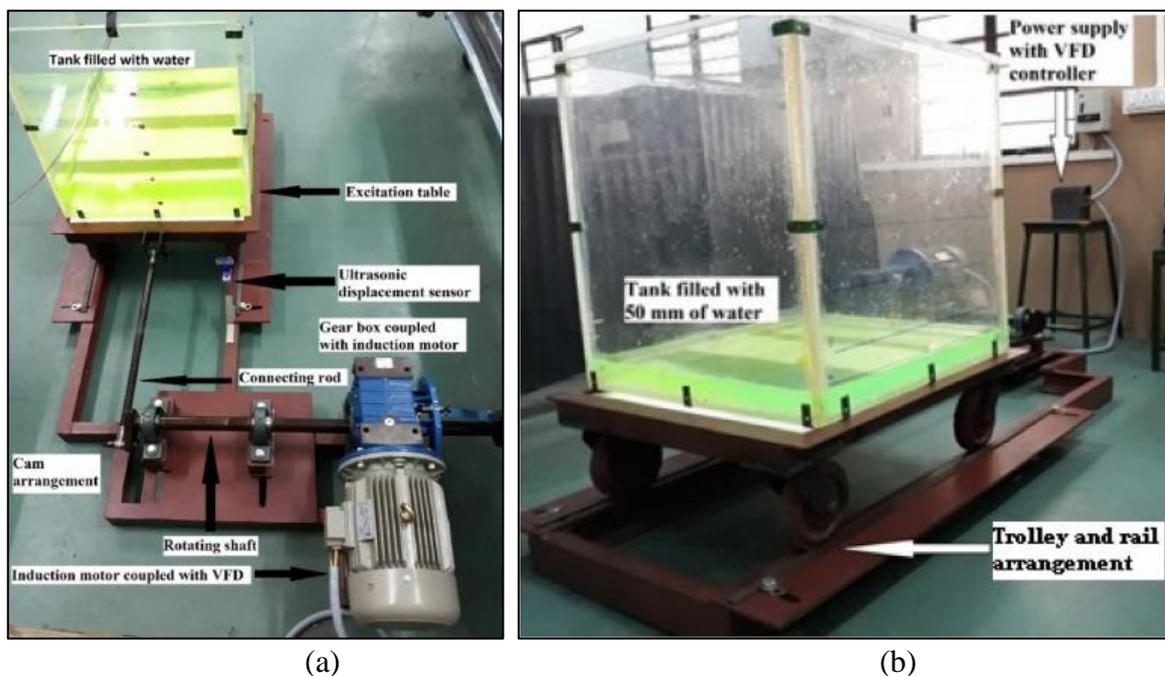


Figura 2.22: Abordagem experimental realizada por Thirunavukkarasu e Rajagopal (2021): (a) vista superior do aparato experimental e (b) vista dos roletes na base.

Agresta et al. (2021) procederam uma série de testes experimentais em um tanque retangular de paredes rígidas, com diferentes configurações do fundo (plano, inclinado e circular), a fim de compreender e simular o efeito de ondas de superfície livre *sloshing* relacionado ao movimento da água gerado pela oscilação senoidal horizontal de uma mesa deslizante. Foram investigados os resultados da primeira frequência natural de *sloshing* para as diferentes configurações do fundo, bem como identificado as respectivas propriedades de amortecimento do fluido interno, com intuito de obter os desempenhos de dissipação de energia nesse tipo de problema. A Figura 2.23 traz o experimento realizado.

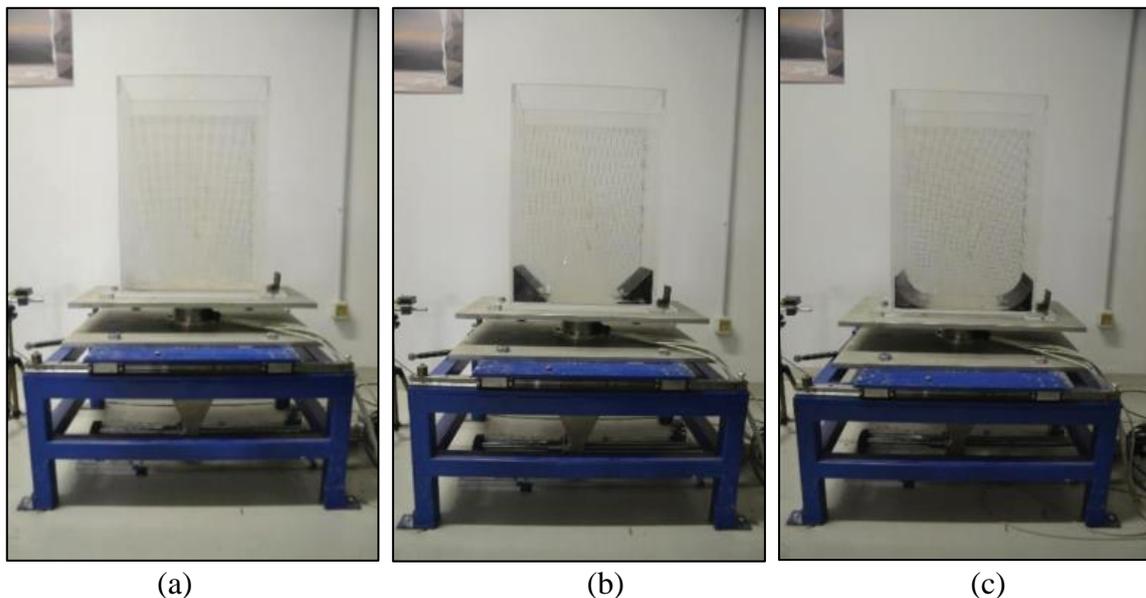


Figura 2.23: Abordagem experimental realizada por Agresta et al. (2021): (a) tanque com fundo plano, (b) tanque de fundo inclinado e (c) tanque com fundo circular.

Han et al. (2021) apresentam um estudo analítico e experimental (Figura 2.24) para determinar as frequências naturais e modos de vibração de um tanque cilíndrico horizontal tridimensional parcialmente preenchido com fluido. No procedimento analítico, o líquido interno do tanque foi considerado como incompressível e invíscido, cuja função potencial de velocidade satisfaz a equação de Laplace e a superfície livre a condição de onda de gravidade superficial. As paredes do tanque na interface fluido-estrutura foram assumidas rígidas. A abordagem experimental foi realizada para obter as frequências e modos de *sloshing* com diferentes comprimentos e profundidades de fluido. Para isto, um aparato experimental, na forma de pêndulo, foi desenvolvido e sensores de distância a laser de alta resolução captam a variação nas amplitudes de ondas do fluido. A precisão do método semi-analítico foi validada comparando os resultados com os valores experimentais e com o método dos elementos finitos.

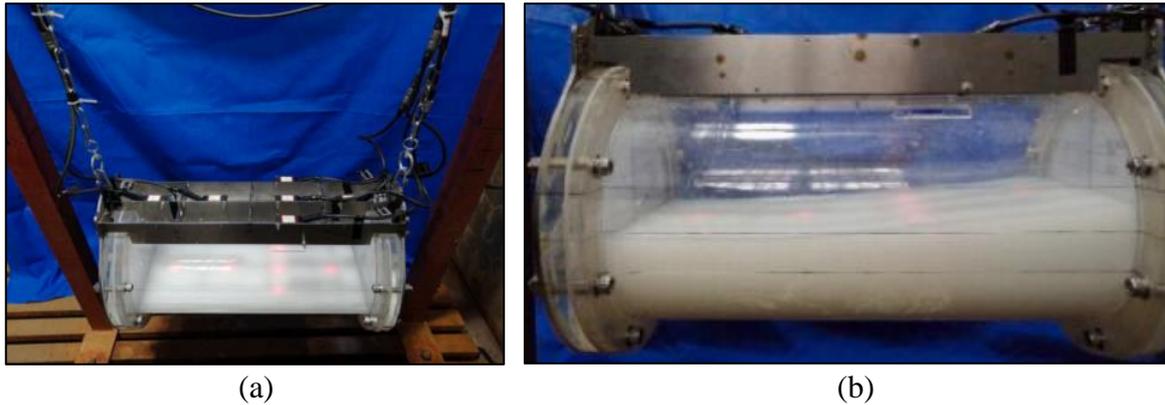


Figura 2.24: Abordagem experimental realizada por Han et al. (2021): (a) configuração experimental para o teste de *sloshing* e (b) movimento *sloshing* do fluido.

2.3. MÉTODO PSEUDO-DINÂMICO (MÉTODO DE CHOPRA)

Uma metodologia analítica aproximada bem difundida na literatura para determinar as frequências fundamentais de uma barragem desacoplada ou acoplada com fluido é o método pseudo-dinâmico, ou também conhecido como método de Chopra (1978).

A hipótese do método pseudo-dinâmico é que a água do reservatório é considerada como um fluido compressível e que a barragem é uma estrutura flexível. Desta forma, no método é assumido que a força de inércia e a força hidrodinâmica, passam a depender do modo fundamental de vibração da estrutura.

Para o cálculo das frequências naturais desacopladas e acopladas fluido-estrutura em barragens de gravidade pelo método pseudo-dinâmico, as etapas descritas abaixo podem ser realizadas.

1ª Etapa – Determinar o período e a frequência fundamental da estrutura desacoplada

No método pseudo-dinâmico inicialmente é necessário o cálculo do período fundamental da barragem desacoplada. Então, a expressão para o cálculo do período fundamental (T_s) de vibração da barragem sem fluido e apoiada em fundação rígida, em segundos, é dada pela Equação (2.1).

$$T_s = 0,01206 \frac{H}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

Sendo H a altura da barragem em metros (m) e E o módulo de elasticidade do concreto, em Gigapascal (GPa) e T_s é o período, em segundos, de vibração da barragem sem fluido. Chopra (1978) ressalta que essa formulação é aproximada e pode ser aplicada em seções

maciças de inércia constante ou variável, permitindo determinar o T_s sem considerar a influência do reservatório.

2º Etapa – Determinar o período e a frequência fundamental da estrutura acoplada com fluido

O período fundamental de vibração da barragem com a influência do reservatório (\tilde{T}_s) pode ser encontrado com a Equação (2.2).

$$\tilde{T}_s = R_1 T_s \quad (2.2)$$

Onde R_1 é o valor obtido na Figura 2.25 utilizando a razão L_z/H e E , onde L_z é a profundidade do reservatório em metros. Os valores do gráfico representado na Figura 2.25 foram extraídos de análises conduzidas por Chopra (1978) de barragens com geometria padrão.

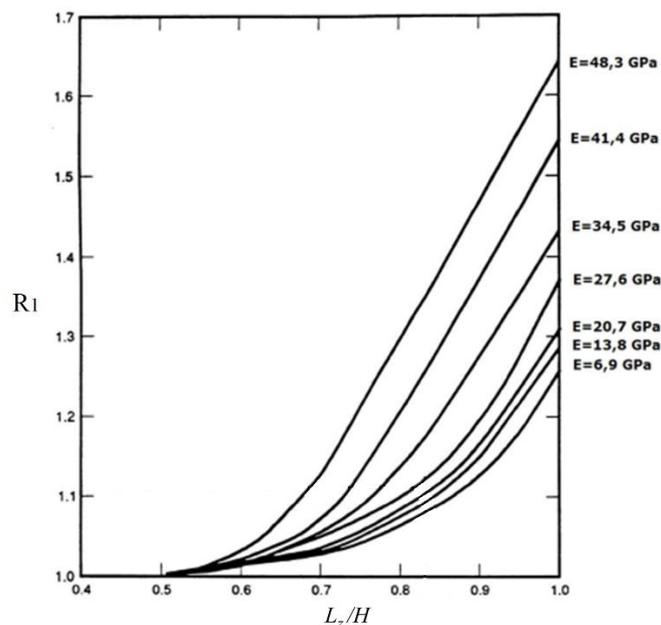


Figura 2.25 – Gráfico para o cálculo de R_1 (Fonte: USACE, 1995; Ribeiro, 2006).

Uma vez que o período desacoplado da barragem é determinado, o período acoplado pode ser obtido através da determinação de R_1 pelo ábaco da Figura 2.25 e da fórmula apresentada na Equação (2.2). Para análise sísmica, outras etapas posteriores são descritas e aplicadas ao método pseudo-dinâmico.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi percorrido os principais estudos analíticos, numéricos e experimentais através da revisão bibliográfica, sendo citado diversos trabalhos dos principais pesquisadores na área, tais como: Westergaard, Chopra, Pierre Léger, Benedikt Weber, Najib Bouaanani, Patrick Paultre, Paulo Jorge Henrique Mendes, Akira Niwa, Ray W. Clough, Miguel Armando Awruch, Sérgio Bouça Pereira e Lineu José Pedroso. Pesquisas desenvolvidas sobre barragens no LNEC em Portugal e publicações do Grupo de Dinâmica e Interação Fluido-Estrutura (GDFE) foram apresentadas. Com base na revisão da literatura realizada pode-se concluir que a abordagem realizada nesta tese demonstra uma parcela de contribuição, em análises voltadas a problemas dinâmicos de interação fluido-estrutura que podem ser aplicados em barragens e eclusas de concreto.

3. GENERALIDADES SOBRE BARRAGENS E ECLUSAS

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado os aspectos gerais sobre os elementos estruturais de barragens, que são obras de grande porte na engenharia para realizar a contenção de volume de água para diversos fins (LITRICO, GEORGES, 1999), e eclusas que são canais criados em locais com diferentes desníveis, possibilitando a subida ou descida de embarcações (SWAMEE, 1992). Iniciar-se-á com as suas classificações, os elementos constituintes, as principais ações atuantes nessas obras especiais, será tratado sobre a análise de estabilidade e a verificação de integridade de barragens e eclusas e, por fim, será apresentado alguns exemplos brasileiros dessas obras.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS E ECLUSAS

A classificação das barragens pode ser feita conforme o tipo de uso que ela será destinada quanto ao material e geometria que será construída (COSTA, 2012). Ao uso ela pode ser destinada a reserva de água para regularização de vazão sazonal, abastecimento, irrigação, hidrelétrica, turismo, contenção de rejeitos e diversas outras finalidades. Dentre os usos citados, é possível avaliar que haverá um desenvolvimento para a região de sua instalação com alguma melhoria de produção de um bem ou com a segurança na região.

Outro aspecto que dependerá da região de instalação é o tipo da barragem que seja mais econômica de ser construída, pois caso seja possível a construção com material da região o custo será menor. Algumas opções comumente utilizadas, no que se refere as barragens de terra e enrocamento, estão apresentadas na Figura 3.1.

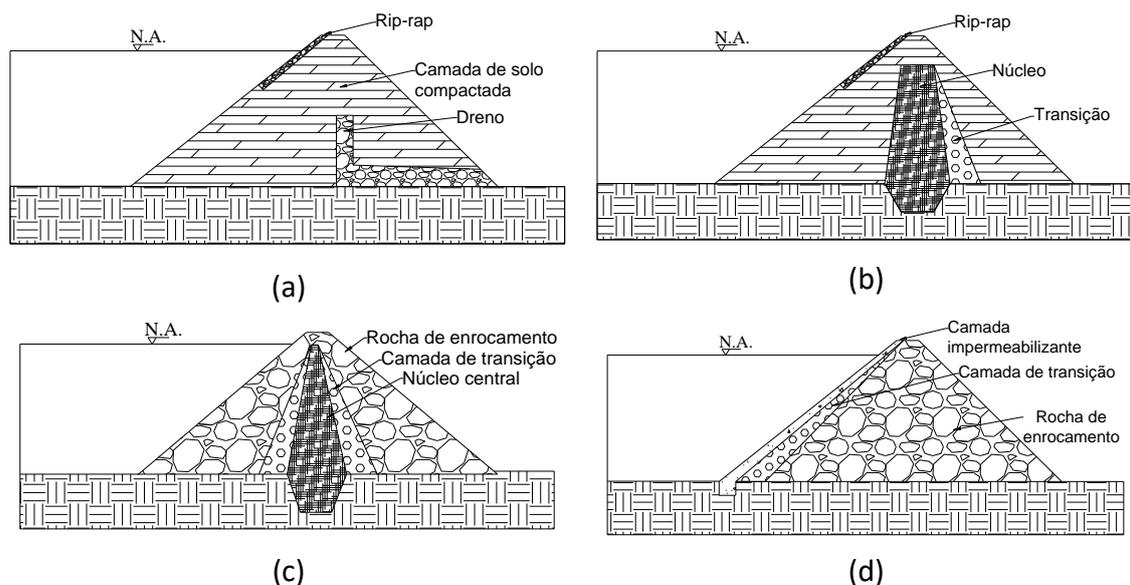


Figura 3.1 – Tipos de barragem quanto a geometria e tipo de material, (a) Barragem de terra homogênea, (b) Barragem de terra zoneada, (c) barragem de enrocamento com núcleo central e (d) barragem de enrocamento com camada impermeabilizante a jusante (Fonte: Adaptado de COSTA, 2012).

Dentre os tipos de barragens com os seus materiais pode-se citar a barragem de terra homogênea (Figura 3.1 (a)), que possui a geometria de um trapézio, com um material de solo que modificando a energia de compactação se modifica a sua permeabilidade.

Quando se modifica a compactação do material e não se altera a sua permeabilidade, se cria um zoneamento de materiais em função de suas características ou permeabilidade, classificando-a como barragem de terra zoneada (Figura 3.1 (b)).

Nessas barragens de terra é necessário que se instale uma pequena cortina de rochas para que a variação do nível d'água e nem as ondas provocadas pelo vento causem o assoreamento do talude de montante, o que se denomina como rip-rap. Outro aspecto de suma importância é o uso de filtro para impedir que todo o maciço entre em liquidez devido a umidade que pode percolar por toda a seção transversal do material.

Quando houver escassez de material de solo próximo a região de instalação, a barragem pode ser construída em rochas, denominando-a de barragem de enrocamento (Figura 3.1 (c, d)). A sua geometria também poderá ser trapezoidal, e deve ser realizado alguma camada para impermeabilizar e evitar a passagem de água reservada, caso essa seja a finalidade da barragem, que pode ser por um núcleo com material impermeável (Figura 3.1 (c)), com face de concreto ou com face em chapa de aço (Figura 3.1 (d)). Outra opção para realizar a estrutura das barragens são com o uso de concreto para realizar a contenção (Figura 3.3).

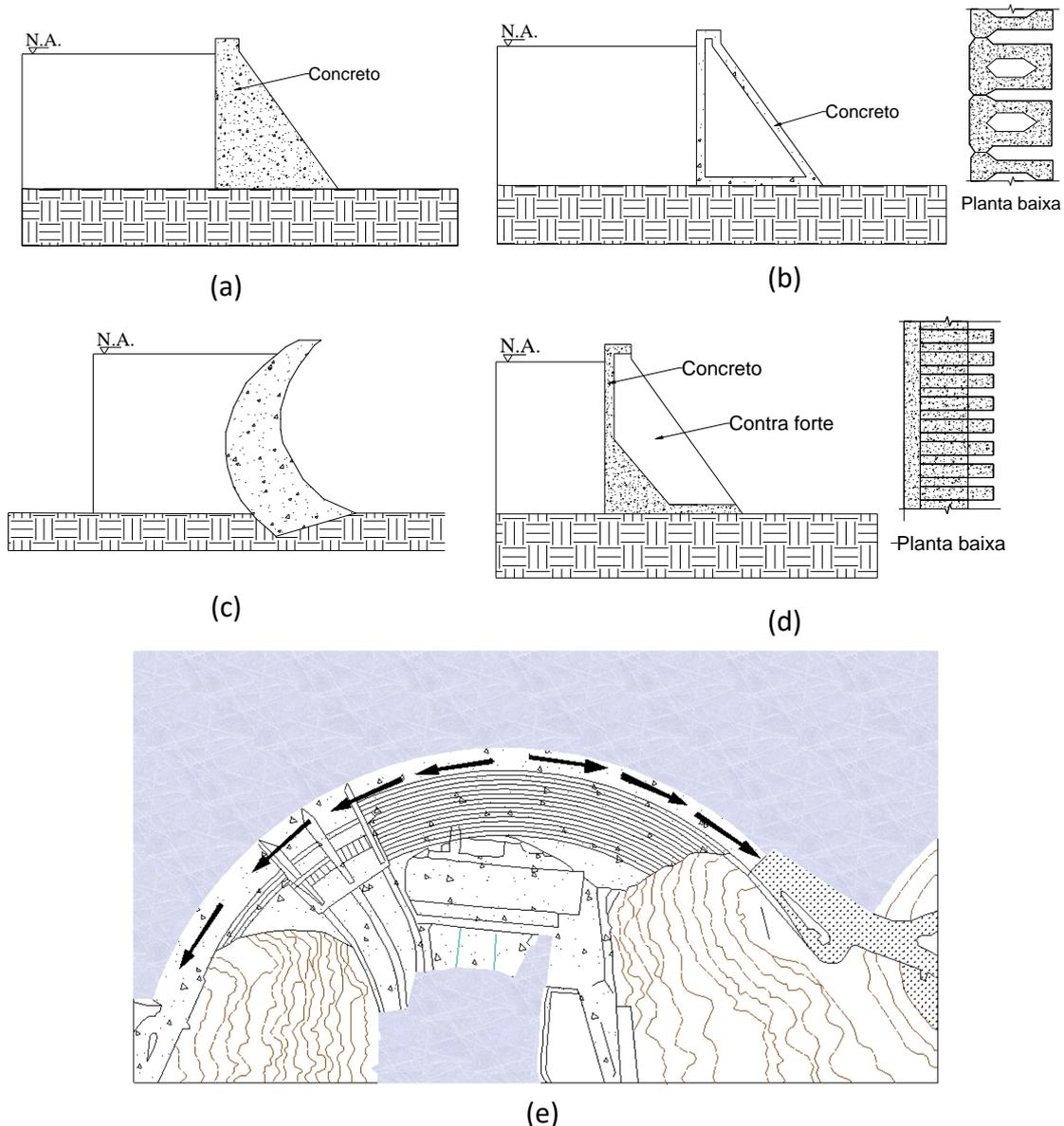


Figura 3.2 – Tipos de barragem quanto a geometria e tipo de material, (a) concreto de gravidade, (b) concreto de gravidade aliviada, (c) concreto arco simples, (d) concreto em contraforte e (e) concreto arco duplo (Fonte: Adaptado de COSTA, 2012).

Estas podem ser em barragem tipo gravidade, com uma forma trapezoidal do tipo gravidade (Figura 3.2 (a)), sendo desenvolvida para que só haja tensões de compressão em todo o seu corpo e que o elemento seja estabilizado pelo seu próprio peso, sendo uma seção trapezoidal cheia. Mas, para economia de material é possível realizar a seção vazada, denominando-a de barragem de concreto aliviada (Figura 3.2 (b)). Há também a possibilidade de criar uma barragem de concreto com contraforte, onde o seu peso será reduzido e sua rigidez amplificada (Figura 3.2 (d)).

Com o material em concreto é possível criar outras geometrias além do trapézio que melhoram a sua performance e são utilizadas em obras de maior vulto, que são as barragens

de concreto em abóbada, em arco simples, arcos múltiplos ou dupla curvatura, respectivamente, Figura 3.2 (c) e (e).

A combinação de barragens de concreto, terra e de enrocamento também é muito comum, sendo que em uma mesma barreira de contenção haverá regiões específicas com cada tipologia, denominando-as como barragens mistas. Outras barragens que podem ser utilizadas são as barragens não convencionais, que é a barragem tipo gabião, de madeira e a alvenaria em pedra.

As barragens, geralmente, criam desníveis entre os leitos dos rios e a navegação fica interrompida. Desta forma, quando a navegação é importante na região é necessário criar um elemento capaz de realizar a mudança do nível, que é a estrutura de eclusa (SWAMEE, 1992). É gerado um canal, com duas paredes de concreto e duas comportas de aço móveis, que tornam o canal um reservatório, conhecido como câmara, e que faz a variação de nível com a reserva de volume de água, o esquema de eclusas pode ser visto na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Estruturas de eclusa de Tucuruí (Fonte: Adaptado de NEVES, 2014).

As eclusas podem ser em câmara simples (Figura 3.3), tipo escada, câmaras múltiplas ou eclusas geminadas (SILVA, 2012). A escolha do tipo de eclusa dependerá do seu uso e do tráfego na mesma. Também podem ser classificadas em eclusas em baixa queda, responsáveis por vencer desníveis de até 10 m, em média queda (desníveis de 10 m a 15 m) e de alta queda, que corresponde a desníveis de mais de 15 m (UNITED STATE AMERICA, 1995). A seção transversal destes elementos depende do tipo de solo do local e da variação do nível d'água na mesma, para exemplificar veja as seções das eclusas de Tucuruí (Figura 3.4).

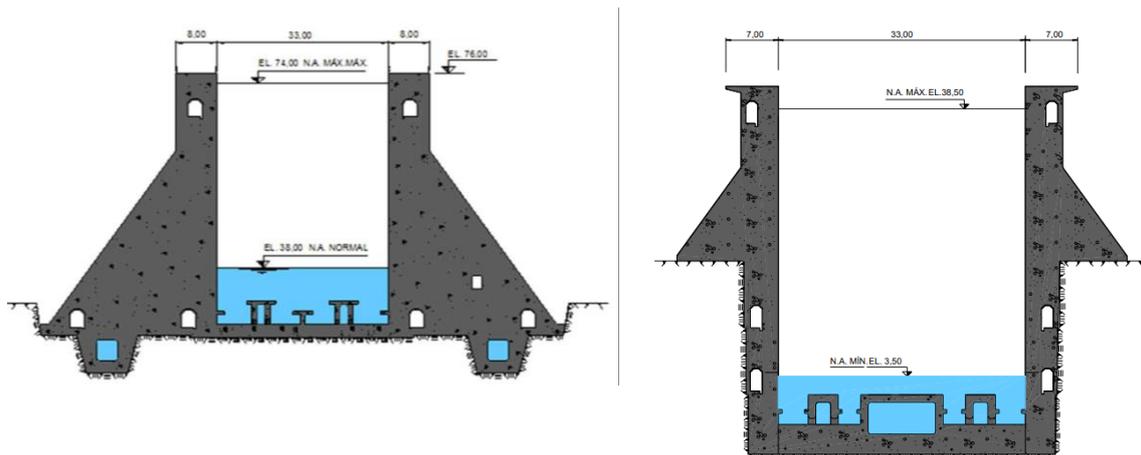


Figura 3.4 –Seção transversal das estruturas da parede de concreto da eclusa de Tucuruí (a) eclusa à jusante e (b) eclusa à montante (Fonte: LIMA, 2014).

Como pode ser visto na Figura 3.4, o formato das paredes de concreto para a delimitação da câmara depende do nível d'água necessário e do perfil de solo. Destacado os principais tipos de obras especiais, nos resta estudar e avaliar quais os principais elementos constituintes para que seja possível a sua construção, execução e manutenção. Estes aspectos serão apresentados no próximo tópico.

3.3. ELEMENTOS CONSTITUINTES DAS BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO

O conjunto de partes que estão em sintonia com a construção há a denominação de alguns elementos constituintes (Figura 3.5).

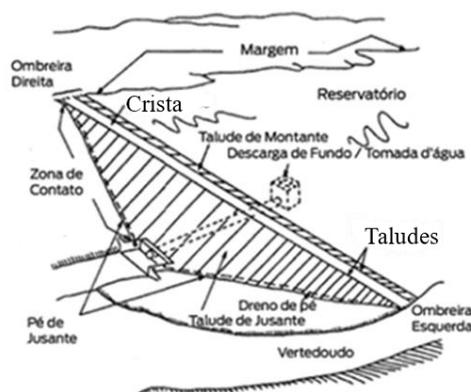


Figura 3.5 – Elementos de uma barragem (Fonte: Adaptado de COUTO, 2019).

Em si, pode se perceber que a estrutura de barragem se constitui da crista e dos taludes. Mas há os elementos de interligação entre a estrutura de barramento e o terreno natural, na cota mais alta da barragem denomina-se como ombreira. Há também a fundação da barragem, que são zonas de contato entre a estrutura e o solo natural em todo o comprimento da

barragem (zona de contato). O tipo dessa ligação influencia na condição de contorno dos elementos e conseqüentemente na deformação e tensões na estrutura de barragem. Mas essa consideração depende muito do tipo de solo e rocha no local da instalação da barragem.

Deve existir uma tomada d'água para o uso que a barragem se destina e para manter o ciclo natural de água a jusante da barragem. É necessário que haja um vertedouro para extravasar o volume de água, bem como o uso de drenos, como podemos verificar o dreno de pé (Figura 3.5) e os drenos já apresentados nos tipos de barragens (Figura 3.1 e Figura 3.2).

Já as estruturas de eclusas normalmente são anexas a barragem e funcionam como uma câmara para a variação do nível do seu reservatório e a elevação dos elementos navegáveis. Mas para o funcionamento de uma eclusa com câmara simples é necessário a construção de duas paredes paralelas em concreto e duas comportas que estejam ortogonalmente as paredes, essas comportas são móveis e normalmente desenvolvidas em estruturas de aço (Figura 3.6). Outro elemento importante são os muros guias, deve existir um à jusante e um à montante, para direcionamento das embarcações.

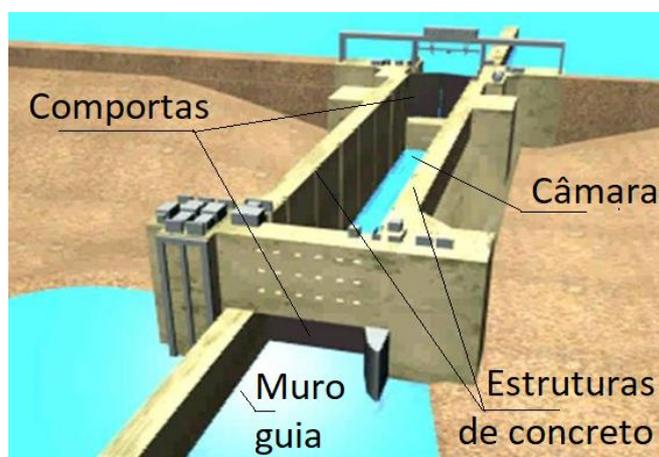


Figura 3.6 – Elementos de uma eclusa (Fonte: Adaptado de NEVES, 2014).

A câmara da eclusa deve ter dimensões que suportem as dimensões das embarcações da hidrovia, para definir a sua dimensão é interessante saber a demanda da navegação no curso d'água. Para a construção das eclusas é necessário ter a tomada d'água, o bloco de enchimento e o bloco de esvaziamento interligados a câmara, para realizar a variação hidráulica necessária, destacando que não há nenhum gasto energético para a variação deste nível. Visto os principais elementos das barragens e eclusas será destacado as principais ações atuantes no tópico a seguir.

3.4. AÇÕES ATUANTES EM BARRAGENS E ECLUSAS

As estruturas de barragens e eclusas estão sujeitas, durante sua vida útil, principalmente as cargas estáticas, sendo os esforços permanentes de seu peso próprio e das ações do material de armazenamento, no caso as pressões hidrostáticas dos líquidos, as maiores cargas. As ações variáveis nessas estruturas podem ser de sobrecargas acidentais na crista ou similares. Nessas estruturas, as ações excepcionais precisam ser verificadas para que não haja a perda de segurança, pois um incidente neste elemento é um grande prejuízo econômico e ambiental. A maioria das ações excepcionais que as estruturas especiais podem estar submetidas são ações dinâmicas, objeto de estudo neste trabalho. Então faz-se necessário destacar algumas das cargas estáticas.

3.4.1. Ações Estáticas

As ações estáticas a serem consideradas nas barreiras pode ser visualizada na Figura 3.7. Uma delas é o seu peso próprio (P_p), que irá depender de qual material será constituído e da sua geometria de seção transversal para posicionar o centro de gravidade do material e o seu peso resultante. Nas barragens do tipo gravidade a posição do centro de gravidade é muito importante para garantir a estabilidade estrutural. A ação de peso permanente que há devido ao volume de fluido que fica sobre o talude a jusante é uma ação vertical que também pode auxiliar na estabilidade ($E_{j,v}$).

Outra ação estática é a pressão hidrostática, que é o empuxo a jusante ($E_{j,h}$) e a montante ($E_{m,h}$), eles estão diretamente relacionados à altura da lâmina de fluido e ao seu peso específico. Outra ação que pode ocorrer é a subpressão na fundação da barragem devido o fluxo d'água que possui valor igual a pressão hidrostática, mas ocorre no sentido vertical na barragem (S_m e S_j) sendo primordial para a análise de estabilidade. A forma que a subpressão está apresentada na Figura 3.7 é o comportamento desta ação depende das condições do sistema de drenagem na fundação da barragem.

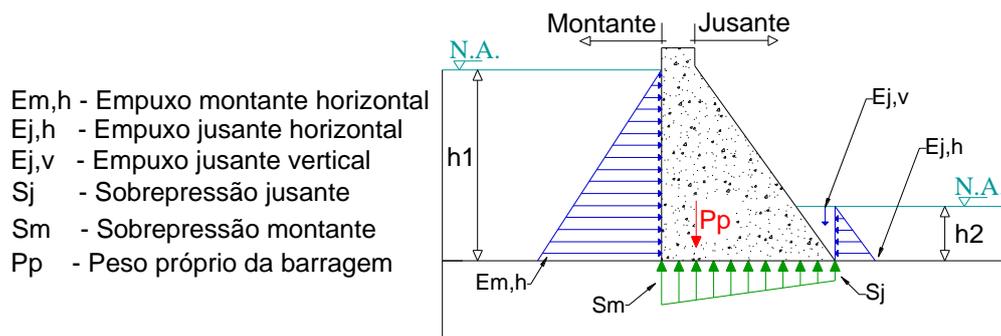


Figura 3.7 – Ações estáticas em barragem.

Outras ações que devem ser consideradas é a pressão criada pelos sedimentos que podem se depositar a montante e a jusante, adicionando assim uma ação triangular dependente da altura e do peso específico deste material. Há também a necessidade de avaliar os esforços gerados pela mudança de temperatura que gera novas tensões no elemento de barramento.

Já nas eclusas as ações estáticas atuantes são as mesmas, o que muda é apenas a seção para cálculo do peso próprio dos elementos. As pressões hidrostáticas apresentam uma variação de altura efetiva conforme o funcionamento do sistema elevatório, então a pressão hidrostática passa a ser variável no sistema nas paredes de concreto, hora está com a intensidade máxima, outra hora está menor. Outro fato é que há uma sobrecarga nas paredes da estrutura que se relaciona com o peso da embarcação e a relação entre a área da câmara da eclusa e das embarcações (FINGER et al, 2012).

3.5. ESTABILIDADE GLOBAL E VERIFICAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE BARRAGENS

Inicialmente ao projeto deve-se avaliar quais as ações atuantes na estrutura e, posteriormente, avaliar a sua estabilidade. Se a barragem for do tipo gravidade, espera-se que a sua geometria ofereça um peso que equilibre todos os deslocamentos que as demais ações tendem a causar. Outro fato que é possível aplicar nessa análise é que as barragens podem ser estudadas no estado plano de deformações, avaliando apenas uma seção transversal do barramento, com uma largura unitária, para garantir o equilíbrio do mesmo, sendo a ação resultante deste volume de esforços considerada (RIBEIRO et al, 2007).

Os tipos de instabilidade que as barragens estão comumente submetidas e que devem ser atendidas para que haja estabilidade global, segundo a NBR 13028/2017, são a flutuação, ao

tombamento, ao deslizamento e a tensão admissível. Devendo ainda garantir um fator de segurança específico na mesma. A flutuação é o equilíbrio, com um fator de segurança, entre as ações gravitacionais atuantes e a subpressão existente no nível de fundação do elemento. Já a segurança ao tombamento deve ser verificada com o equilíbrio entre os momentos de tombamento e os estabilizantes em relação a qualquer ponto da estrutura.

Já a avaliação de deslizamento deve ser realizada considerando o equilíbrio das ações cisalhantes na estrutura, que são as ações horizontais na mesma. Sob o aspecto de tensão admissível é necessário verificar que não haverá tensões de tração na estrutura, pois as barragens de gravidade funcionam basicamente a compressão.

Todas essas análises devem ser realizadas em combinações oportunas para a estrutura, como condição de carregamento normal de uso (CCN), onde o volume armazenado de água está no seu limite normal de uso. Também há a condição de carregamento limite (CCL), que será a verificação quanto a estabilidade caso algum item de segurança da estrutura venha a falhar ou haja uma enchente, sendo que neste caso há uma baixa de probabilidade de ocorrência deste carregamento. Outro aspecto é a verificação do equilíbrio e estabilidade com a condição de carregamento de construção (CCC) da mesma, avaliando se haverá alguma outra ação atuante provinda do processo de construção. E por fim, mas não menos importante, avaliar as condições de carregamento excepcionais (CCE) de ação que pode ocorrer na estrutura, sendo por exemplo um efeito de sismo na estrutura da barragem.

Todavia, devido a importância e aos danos que a ruptura da barragem pode causar, se faz necessário realizar o monitoramento através de coleta de deslocamento vertical e horizontal da barragem, através de um monitoramento e análise de integridade dos elementos.

As entidades que regem essas verificações e garantem a segurança das estruturas são a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), o *International Commission on Large Dams* CIBG/ICOLD. Não há normas específicas brasileira para realizar o seu projeto, mas há recomendações da Eletrobrás (2013), do Comitê Brasileiro de Barragens (CBB) e da Agência nacional de águas (ANA). A ANA também apresenta anualmente um relatório de segurança das barragens brasileiras, envolvendo nele todos os tipos de barragens no Brasil e classificando-as quanto ao risco que podem apresentar. No próximo tópico serão destacadas as principais barragens e eclusas brasileiras.

3.6. BARRAGENS E ECLUSAS DE CONCRETO NO BRASIL

Segundo o relatório de segurança de barragens, que faz parte do Plano Nacional de Segurança em Barragens (PNSB), elaborado pela ANA em 2020, 6% das barragens são construídas em concreto convencional e 2% em concreto compactado a rolo, desta forma 8% das barragens que são acompanhadas pelo PNSB são construídas com material tipo concreto. Apenas 10% dessas barragens superam a altura de 30 metros, 18% possuem altura indeterminada e os 72% restante possuem altura inferior a 30 m. A seguir serão destacadas algumas informações sobre as principais barragens de concreto brasileiras.

3.6.1. Barragem e Eclusa de Itaipu

A barragem de Itaipu é binacional devido a parte da sua área represada ficar no Paraguai, sendo a maior hidrelétrica do mundo. Já chegou a gerar 103098366 MWh anualmente, para isso a barragem tem 7919 m de extensão e uma altura de 196 m. Na Figura 3.8 é apresentado o esquema de barragens desta usina.

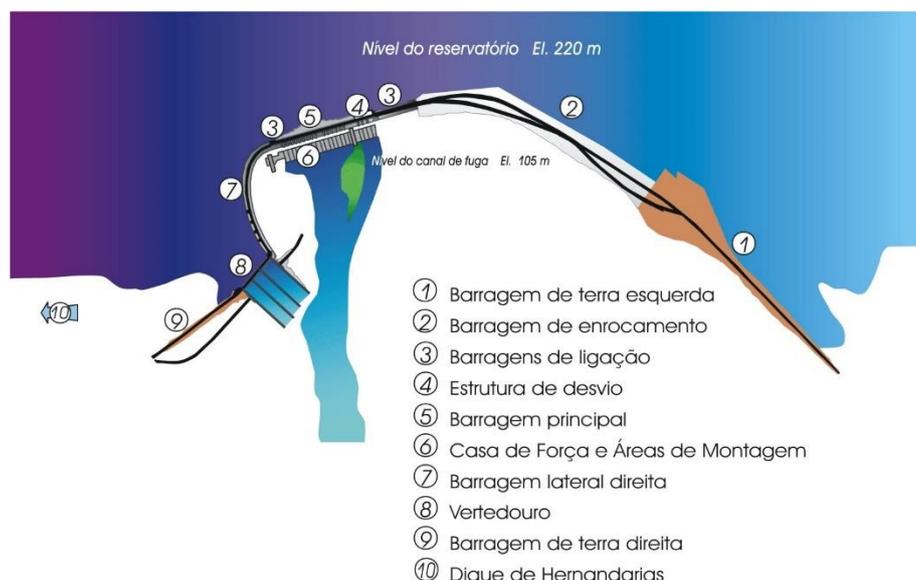


Figura 3.8 – Barragem de Itaipu. (Fonte: ITAIPU, [s.a.]).

Devido a sua extensão é necessário utilizar diferentes tipos de barragem para que seja viável economicamente a sua execução, como pode ser visto na Figura 3.8. Ao longo do comprimento da crista da barragem há 998 m de seção em contraforte (Figura 3.9), com altura máxima de 64,5 m na lateral direita. A barragem principal (5) e os blocos de ligação (3) possuem um comprimento de 1064 m e altura máxima de 196 m, sendo sua seção do tipo gravidade aliviada e de contrafortes. Já a estrutura de desvio (4) é em concreto tipo

gravidade, possuindo uma extensão de crista de 170 m e altura máxima de 162 m. As barragens de terra e enrocamento totalizam um comprimento de crista de 5325 m (ITAIPU, [s.a.]).

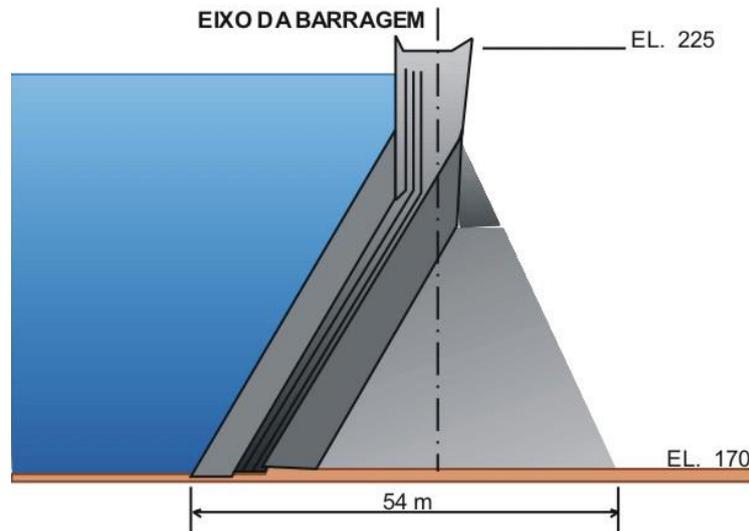


Figura 3.9 – Barragem de Itaipu seção transversal da lateral direita, seção em contraforte. (Fonte: ITAIPU, [s.a.]).

No total houve o consumo de 12600000 m³ de concreto e estrutural com refrigeração e ainda 25000 m³ de concreto compactado a rolo para a execução da barragem de Itaipu. Tudo isso gasto rapidamente para a construção da barragem.

3.6.2. Barragem e Eclusa de Tucuruí

A barragem de Tucuruí (Figura 3.10) faz parte do plano de desenvolvimento do norte do país, e começou a ser construída em 1975, mas o planejamento de construção era que ela fosse feita em duas etapas, para ampliar o seu nível de produção elétrica. No período de sua construção, o consumo de concreto foi o maior já aplicado em usinas nacionais brasileiras. O projeto final previa atingir uma altura máxima de 108 m, com a cota da crista a 78 m e o comprimento total 629 m até atingir as suas ombreiras (GAMA et al, 2006). Como a construção é grande linearmente, normalmente é realizado o barramento com diferentes tipos de materiais, sendo que só o vão mais alto há necessidade de a seção ser em concreto (GAMA et al, 2006).

A construção de todo o barramento tem aproximadamente 6 km de extensão, chegando a atingir 78 m de altura. Garante uma produção energética de 8370 MW, alagando uma área

de aproximadamente 2785 km² e um volume total de 50290 Mm³. A seção transversal típica de um dos blocos da barragem de Tucuruí pode ser vista na Figura 3.11. Não foi disponibilizado as dimensões da barragem, mas é possível perceber a sua seção trapezoidal com talude inclinado à montante e à jusante.



Figura 3.10 – Barragem de Tucuruí (Fonte: GAMA et al, 2006).

Devido a importância hidroviária para escoamento de produtos, no projeto havia a previsão de construção de uma eclusa de Tucuruí (Figura 3.12), que permite a navegação entre Belém (PA) e Marabá (PA), tendo um desnível total de 72 m dividido em duas eclusas com um canal intermediário de 5,5 km de extensão. Cada eclusa possui uma câmara de 210 m de comprimento e 33 m de largura, sendo que a eclusa a montante transpõe um desnível de 37 m e a eclusa a jusante (canal de navegação e Rio Tocantins) é responsável por um desnível de 35 m.

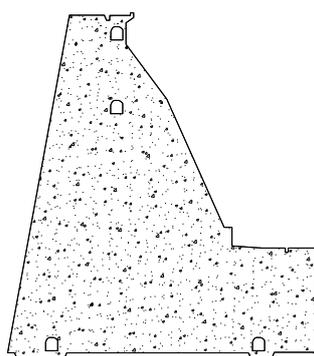


Figura 3.11 –Seção transversal do bloco BG12 da Barragem de Tucuruí (Fonte: Adaptado de ALVES e SAMPAIO, 2007).

O início da sua construção se deu entre 1982 e 1989, ficando a obra parada até meados de 2006, onde os projetos foram atualizados, houve uma nova ordem de serviço e reiniciou as obras das eclusas, tendo a sua inauguração em 2010 . Segundo Lima (2014), para a execução

das eclusas trabalhou-se com concretos que variam de 7,5 MPa a 30 MPa, dependente da sua posição de uso.



Figura 3.12 – Eclusa de Tucuruí (Fonte: LIMA, 2014).

3.6.3. Eclusa de Sobradinho - BA

O reservatório de Sobradinho – BA possui uma capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos, recebendo o título de maior lago artificial do mundo devido a este volume. Para garantir este volume há um desnível de 32,5 m na barragem de terra zoneada, o que impediria a navegação no Rio São Francisco entre as cidades de Pirapora – MG a Juazeiro – BA, assim foi inaugurado em 1979 a eclusa de Sobradinho (Figura 3.13) nessa barragem permanecendo em operação por 39 anos, até a paralização desta para manutenção e retomada de atividade em 2021 (DNIT, 2021).



Figura 3.13 – Eclusa de Sobradinho (Fonte: DNIT, 2021).

A principal finalidade do transporte hidroviário que passa na eclusa de Sobradinho é a interligação entre o centro-sul e o nordeste do Brasil, servindo de caminho para o escoamento de produtos agrícolas de modo multimodal, além da sua função turística. Para realizar essa transposição, a eclusa contém uma câmara que possui dimensões de 120 m de comprimento, 17 m de largura para vencer o desnível de 32,50m.

3.6.4. Eclusa de Jupiá

A eclusa de Jupiá (Figura 3.14) foi inaugurada em 1998 e está localizada no município de Três Lagoas (MS), na divisa dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, no Rio Paraná. Essa construção está junto a barragem hidrelétrica Engenheiro Souza Dias e possui um desnível máximo de 26 m, com um comprimento da câmara de 210 m por 17 m de largura.



Figura 3.14 – Eclusa de Jupiá (Fonte: CTG Brasil, 2018).

3.6.5. Eclusa de Três Irmãos

A eclusa de três irmãos (Figura 3.15) realiza a transposição da barragem de mesmo nome, localizada no rio Tietê, no município de Pereira Barreto (SP). Devido ao desnível de transposição, cerca de 50 m, foi necessário a construção de duas câmaras de eclusas distantes em 926 m, sendo que a primeira eclusa vence um desnível de 24,3 m e a segunda um desnível de 25,5 m. A largura da câmara é de 12,10 m e seu comprimento de 142 m (DNIT, 2018). Outro ponto de destaque para essa eclusa é que ela atende a UHE de Três Irmãos e a UHE de Ilha Solteira, tornando navegável o Rio Paraná. Isso é possível devido ao canal Pereira Barreto que interliga as duas usinas.

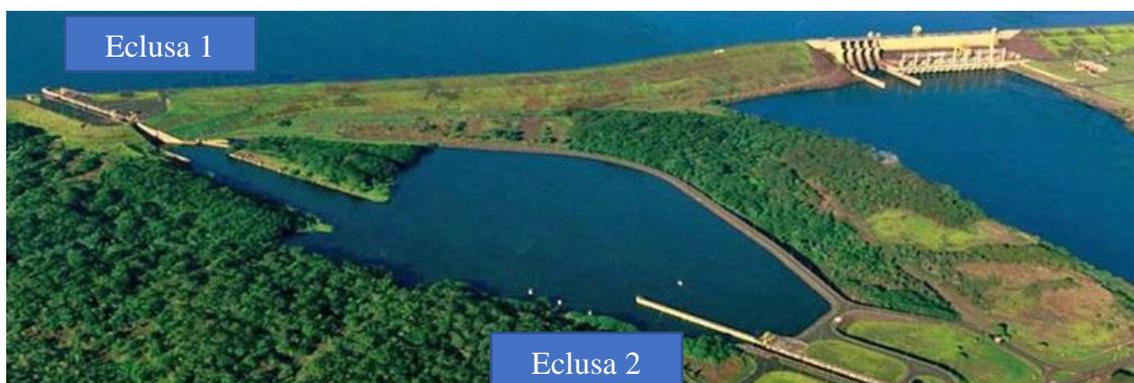


Figura 3.15 – Eclusa de Três Irmãos (Fonte: Adaptado de DNIT, 2020).

3.6.6. Demais Eclusas no Brasil

No total, 8 eclusas brasileiras estão sobre jurisdição do DNIT, sendo que as mais altas foram destacadas aqui. Mas, na Tabela 3.1, há uma lista com outras eclusas e suas dimensões.

Tabela 3.1– Eclusas Brasileiras.

| Rio | Barragens | UF | Câmaras | Comprimento útil (m) | Largura útil (m) | Desnível máximo (m) |
|---------|-------------------|----|---------|----------------------|------------------|---------------------|
| Tietê | Barra Bonita | SP | 1 | 142 | 12 | 25 |
| Tietê | Bariri | SP | 1 | 142 | 12 | 24 |
| Tietê | Ibitinga | SP | 1 | 142 | 12 | 23 |
| Tietê | Promissão | SP | 1 | 142 | 12 | 27 |
| Tietê | N. Avanhandava | SP | 2 | 142 | 12 | 32,6 |
| Paraná | Porto Primavera | SP | 1 | 210 | 17 | 23 |
| Jacuí | Fandango | RS | 1 | 85 | 15 | 4 |
| Jacuí | Anel de Dom Marco | RS | 1 | 120 | 17 | 7,10 |
| Taquarí | Bom Retiro do Sul | RS | 1 | 120 | 17 | 11,8 |
| Jacuí | Amarópolis | RS | 1 | 120 | 17 | 5 |

(Fonte: Adaptado de DNIT, 2018 e DEPARTAMENTO HIDROVIÁRIO SP, S.A.)

Como pode ser visto do levantamento de eclusas no país, a maioria encontra-se no sul e no sudeste do país (Tabela 3.1). Das 8 eclusas sob responsabilidade do DNIT, 4 estão no estado do Rio Grande do Sul, 2 no estado de São Paulo, 1 no estado do Pará e 1 na Bahia (DNIT, 2018). Existem outras barragens e eclusas que possuem a extensão da crista parcialmente executadas em seção de concreto, sendo que principalmente a região das turbinas e os vertedouros são executados em concreto. Mas, visto que iremos estudar barragens que não são brasileiras, houve apenas uma contextualização para este estudo.

3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Agora, sabendo os principais tipos de barragens e eclusas, as ações que estão submetidas e alguns exemplos de construções brasileiras foi possível compreender o contexto em que se aplica este trabalho. Desta forma, os estudos para abordar estes casos reais são apresentados buscando atender alguns aspectos dinâmicos que podem ocorrer na estrutura. O próximo capítulo apresenta a formulação analítica simplificada para obter as características dinâmicas em barragens ou eclusas de concreto gravidade.

4. FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA O DOMÍNIO ESTRUTURAL

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as formulações teóricas que foram empregadas para análise das vibrações de estruturas no vácuo e que, posteriormente, também são utilizadas na análise acoplada fluido-estrutura. A metodologia analítica simplificada proposto neste trabalho é discorrida, sendo apresentados modelos simplificados de um grau de liberdade que são usados para obter as características dinâmicas em vibrações livres de estruturas de barragens.

4.2. ESTRUTURA DE BARRAGEM FLEXÍVEL

Nesta formulação, o procedimento analítico proposta parte do princípio de que qualquer estrutura de barragem pode ser modelada como uma viga engastada-livre avaliando uma faixa de largura L de $1m$ da estrutura em relação a todo comprimento da barragem, ou seja, a complexidade do problema tridimensional (3D) da barragem passa para uma análise bidimensional (2D) em estado plano e que pode ser representado por uma viga e, por fim, com uso de parâmetros generalizados se resume a um sistema de um grau de liberdade. A situação é descrita na Figura 4.1.

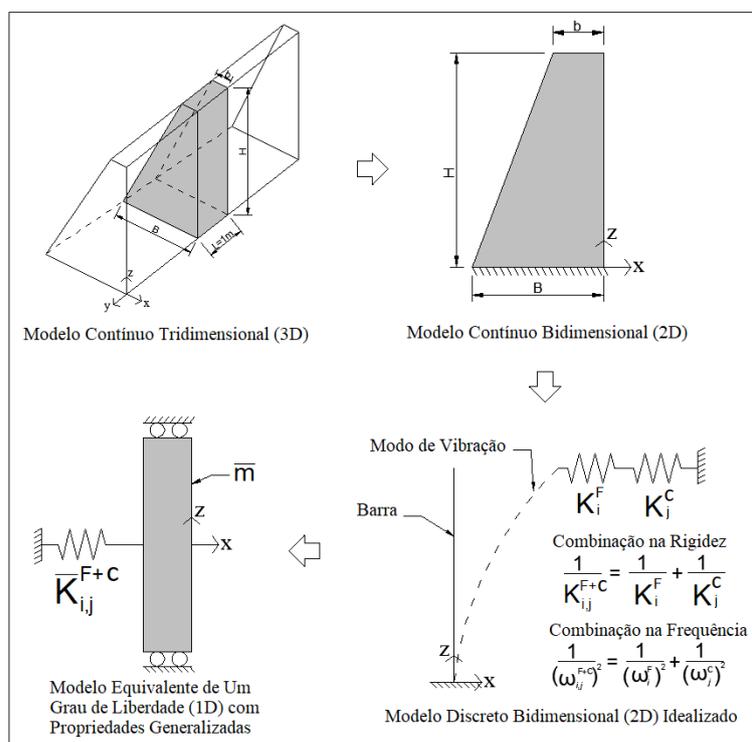


Figura 4.1: Metodologia de cálculo assumida no modelo analítico simplificado.

A partir da Figura 4.1 é possível observar que a estrutura tridimensional é simplificada no estado plano bidimensional e, em seguida, é representada por uma barra engastada-livre. A barra possui a parcela de rigidez flexional (\bar{K}_i^F) e cisalhante (\bar{K}_j^C). Assim, os parâmetros da barra são transformados em parâmetros generalizados, ou seja, em um sistema equivalente com deslocamento rígido-móvel com rigidez flexional e cisalhante combinadas ($\bar{K}_{i,j}^{F+C}$).

Para isso, a formulação analítica proposta para barragem é baseada na formulação variacional (energética) tendo por base um problema de vigas esbeltas (Vigas de Euler-Bernoulli) quando avaliada o efeito da flexão e, concomitante a isso, o uso da formulação de Cowper (1966) para o efeito do cisalhamento isoladamente. A partir dos dois efeitos, pode-se compor as frequências de flexão (ω_i^F) e cisalhamento (ω_j^C) pela analogia de molas em série, possibilitando a obtenção dos efeitos combinados ($\omega_{i,j}^{F+C}$) em vigas espessas (Vigas de Timoshenko) que reproduzem o efeito da barragem. Os tópicos a seguir apresentam a metodologia simplificada proposta.

4.2.1. Vibrações Flexionais

A formulação analítica para determinar as características vibratórias flexionais em uma barragem é feita inicialmente através de uma analogia a um problema de viga esbelta baseada na formulação variacional, uma vez que esta proporciona abordar analiticamente problemas mais complexos de uma forma mais simples, onde a manipulação algébrica é mais facilmente discorrida.

Um sistema contínuo de uma barragem pode ser aproximado por um sistema de um grau de liberdade assumindo um modelo aproximado de deflexão de uma viga. Quanto mais próximo o modelo é da forma exata, a resposta converge para solução exata. Assim, a transformação do sistema contínuo para um sistema de um grau de liberdade é feita através da rigidez generalizada a flexão (k_e^*) e a massa generalizada (m_e^*), ambas no domínio da frequência, apresentadas por Clough (2003), Pedroso (2003) e tantos outros, expressas por:

$$k_e^* = \int_0^H EI(z) \left[\frac{\partial^2 \varphi(z)}{\partial z^2} \right]^2 dz \quad (4.1)$$

$$m_e^* = \int_0^H m(z) \varphi(z)^2 dz \quad (4.2)$$

Onde k_e^* é a rigidez generalizada, m_e^* a massa generalizada, H é a altura da barragem, $\varphi(z)$ é a deformada modal (modos de vibração) da estrutura, $EI(z)$ é a rigidez a flexão que pode ser constante ou variável na direção z , composta pelo produto entre o momento de inércia $I(z)$ da seção transversal e o módulo de elasticidade do material (E), ou seja, da rigidez a flexão $EI(z)$.

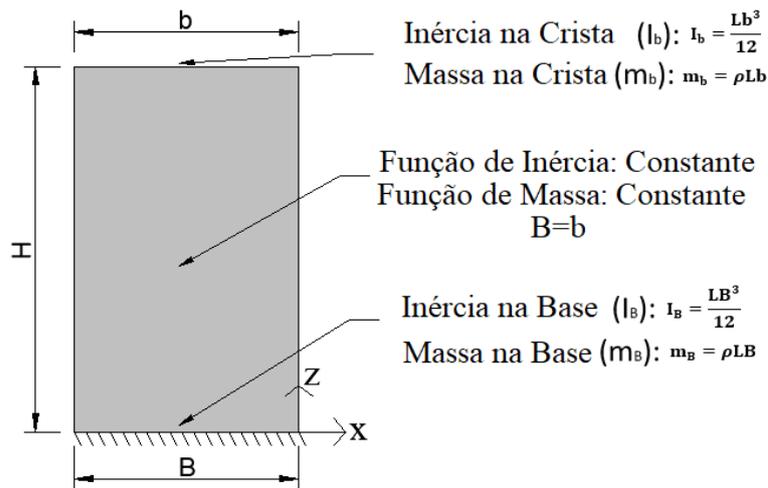
Qualquer deformada modal pode ser aplicado e transformado em parâmetros generalizados. As deformadas modais flexionais de uma viga com condição de contorno engastada-livre foram assumidos neste trabalho e podem ser encontradas em Blevins (1979), sendo expressa respectivamente por:

$$\varphi(z) = \bar{A} \left\{ \cosh\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \cos\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \sigma_i \left[\sinh\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \sin\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) \right] \right\} \quad (4.3)$$

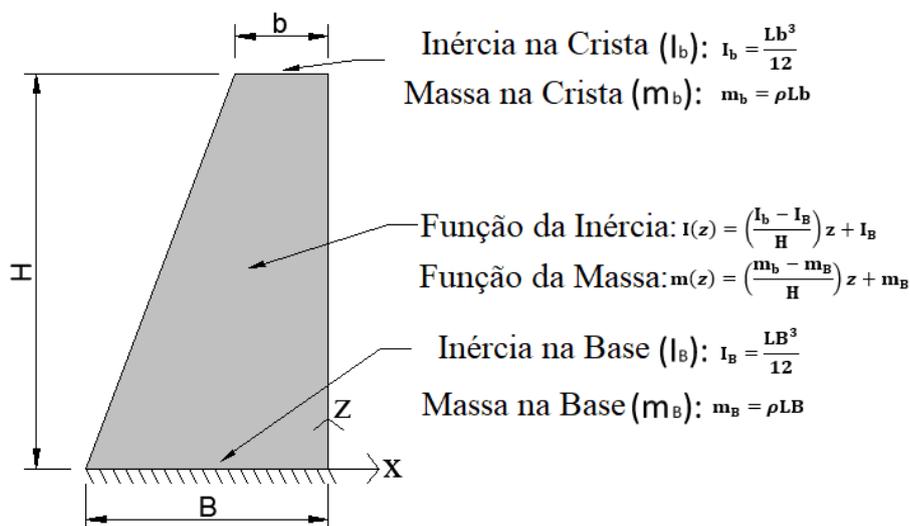
Onde \bar{A} é uma constante que expõe a amplitude dos modos de vibração, α_i e σ_i são coeficientes que dependem da ordem do modo de vibração avaliado ($i = 1, 2, 3$, etc). Os coeficientes para a condição de contorno estudada (engastada-livre) foram obtidos em acordo com Blevins (1979), sendo que para o primeiro modo de vibração foi assumido os valores de $\alpha_i = 1,87510407$ e $\sigma_i = 0,734095514$.

Vale ressaltar que o estudo do primeiro modo está atrelado ao fato da primeira frequência fundamental da estrutura de barragem ser de grande interesse prático, além do mais, será visto adiante neste trabalho que o primeiro modo de vibração fundamental acoplado fluido-estrutura é necessariamente um modo de massa adicional, então o estudo da primeira frequência é de extrema importante na análise desacoplada e acoplada em barragens.

Após a adoção do modo de vibração citado, para representar analiticamente a geometria da estrutura e contabilizar o efeito da variação do momento de inércia $I(z)$ e da massa da estrutura $m(z)$ é possível aplicar funções matemáticas lineares, que captam as variações citadas nas características da estrutura e podem ser incorporadas nas Equações (4.1) e (4.2). Isso transforma a estrutura deformável com variação de rigidez e massa em um único sistema de um grau de liberdade com parâmetros generalizados. Abordagens de diferentes geometrias e suas funções que aproximam a massa e a inércia a flexão são indicadas abaixo, em que I_b e I_B são os momentos de inércia a flexão na crista e na base, m_b e m_B são as massas por unidade de comprimento na base e na crista, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 4.2: Representação da geometria: (a) barragem com inércia constante da base a crista e (b) barragem com inércia variando linearmente da base a crista.

Na Figura 4.2, a primeira geometria (a) é do modelo de uma barragem com massa e inércia constante da base a crista. Nesta geometria, pode-se observar que devido a barragem possuir inércia constante, as dimensões da base (B) e da crista (b) são iguais e o valor da inércia em torno do eixo y de flexão e ao longo do altura da estrutura (eixo z) é constante, sendo calculados para uma seção retangular maciça em uma faixa de largura (L) igual de $L=1\text{ m}$ de barragem ($I_B = I_b = LB^3/12$).

A massa por unidade de comprimento, também referente a estrutura com inércia constante, é determinada na direção do eixo flexional de vibração da estrutura (eixo y) que é constante na direção da altura (eixo z) da barragem, podendo ser obtida através do produto da massa

específica do material da estrutura (ρ) pela largura unitária de $1m$ ($m_B = m_b = \rho Lb$). Nota-se que a dimensão da base (B) é igual da crista (b) e condiz ao mesmo valor de massa na base e na crista.

Por outro lado, na Figura 4.2, para a geometria em (b) pode-se observar que para a barragem com inércia variável a dimensão da base (B) e da crista (b) são diferentes e o valor da inércia em torno do eixo y de flexão e ao longo da altura da estrutura (eixo z) é variável. Os valores de momentos de inércia devem, inicialmente, ser calculados para a seção retangular maciça em uma faixa de $1m$ de barragem, tanto na base ($I_B = LB^3/12$) quanto na crista ($I_b = Lb^3/12$), e a variação ao longo da altura da estrutura obtida através de uma imposição de uma função linear $I(z) = [(I_b - I_B)/H].z + I_B$.

A massa por unidade de comprimento variável pode ser determinada através do produto da massa específica do material pela largura unitária de $L=1m$, tanto para a base ($m_B = \rho LB$) quanto para a crista ($m_b = \rho Lb$). Assim, de maneira análoga ao momento de inércia, a variação da massa na direção da altura (eixo z) também é obtida através de uma imposição de uma função linear $m(z) = [(m_b - m_B)/H].z + m_B$.

Uma vez dispondo das funções que refletem a variação da rigidez e da massa, tais regressões podem ser inseridas nas Equações (4.1) e (4.2) e calculada a rigidez e massa generalizada. Por fim, as frequências devido a parcela vibracional associada ao efeito da flexão (ω_i^F) podem ser obtidas pela equação geral de um sistema de um grau de liberdade, dada por um problema de autovalores e autovetores, expressa por:

$$\left(-m_e^* \omega_i^{F2} + k_e^*\right) x_e = 0 \quad (4.4)$$

Onde k_e^* é a rigidez generalizada, m_e^* a massa generalizada, ω_i^F é a frequência natural associada ao efeito da flexão e x_e é o autovetor que representa o deslocamento da estrutura. A raiz da Equação (4.4) traz a frequência oriunda do modo assumido no sistema generalizado e associada ao efeito da flexão (ω_i^F), dada por:

$$\omega_i^F = \sqrt{\frac{k_e^*}{m_e^*}} \quad (4.5)$$

Onde k_e^* é a rigidez generalizada, m_e^* a massa generalizada e ω_i^F é a frequência natural devido a parcela vibracional associada ao efeito da flexão. Estruturas esbeltas, bem como dispostas de qualquer geometria que respeite a variação linear de inércia e massa pode ser representada por esta metodologia. Entretanto, vale ressaltar que em estruturas espessas, que é o caso da geometria de barragens, o efeito do cisalhamento deve ser incorporado na análise, conforme descrito no item abaixo.

4.2.2. Vibrações Cisalhantes

A formulação analítica para determinar as características vibratórias cisalhantes em vigas com condição de contorno engastada-livre é baseada na formulação apresentada por Cowper (1966). O efeito do cisalhamento através da formulação desenvolvida por Cowper (1966) independe do efeito a variação da inércia na seção transversal da estrutura, necessitando apenas do comprimento (altura da barragem), sendo um diferencial prático para contabilizar a parcela do cisalhamento na análise que podem ser aplicadas em barragens. As frequências naturais cisalhantes (ω_j^C) são dadas por:

$$\omega_j^C = \frac{\chi_j}{2\pi H} \sqrt{\frac{\mu G}{\rho}} \quad (4.6)$$

Onde χ_j é um coeficiente adimensional que expressa a ordem dos modos de vibração de cisalhamento ($j=1, 2, 3$ etc...), H é altura da barragem (comprimento da barra), ρ é a massa específica do material, G é o módulo de elasticidade transversal do material e μ o coeficiente de cisalhamento que depende do tipo da seção transversal. Os parâmetros citados podem ser expressos por:

$$\chi_j = \frac{(2j-1)\pi}{2} \quad (4.7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.8)$$

$$\mu = \frac{10(1+\nu)}{12+11\nu} \quad (4.9)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson do material, E o módulo de elasticidade longitudinal e μ é o parâmetro da seção aplicado em seção retangular, que é o caso de barragens gravidade.

O modo de vibração associado ao efeito do cisalhamento para uma barra engastada-livre é expresso por:

$$\phi(z) = \text{sen} \left(\frac{\pi(2j-1)}{2H} z \right) \quad (4.10)$$

Onde $\phi(z)$ é o modo de vibração cisalhante da estrutura, j é a ordem do modo de cisalhamento e H é a altura (comprimento) da estrutura.

4.2.3. Vibrações Flexionais e Cisalhantes

A partir dos efeitos flexionais e cisalhantes desacoplados, pode-se compor as frequências (flexão e cisalhamento) pela analogia de molas em série, assumindo a soma das rigidezes e a mesma massa como efeito inercial vibração flexional e cisalhante. Com isto, a obtenção dos efeitos combinados em vigas espessas (Vigas de Timoshenko) reproduzem o efeito da barragem. A composição no espaço de frequências é encontrada em diversos trabalho, tais como Pedroso (2003), Pedroso (2006), Blevins (1979), Mendes (2019) e tantos outros.

Assim sendo, a partir das composições na rigidez de flexão e cisalhante que incorporam os efeitos da variação de inércia, a obtenção das frequências flexionais e cisalhantes combinadas ($\omega_{i,j}^{F+C}$) que é aplicada nas simulações de barragens é expressa por:

$$\frac{1}{(\omega_{i,j}^{F+C})^2} = \frac{1}{(\omega_i^F)^2} + \frac{1}{(\omega_j^C)^2} \quad (4.11)$$

Onde ω_i^F é a frequência de flexão, ω_j^C é a frequência de cisalhamento e $\omega_{i,j}^{F+C}$ é a frequência de flexão e cisalhamento combinadas. Para simular o efeito do primeiro modo fundamental de barragens e eclusas, que é um dos mais significativos e importantes na simulação nestas estruturas, deve-se, por exemplo, assumir modos flexionais e cisalhantes com $i=1$ e $j=1$ nos efeitos combinados.

Uma vez dispondo da frequência de flexão e cisalhamento combinadas ($\omega_{i,j}^{F+S}$) e da massa generalizada expressa pela Equação (4.2), além da frequência combinada, é possível também obter a rigidez generalizada combinada de flexão e cisalhamento ($\bar{K}_{i,j}^{F+C}$) dada por:

$$\bar{K}_{i,j}^{F+C} = m_e^* (\omega_{i,j}^{F+C})^2 \quad (4.12)$$

Onde $\omega_{i,j}^{F+C}$ é a frequência natural de flexão e cisalhamento combinadas, m_e^* a massa generalizada e $\bar{K}_{i,j}^{F+C}$ é a rigidez generalizada de flexão e cisalhamento. Tanto a massa generalizada quanto a rigidez generalizada contemplam o efeito flexional e cisalhante para um determinado modo de vibração da estrutura da barragem ou eclusa com inércia constante ou variável. A Figura 4.3 apresenta um esboço de uma deformada predominantemente de flexão e de cisalhamento.

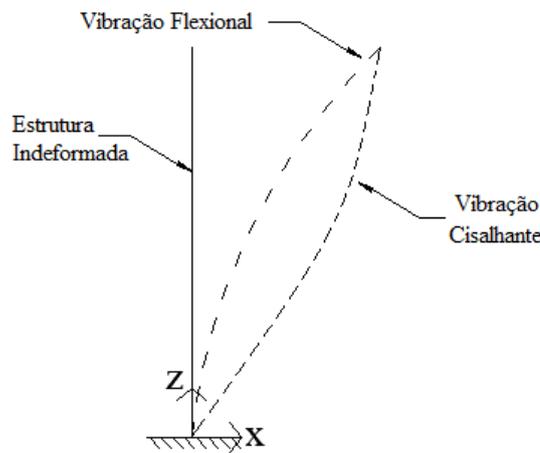


Figura 4.3: Esquema da deformada modal do 1º modo associada ao flexional e cisalhante em uma barra.

A partir da Figura 4.3 é possível observar que a vibração flexional está associada a uma deformada que deve ter rotação e deslocamento nulo no engaste. Assim, durante o efeito da vibração flexional as diversas seções transversais ao longo da altura da barra rotacionam e levam a uma máxima amplitude de deslocamento e rotação na região da extremidade livre da barra (crista da barragem). Na vibração cisalhante a deformada está associada ao deslocamento horizontal (direção x) das seções transversais, então o deslocamento é nulo no engaste e máximo na extremidade da barra (crista da barragem).

Por fim, posteriormente no capítulo 6 ao analisar o problema acoplado fluido-estrutura, a flexibilidade da estrutura é incorporada no sistema de um grau de liberdade através desta metodologia apresentada.

4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados a formulação matemática para a análise da estrutura desacoplada. A metodologia proposta é de simples resolução e fácil implementação. Neste trabalho, a formulação foi implementada no *software* MAPLE®. As equações e metodologia proposta é validada no capítulo 10 com a análise dos resultados, demonstrando ter um bom potencial para a determinação da frequência fundamental em estruturas de barragens com inércia constante ou linearmente variável.

5. FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA DOMÍNIO DO FLUIDO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as formulações teóricas que foram empregadas para análise das vibrações da cavidade acústica (fluido desacoplado) e, posteriormente, também utilizadas na análise acoplada fluido-estrutura.

Inicialmente, para as pressões impulsivas, é apresentada a equação da onda acústica em meio fluido unidimensional, bem como a composição no espaço de frequências para análise de cavidades bidimensionais e tridimensionais. Posteriormente, é apresentada a equação através dos métodos de energia (formulação energética) para a análise da cavidade acústica unidimensional, bidimensional ou tridimensional. A formulação por métodos de energia é a base para, posteriormente, realizar o desenvolvimento da metodologia de cálculo acoplada fluido-estrutura.

Em ambas as formulações analíticas, o fluido é assumido invíscido (não viscoso), compressível e o processo é adiabático. Para as análises, as condições de contorno do reservatório estudadas neste trabalho foram: cavidade acústica com condição de contorno fechada-aberta na direção x (horizontal) e fechada-fechada na direção z (vertical), ou simplesmente denominada de fechada-aberta-fechada-fechada (F-A-F-F); cavidade acústica com condição de contorno fechada-aberta na direção x (horizontal) e fechada-aberta na direção z (vertical), ou simplesmente denominada de fechada-aberta-fechada-aberta (F-A-F-A); cavidade acústica com condição de contorno fechada-fechada na direção x (horizontal) e fechada-aberta na direção z (vertical), ou simplesmente denominada de fechada-fechada-fechada-aberta (F-F-F-A) e, por fim, cavidade acústica com condição de contorno aberta-aberta na direção x (horizontal) e fechada-aberta na direção z (vertical), ou simplesmente denominada de aberta-aberta-fechada-aberta (A-A-F-A).

Vale ressaltar que a condição de contorno chamada de fechada é análoga a condição de fronteira rígida e a condição aberta é similar a condição de pressão nula. As dimensões das cavidades foram padronizadas por L_x (comprimento longitudinal) e L_z (comprimento transversal). A Figura 5.1 apresenta as condições de contorno estudadas neste trabalho.

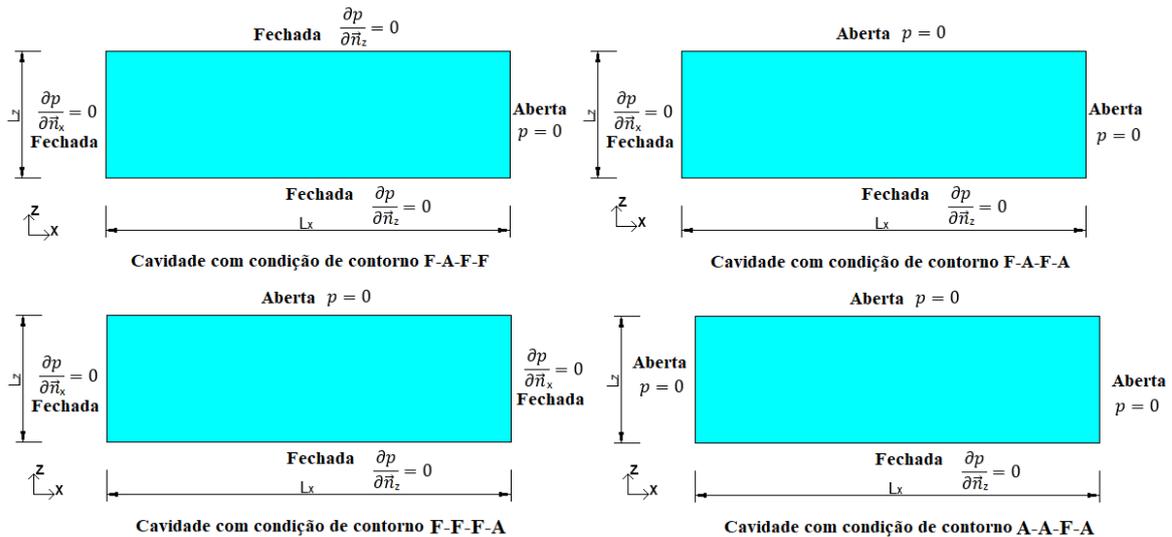


Figura 5.1: Condições de contorno da cavidade acústica desacoplada estudada.

Para as pressões convectivas, ou seja, para o efeito *sloshing*, a condição de superfície livre foi aplicada na cavidade acústica de fronteiras rígidas, resultando em uma condição de contorno fechada-fechada na direção x (horizontal) e fechada-superfície livre na direção z (vertical), ou simplesmente denominada de fechada-fechada-fechada-*sloshing* (F-F-F-S). A Figura 5.2 apresenta a condição de contorno estudada.

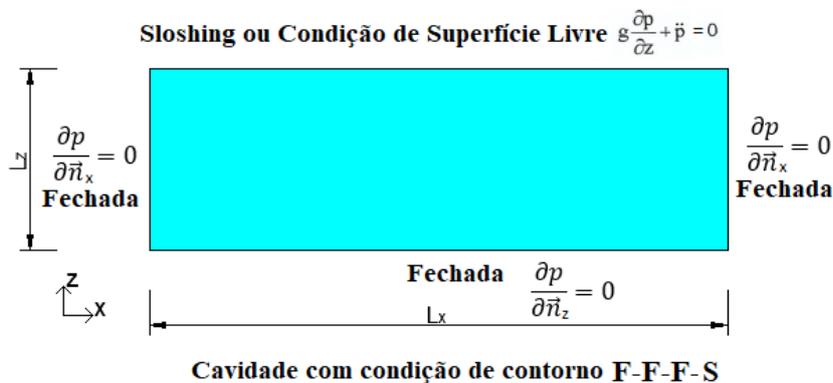


Figura 5.2: Condições de contorno da cavidade acústica com efeito *sloshing*.

5.2. EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA EM MEIO ACÚSTICO FLUIDO

5.2.1. Equação Diferencial da Onda Unidimensional (1D)

A análise do comportamento acústico de cavidades está relacionada ao comprimento das ondas acústicas juntamente com as dimensões do meio, no qual apresentam frequências naturais e modos acústicos.

A resolução dos problemas e obtenção dos modos acústicos pode ser descritos tendo como base a equação de propagação da onda em um meio fluido, sendo apresentada por diversos autores e que é repertoriada no presente trabalho com base nos estudos realizados por Pedroso (1994), Pedroso (2003) e Gibert (1988). A equação de propagação de onda em um meio acústico unidimensional (1D), na direção longitudinal L_x , no domínio da frequência que representa o fenômeno é dada por:

$$\frac{\partial^2 P(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{\omega_x}{c}\right)^2 P(x) = 0 \quad (5.1)$$

Onde c é a velocidade de propagação da onda em meio acústico, $P(x)$ é a pressão hidrodinâmica na direção longitudinal (L_x) e ω_x a frequência natural. A solução da Equação (5.1) é dada por:

$$P(x) = A \cos\left(\frac{\omega_x x}{c}\right) + B \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x x}{c}\right) \quad (5.2)$$

Onde A e B são amplitudes de vibração das ondas de pressões do fluido. De acordo com Pedroso (2003), a vazão mássica $q(x)$ em uma cavidade unidimensional retangular é dada por:

$$q(x) = \frac{\bar{i} S}{\omega} + \frac{\partial P(x, \omega_x)}{\partial x} \quad (5.3)$$

Onde \bar{i} é a unidade imaginária e S é a área de seção transversal normal à vazão mássica. Realizando a derivada da Equação (5.2) e substituindo na Equação (5.3), a vazão mássica pode ser reescrita por:

$$q(x) = \left(\frac{\bar{i} S}{c}\right) \left[-A \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x x}{c}\right) + B \cos\left(\frac{\omega_x x}{c}\right)\right] \quad (5.4)$$

A Equações (5.2) e (5.4) que refletem, respectivamente, a pressão e vazão mássica acústica podem ser avaliadas em termos dos limites acústicos denominadas de entrada ($x=0$) e saída da cavidade ($x=L_x$). Assim, para $x=0$, as amplitudes são dadas por:

$$A = P_e \quad (5.5)$$

$$B = \left(\frac{c}{\bar{v}S}\right) q_e \quad (5.6)$$

Conhecendo as amplitudes A e B, avaliando em $x=L_x$, a pressão e vazão mássica acústica podem ser reescritas por:

$$P_s = P_e \cos\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) + \left(\frac{c}{\bar{v}S}\right) q_e \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) \quad (5.7)$$

$$q_s = -P_e \left(\frac{\bar{v}S}{c}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) + q_e \cos\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) \quad (5.8)$$

Onde P_e é a pressão na entrada da cavidade, q_e é a vazão mássica na entrada da cavidade, P_s é a pressão na saída da cavidade, q_s é a vazão mássica na saída da cavidade e L_x é o comprimento longitudinal da cavidade acústica. As Equações (5.7) e (5.8) na forma matricial representam o método da matriz de transferência (MMT), dado por:

$$\begin{Bmatrix} P_s \\ q_s \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) & \frac{c}{\bar{v}S} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) \\ -\frac{\bar{v}S}{c} \operatorname{sen}\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) & \cos\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) \end{bmatrix}}_{\text{Matriz de Transferência (MT)}} \begin{Bmatrix} P_e \\ q_e \end{Bmatrix} \quad (5.9)$$

A Figura 5.3 ilustra a situação descrita pela matriz de transferência em relação a um espaço unidimensional (1D).

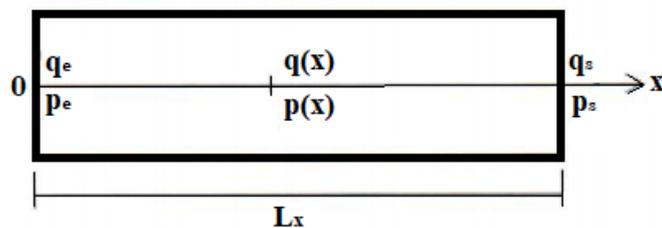


Figura 5.3: Cavidade acústica unidimensional (1D) (Adaptada de Pedroso, 2003).

5.2.2. Solução para Cavidade com Condição de Contorno Fechada-Aberta

Neste trabalho, a condição de contorno denominada fechada é similar a condição de contorno de fronteira rígida e a condição de contorno denominada aberta é a condição de pressão nula. Assim, substituindo na Equação (5.9) do sistema matricial do MMT as condições de contorno para uma cavidade acústica em $x=0$ com fronteira rígida ($q_e=0$) na entrada

(cavidade fechada) e em $x=L_x$ aberta com pressão nula na saída ($P_s=0$), temos as frequências naturais, expressas por:

$$\omega_x = \frac{n\pi c}{2L_x} ; \text{ para } n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (5.10)$$

Onde ω_x é a frequência natural da cavidade acústica em *rad/s*, c é a velocidade do som no meio acústico, e n é o número de meio-ondas longitudinais. Com a frequência, a distribuição de pressão, dada pela Equação (5.2), pode ser reescrita em função de qualquer ponto avaliado no comprimento da cavidade, dada por:

$$P(x) = P_e \cos\left(\frac{n\pi x}{2L_x}\right) ; \text{ para } n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (5.11)$$

Onde $P_e = A$, que é a amplitude de pressão adimensional na entrada da cavidade acústica.

5.2.3. Solução para Cavidade com Condição de Contorno Fechada-Fechada

Substituindo na Equação (5.9) do sistema matricial do MMT as condições de contorno para uma cavidade acústica em $x=0$ com fronteira rígida ($q_e=0$) na entrada (cavidade fechada) e em $x=L_x$ com fronteira rígida ($q_s=0$) na saída (cavidade fechada), temos as frequências naturais, expressas por:

$$\omega_x = \frac{n\pi c}{L_x} ; \text{ para } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (5.12)$$

Onde ω_x é a frequência natural da cavidade acústica em *rad/s*, c é a velocidade do som no meio acústico, e n é o número de meio-ondas longitudinais. Com a frequência, a distribuição de pressão, dada pela Equação (5.2), também pode ser reescrita em função de qualquer ponto avaliado no comprimento da cavidade, dada por:

$$P(x) = P_e \cos\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) ; \text{ para } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (5.13)$$

Onde $P_e = A$, que é a amplitude de pressão adimensional na entrada e saída da cavidade acústica.

5.2.4. Solução para Cavidade com Condição de Contorno Aberta-Aberta

De maneira análoga as outras soluções, substituindo na Equação (5.9) do sistema matricial do MMT as condições de contorno para uma cavidade acústica em $x=0$ aberta com pressão nula na entrada ($P_e=0$) e em $x=L_x$ aberta com pressão nula na saída ($P_s=0$), temos as frequências naturais, expressas por:

$$\omega_x = \frac{n\pi c}{L_x} ; \text{ para } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (5.14)$$

Onde ω_x é a frequência natural da cavidade acústica em rad/s , c é a velocidade do som no meio acústico, e n é o número de meio-ondas longitudinais. Com a frequência, a distribuição de pressão, dada pela Equação (5.9), pode ser reescrita em função de qualquer ponto avaliado no comprimento da cavidade, dada por:

$$P(x) = B \text{sen} \left(\frac{n\pi x}{L_x} \right) ; \text{ para } n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (5.15)$$

Onde B é a amplitude de pressão adimensional no interior da cavidade acústica.

5.2.5. Solução para uma cavidade acústica bidimensional (2D) e tridimensional (3D)

A frequência resultante da cavidade tridimensional ($\omega_{x,y,z}$) é obtida pela composição da sobreposição dos efeitos no espaço de frequências da cavidade unidimensional (1D), assumida agora com as características das três direções, ou seja, na direção horizontal x (ω_x), na direção transversal y (ω_y) e na direção vertical z (ω_z), dada por:

$$\omega_{x,y,z} = \sqrt{(\omega_x)^2 + (\omega_y)^2 + (\omega_z)^2} \quad (5.16)$$

O campo de pressões hidrodinâmicas da cavidade acústica tridimensional deve ser originado a partir da composição do campo de pressão unidimensional na direção x , direção y e direção z , dado por:

$$P(x, y, z) = A_{nmk} \cdot P(x) \cdot P(y) \cdot P(z) \quad (5.17)$$

Onde A_{nmk} é a amplitude de pressão adimensional combinada da cavidade tridimensional, $P(x)$, $P(y)$ e $P(z)$ são os campos de pressões nas três direções da cavidade acústica.

Para uma cavidade acústica bidimensional (2D) basta que nas Equações (5.16) e (5.17) o efeito de uma das direções seja desprezado, realizando a composição apenas no espaço bidimensional.

5.3. FORMULAÇÃO ENERGÉTICA APLICADA EM CAVIDADES ACÚSTICAS RETANGULARES

A formulação analítica para o fluido desacoplado é baseada na formulação variacional (energética) apresentada por Na Wang *et al.* (2022). Com esta formulação foi possível aplicar os modos de vibração de pressão do fluido e obter as frequências naturais acústica. Nesse sentido, a energia potencial de acústica do fluido (U_f) é dada por:

$$U_f = \frac{1}{2\rho_f c^2} \int_0^{L_z} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} [p(x, y, z)]^2 dx dy dz \quad (5.18)$$

Onde U_f é a energia potencial da cavidade acústica, ρ_f é a massa específica do fluido, L_x , L_y e L_z são os comprimentos (dimensões) da cavidade acústica retangular (dimensões do reservatório) e $p(x,y,z)$ são os modos de vibração de pressão hidrodinâmica do fluido. A energia cinética do fluido é dada por:

$$T_f = \frac{1}{2\rho_f \omega_f^2} \int_0^{L_z} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \left[\left(\frac{\partial p(x, y, z)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p(x, y, z)}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial p(x, y, z)}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz \quad (5.19)$$

Onde T_f é a energia cinética da cavidade acústica, e ω_f é a frequência natural da cavidade acústica. Uma vez dispondo das energias potencial e cinética da estrutura, a função Lagrange (Γ) que expressa o balanceamento entre energia cinética e potencial do fluido é definida por:

$$\Gamma = T_f - U_f \quad (5.20)$$

O balanceamento de energia e resolução do problema, expresso pelas Equações (5.18) e (5.19), consistem na forma geral de resolução de uma cavidade acústica tridimensional. Para uma análise unidimensional (1D) ou bidimensional (2D) as parcelas de energia, tanto cinética quanto potencial, relacionadas a estas direções que não contribuem podem ser

excluídas, ou seja, o índice modal relacionado ao modo acústico (n, m e/ou k) assumido igual a zero (modo de onda plana OP). Isso exclui o efeito de pressão naquela direção, caso necessário.

Assim, as formas modais de pressão assumidas para uma cavidade acústica tridimensional devem expressar o campo de pressão com condições de contorno apropriadas para o contorno do reservatório. O produto dos campos de pressão apresentados nas Equações (5.11), (5.13) e (5.15) podem ser assumidos nesta formulação.

Por fim, pode-se empregar o princípio da energia mínima de Ritz e realizar a derivada da função Lagrange em relação ao coeficiente de amplitude A_{nmk} do campo de pressão. Assim, é possível determinar a equação que expressa as frequências naturais. O procedimento é dado por:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial A_{nmk}} = 0 \quad (5.21)$$

Deve-se notar que durante a diferenciação todos os coeficientes são tomados constantes e a parcela de energia potencial e de energia cinética remetem-se a parcela de rigidez e de massa do fluido, respectivamente. Com isso, o balanceamento energético reflete as frequências naturais do meio acústico, expressa por:

$$(K_f - \omega_f^2 M_f) \cdot A_{nmk} = 0 \quad (5.22)$$

Em que K_f é rigidez do fluido, M_f é a massa de fluido, A_{nmk} é a amplitude do campo de pressão hidrodinâmica e ω_f é a frequência natural da cavidade acústica.

5.4. ONDAS DE SUPERFÍCIE LIVRE (*SLOSHING*) EM MEIOS ACÚSTICOS

As ondas que geram na superfície das águas são de complexo desenvolvimento e serão estudados aqui, que partem de um conjunto de estudos de Pedroso (1994), Pedroso (1995) e Pedroso (2003). Dentre as hipóteses do problema, tem-se: o líquido é incompressível, invíscido, irrotacional e homogêneo; os contornos são rígidos; os efeitos não lineares são desprezados (η/Lz e $\eta/Lx \lll 1$ onde Lx é o comprimento de onda na direção x longitudinal; os efeitos de tensão superficial do líquido e da atmosfera exterior são desprezíveis e; por

fim; o fundo é horizontal, fixo e impermeável, implicando na velocidade do fundo zero. A Figura 5.4, apresenta o problema e a descrição das variáveis no problema de *sloshing*.

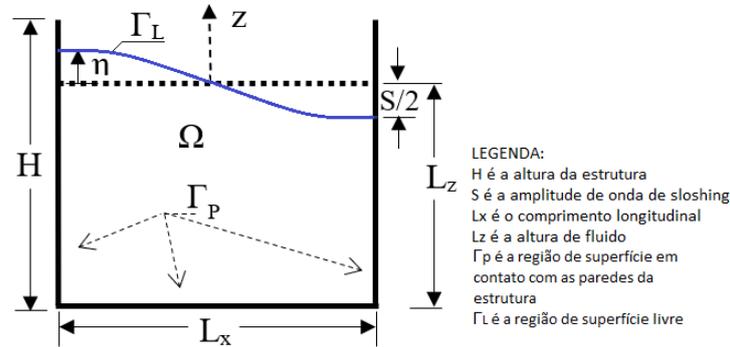


Figura 5.4 – Esquemas de uma cavidade retangular com superfície livre (Fonte: Adaptado de PEDROSO, 1995).

5.4.1. Formulação Básica

Em conformidade com as hipóteses adotadas, a equação geral governante do problema de superfície livre é a equação de Laplace em função do potencial de velocidade (ϕ), expressa por:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5.23)$$

Onde o campo de velocidade (\vec{v}) é dado por:

$$\vec{v} = \nabla \phi \quad (5.24)$$

E a pressão pode ser dada pelo potencial de velocidade (ϕ) e a densidade (ρ):

$$p = -\rho \phi \quad (5.25)$$

Onde p é a pressão, ρ é densidade e ϕ é a função potencial de velocidade. Assim, apresentando as condições de contorno no campo dos contornos rígidos (Γ_p) da cavidade retangular, conforme a Figura 5.4, temos que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \vec{n}} = \vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = 0 \quad \text{em } \Gamma_p \quad (5.26)$$

A relação entre as pequenas flutuações de pressão e a altura da superfície livre é expressa por:

$$p = \rho g \eta = \rho g Z \vec{n} \quad (5.27)$$

Onde g é a aceleração de gravidade, Z é a posição da altura da superfície livre e \vec{n} é o vetor unitário da direção do deslocamento do fluido. Então:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 \ddot{Z} \cdot \vec{n} \quad (5.28)$$

Derivando a Equação (5.27) em relação ao tempo e associando a Equação (5.28), obtém-se no domínio da superfície livre (Γ_L):

$$g \frac{\partial p}{\partial z} + \ddot{p} = 0 \quad (5.29)$$

Que representa a condição de contorno de superfície livre relacionando as duas condições anteriores.

Sobre a superfície livre (Γ_L) em termos de potencial de velocidade (ϕ)

A equação de Bernoulli para o caso de pequenos movimentos assume a forma:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = f(t) \quad (5.30)$$

Aplicando-a na superfície livre (Γ_L), obtém-se:

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=\eta} \quad (5.31)$$

Nota-se que a função $f(t)$ ou qualquer outra constante pode ser incluída ao valor de $(\partial \phi / \partial t)$. Supondo que o movimento da superfície livre seja pequeno ($\eta \rightarrow 0$), tudo será localizado em $z = 0$. Com as considerações de pequenos movimentos e desprezando termos não-lineares de ordem superior, a velocidade da superfície livre é simplificada e expressa por:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (5.32)$$

Derivando a Equação (5.31) em relação ao tempo e substituindo na Equação (5.32), tem-se:

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right]_{z=0} = 0 \quad (5.33)$$

A Equação (5.33) é a chamada de condição de Cauchy-Poisson para a superfície livre.

Solução do Problema

A equação de Laplace $\nabla^2\phi = 0$ pode ser resolvida por separação de variáveis, logo a solução ϕ é dada por um produto de funções:

$$\phi = F(x, y) \cdot G(z) \cdot f(t) \quad (5.34)$$

Substituindo a Equação (5.33) na Equação (5.23) e após algumas manipulações algébricas, tem-se que:

$$\frac{1}{F(x, y)} \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{1}{F(x, y)} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{1}{G(z)} \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = 0 \quad (5.35)$$

ou, de forma simplificada,

$$-\frac{\nabla^2 F}{F} = \frac{G''}{G} = m^2 \quad (5.36)$$

Onde m é uma constante real e positiva da separação de variáveis. Esta definição para m busca limitar às soluções com sentido físico. Logo, a Equação (5.36) é expressa por:

$$G'' - m^2 G = 0 \quad (5.37)$$

$$\nabla^2 F + m^2 F = 0 \quad (5.38)$$

Movimento da onda ao longo de uma vertical (z)

Analisando a Equação (5.37), tem-se:

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - m^2 \right) G = 0 \quad (5.39)$$

A solução da Equação (5.39) é expressa por:

$$G = Ae^{mz} + Be^{(-mz)} \quad (5.40)$$

Onde as constantes A e B são determinadas pelas condições de contorno da Equação (5.26), ou seja,

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=-L_z} = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial G}{\partial z} \right|_{z=-L_z} = 0 \quad (5.41)$$

Onde L_z é a altura de líquido. Logo, analisando as condições de contorno na Equação (5.40), tem-se que:

$$Ae^{-mL_z} = Be^{(mL_z)} = \frac{1}{2}E \quad (5.42)$$

A fim de simplificar a expressão da Equação (5.40), multiplica-se seu lado direito por $e^{-mL_z} \cdot e^{mL_z}$, então temos que:

$$G = Ae^{m(z+L_z)}e^{-mL_z} + Be^{-m(z+L_z)}e^{(mL_z)} \quad (5.43)$$

Então, aplicando a Equação (5.42) na Equação (5.43), chega-se a:

$$G = \frac{1}{2}E[e^{m(z+L_z)} + e^{-m(z+L_z)}] = E \cdot \cosh[m(z + L_z)] \quad (5.44)$$

Logo, substituindo a Equação (5.44) na Equação (5.34), esta última pode ser reescrita por:

$$\phi = E \cdot \cosh[m(z + L_z)] \cdot F(x, y) \cdot f(t) \quad (5.45)$$

Introdução da condição de superfície livre

A solução em função do tempo é dada pela aplicação da condição de Cauchy-Poisson, então substituindo a Equação (5.45) na Equação (5.33) tem-se:

$$\frac{\ddot{f}}{f} = -gm \tanh(mL_z) \quad (5.46)$$

Se $\omega^2 = -gm \tanh(mL_z)$, a solução para a função $f(t)$ é dada pela equação diferencial $\ddot{f} + \omega^2 f = 0$, cuja solução pela equação característica resulta em $s = \pm i\omega$. Então, a solução é expressa por:

$$f = Ce^{i\omega t} + De^{-i\omega t} \quad (5.47)$$

Onde C e D são constantes dependentes das condições de contorno, $\omega = 2\pi/T$ e T é o período da onda. Supondo D = 0 e substituindo a Equação (5.47) na Equação (5.34), o potencial de velocidade (ϕ) apresenta a seguinte forma:

$$\phi = E^* \cosh[m(z + L_z)] \cdot F(x, y) \cdot e^{i\omega t} \quad (5.48)$$

Onde $E^* = E \cdot C$. Logo, nota-se a existência de um número discreto infinito de valores para ω_n e m_n que satisfaz a Equação (5.46), que pode ser reescrita como:

$$\omega_n^2 = m_n g \tanh(m_n L_z) \quad (5.49)$$

Assim, a solução geral ϕ da Equação (5.48) pode ser expressa por:

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} E_n^* \cosh[m_n(z + L_z)] \cdot F(x, y) \cdot e^{i\omega_n t + \theta} \quad (5.50)$$

Onde θ corresponde a uma defasagem. Como é conveniente apresentar E^* em função da amplitude da onda $A = S/2$, então substituindo a Equação (5.50) na Equação (5.31) linearizada ($z = 0$) e considerando a parte real de η , tem-se que:

$$\eta = -\frac{\omega E^*}{g} \cosh(m L_z) \cdot F(x, y) \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5.51)$$

As expressões de ϕ e η mostram-se mais convenientes com a definição da constante A para a amplitude de η . Então:

$$E^* = -\frac{Ag}{\omega} \frac{1}{\cosh(m L_z)} \quad (5.52)$$

Logo, substituindo a Equação (5.52) na Equação (5.50), temos que:

$$\phi = -\frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh(z + L_z)}{\cosh(m L_z)} \cdot F(x, y) \cdot e^{i\omega t} \quad (5.53)$$

Se a relação da Equação (5.49) for substituída na Equação (5.53), ainda é possível apresentar a Equação (5.53) em outro formato, onde o seno hiperbólico estará no denominador. Em resumo, com a constante E^* da Equação (5.52), a função $G(z)$ está então definida.

Solução da equação da onda no plano (x-z)

A equação diferencial representada pela Equação (5.38) não apresenta uma solução geral possível, mas um certo conjunto de soluções dependentes das condições de contorno. Seja, por exemplo, o movimento bidimensional da onda no plano x-z, então, temos que:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{\forall z} = 0 \rightarrow \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{\forall z} = 0 \quad (5.54)$$

Assim, a Equação (5.38) pode ser expressa por:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + m^2\right)F = 0 \quad (5.55)$$

A solução da Equação (5.55) é dada por:

$$F = A'e^{imx} + B'e^{-imx} \quad (5.56)$$

Onde A' e B' são constantes. Supondo $F = e^{-imx}$, a função potencial de velocidade da Equação (5.53) pode ser reescrita por:

$$\phi = -\frac{Ag \cosh[m(z + L_z)]}{\omega \cosh(mL_z)} \cdot e^{i(\omega t - mx)} \quad (5.57)$$

ou ainda,

$$\phi = -\frac{Ag \cosh[m(z + L_z)]}{\omega \cosh(mL_z)} \cdot \cos(\omega t - mx) \quad (5.58)$$

A Equação 5.58 é a função potencial de velocidade para uma onda progressiva na direção \vec{OX} . Se $F = e^{imx}$, o potencial ϕ corresponde a uma onda indo na direção oposta. Supondo agora uma solução do tipo:

$$F = \frac{1}{2}(e^{imx} + e^{-imx}) = \cos(mx) \quad (5.59)$$

ou,

$$F = \frac{1}{2i}(e^{imx} - e^{-imx}) = \text{sen}(mx) \quad (5.60)$$

Então, a função potencial de velocidade pode ser expressa por:

$$\phi = -\frac{Ag \cosh(m(z + L_z))}{\omega \cosh(mL_z)} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(mx) \\ \text{sen}(mx) \end{array} \right\} \cos(\omega t) \quad (5.61)$$

Uma vez que se conhece a função potencial de velocidade, as ondas de superfície livre *sloshing* são expressas por:

$$\eta = -\frac{\omega E^*}{g} \cosh(mL_z) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \cos(mx) \\ \text{sen}(mx) \end{array} \right\} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (5.62)$$

Discussão sobre o parâmetro m

O sentido físico do parâmetro m pode ser percebido da seguinte forma; se ϕ e η são funções periódicas em relação ao espaço, então $m = 2\pi/L_x$ sendo L_x o comprimento da onda. Ao aplicar esta definição na Equação (5.49), tem-se:

$$L_x = \frac{T^2 g}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{L_z}{L_x}\right) \quad (5.63)$$

Logo, a velocidade da onda pode ser calculada como:

$$c = \frac{L_x}{T} = \frac{Tg}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{L_z}{L_x}\right) \quad (5.64)$$

ou ainda,

$$c = \frac{g}{\omega} \tanh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \quad (5.65)$$

Para $\omega L_z/c < 1$ ou $L_z/L_x \ll 1$ a solução está associada a um problema de águas rasas, então tem-se as seguintes aproximações:

$$\sinh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx \frac{\omega L_z}{c} \quad ; \quad \cosh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx 1 \quad \text{e} \quad \tanh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx \frac{\omega L_z}{c} \quad (5.66)$$

Logo, temos que:

$$c = \sqrt{gh} \quad \text{e} \quad L_x = T\sqrt{gh} \quad (5.67)$$

Para $\omega L_z/c > 1$ ou $L_z/L_x > \text{ou} \cong 1$ a solução está associada a um problema de águas profundas, assim tem-se as seguintes aproximações:

$$\sinh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx \frac{e^{\frac{\omega L_z}{c}}}{2} \quad ; \quad \cosh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx \frac{e^{\frac{\omega L_z}{c}}}{2} \quad \text{e} \quad \tanh\left(\frac{\omega L_z}{c}\right) \approx 1 \quad (5.68)$$

Logo,

$$c = \frac{g}{\omega} = \frac{gT}{2\pi} \quad \text{e} \quad L_x = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (5.69)$$

Aplicando as condições e os períodos de ondas apresentados nas Equações (5.63) a (5.69), pode-se montar uma tabela (Tabela 5.1) com os resumos de equações das frequências naturais de superfície livre com base na teoria de ondas de água.

Tabela 5.1 – Resumo das equações de frequências de *sloshing* (em Rad/s) com base na teoria de ondas de água.

| Descrição | Teoria | | |
|-----------------------------------|--|---|---|
| | Águas Rasas $\left(\frac{L_z}{L_x} < 0,05\right)$ | Águas Intermediárias $\left(0,05 < \frac{L_z}{L_x} < 0,5\right)$ | Águas Profundas $\left(\frac{L_z}{L_x} > 0,5\right)$ |
| Frequência natural antissimétrica | $\omega = \sqrt{gL_z \left(\frac{\pi}{L_x}\right)^2}$ | $\omega = \sqrt{\left(\frac{g\pi}{L_x}\right) \tanh\left(\frac{\pi L_z}{L_x}\right)}$ | $\omega = \sqrt{\frac{g\pi}{L_x}}$ |
| Frequência natural simétrica | $\omega = \sqrt{gL_z \left(\frac{2\pi}{L_x}\right)^2}$ | $\omega = \sqrt{\left(\frac{2g\pi}{L_x}\right) \tanh\left(\frac{2\pi L_z}{L_x}\right)}$ | $\omega = \sqrt{\frac{2g\pi}{L_x}}$ |

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados a formulação matemática através da equação da onda acústica e pelos métodos de energia para as pressões hidrodinâmicas impulsivas. Ambas as formulações foram implementadas no *software* MAPLE®. A formulação energética do fluido contribui para o desenvolvimento da formulação acoplada fluido-estrutura que será apresentada neste trabalho. Além disso, a formulação da teoria de ondas para o estudo dos efeitos de superfície livre *sloshing* foi apresentada.

6. FORMULAÇÃO ANALÍTICA PARA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado todo procedimento analítico para a análise dos problemas de interação fluido-estrutura. Para isso, algumas considerações são necessárias, tais como: a estrutura tem um comportamento elástico-linear, constituída por material isotrópico, homogêneo e sujeita a regime de pequenos deslocamentos.

O método da matriz de transferência modificado (MMTM) é a primeira solução analítica apresentada, responsável por contabilizar o efeito de uma estrutura rígida-móvel (um grau de liberdade) acoplada com uma cavidade de condições de contorno IFE-A-F-F. A segunda solução analítica apresentada é o artifício do campo de pressão prescrito (ACPP), proposta neste trabalho.

A maioria das formulações de interação fluido-estrutura parte da equação governante da cavidade acústica e realiza a interação fluido-estrutura impondo o efeito da estrutura como uma condição de contorno na equação governante do fluido. Neste trabalho, a metodologia proposta do ACPP assume um campo de pressão acoplado (já conhecido) para o fluido e realiza o acoplamento fluido-estrutura pela formulação energética através do balanceamento de energia entre os dois meios (estrutura e fluido).

O procedimento analítico do ACPP é utilizado para estrutura rígido-móvel acoplada com cavidade de condição IFE-A-F-F, ou seja, um problema de IFE unidimensional de um grau de liberdade. A partir deste, a análise é estendida a outras condições de contorno da cavidade através de uma equivalência na massa adicional movimentada. Para tal, é necessário utilizar os campos de pressão hidrodinâmico obtidos por Westergard (1933) e por Chakrabarti & Chopra (1974).

Assim, o ACPP tem a finalidade de propor uma metodologia aproximada para a análise das características vibratórias (frequências naturais) de uma estrutura, rígida ou flexível, acoplada com uma cavidade acústica de condição de contorno unidimensional ou bidimensional. Ao final, é demonstrado que este método proposto, de cálculo

unidimensional (1D), pode contabilizar a frequência fundamental do efeito acoplada barragem-reservatório.

6.2. ESTRUTURA-CAVIDADE ACOPLADOS PELO MÉTODO DA MATRIZ DE TRANSFERÊNCIA MODIFICADO (MMTM)

A resposta dinâmica em vibrações livres do problema acoplado pode ser solucionada analiticamente a partir do método da matriz de transferência modificado, em que a interação parte de uma cavidade unidimensional com condições de contorno IFEF-A-F-F governada pela equação da onda acústica. A Figura 6.1 ilustra as condições de contorno para o problema acoplado, bem como a cavidade acústica unidimensional com vazão de entrada (q_e), pressão de entrada (p_e), vazão de saída (q_s) e pressão de saída (p_s).

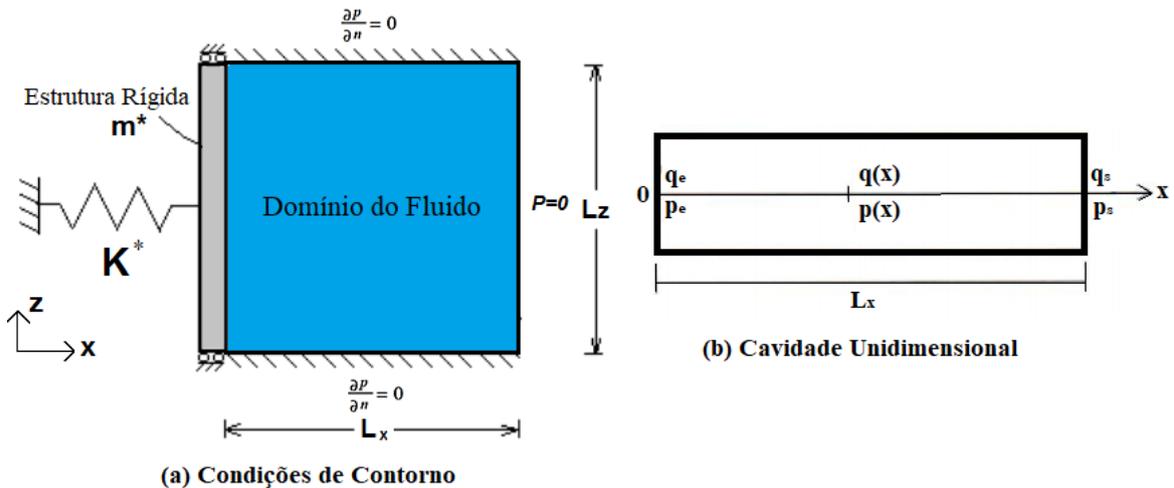


Figura 6.1: Modelo Analítico Unidimensional (1D) (Adaptada de Pedroso, 2003).

Assim, a interação no modelo analítico é realizada aplicando o movimento da estrutura como uma vazão mássica na entrada da cavidade, dada por:

$$q_e = \bar{v} \omega_x \rho_f L_z x_e \quad (6.1)$$

Onde ρ_f é a massa específica do fluido, L_z é o comprimento transversal (altura) da cavidade, que representa a seção transversal na entrada da superfície do acoplamento da cavidade unidimensional e x_e é o deslocamento da estrutura. Assim, substituindo na Equação (5.9) do MMT as condições de contorno da Equação (6.1) em $x=0$ com o movimento do pistão na entrada da cavidade, bem como substituindo em $x=L_x$ a pressão nula na saída ($P_s=0$), temos a amplitude de pressão na interface fluido-estrutura, dada por:

$$P_e = -\omega_x \rho_f c x_e \tan\left(\frac{\omega_x L_x}{c}\right) \quad (6.2)$$

A pressão de entrada da cavidade na interface fluido-estrutura é aplicada na equação de movimento da estrutura, ou seja, na Equação (4.12). Assim, as frequências (ω_x) passam a representar as frequências acopladas fluido estrutura, denominadas neste trabalho de ω_x^{IFE} . Assim, a equação de movimento acoplada é dada por:

$$-m_e^* (\omega_x^{IFE})^2 x_e + \bar{K}_{i,j}^{F+C} x_e = -P_e L_z \quad (6.3)$$

Ou na sua forma expandida ao substituir a Equação 6.2 na Equação 6.3, expressa por:

$$\left[-m_e^* (\omega_x^{IFE})^2 + \bar{K}_{i,j}^{F+C} - \rho_f c L_z \tan\left(\frac{\omega_x^{IFE} L_x}{c}\right) \omega_x^{IFE} \right] x_e = 0 \quad (6.4)$$

A Equação (6.4) apresentada é uma equação transcendental em que suas raízes fornecem as frequências naturais do sistema acoplado fluido-estrutura. Ao multiplicar todos os termos da Equação (6.4) por $(L_x/\rho_f c^2 L_z)$, esta equação transcendental pode ser reescrita na forma:

$$-\mu \lambda - \lambda \tan(\lambda) + \alpha = 0 \quad (6.5)$$

Em que μ é o parâmetro de massa que é a relação entre a massa da estrutura e a massa de fluido deslocada, λ é o parâmetro de compressibilidade do fluido que é a relação entre o comprimento da cavidade e o comprimento de onda correspondente a uma frequência natural qualquer e α é o parâmetro de rigidez que é a relação entre a rigidez generalizada da estrutura e a rigidez associada ao volume de fluido deslocado. Os parâmetros citados são expressos, respectivamente, por:

$$\mu = \frac{m_e^* \omega_x^{IFE}}{\rho_f c L_z} \quad (6.6)$$

$$\lambda = \frac{\omega_x^{IFE} L_x}{c} \quad (6.7)$$

$$\alpha = \frac{\bar{K}_{i,j}^{F+C} L_x}{\rho_f c^2 L_z} \quad (6.8)$$

Na montagem e análise da equação transcendental é necessário avaliar dois parâmetros que influenciam diretamente na obtenção desta raiz: os parâmetros de massa, rigidez e compressibilidade do fluido, bem como o comprimento longitudinal da cavidade (L_x).

6.2.1. Análise dos Parâmetros de Massa (μ), de Rigidez (α) e de Compressibilidade (λ)

Na avaliação da equação transcendental (Figura 6.2) pode-se observar que existe uma relação praticamente linear entre α e μ , em que ambas têm relação direta com o parâmetro de compressibilidade (λ). Assim, quanto maior o efeito da compressibilidade do fluido, maior são as variações entre as relações de massa e rigidez entre estrutura e fluido.

Com o estudo paramétrico abaixo (Figura 6.2), pode-se perceber que quanto maior os valores de λ e μ , ou seja, maior a relação entre a rigidez da estrutura e da cavidade a solução analítica do problema acoplado tende a obter os valores da cavidade fechada. Da mesma forma, para pequenos valores de λ e μ , essa relação da solução acoplada tende aos valores da cavidade aberta.

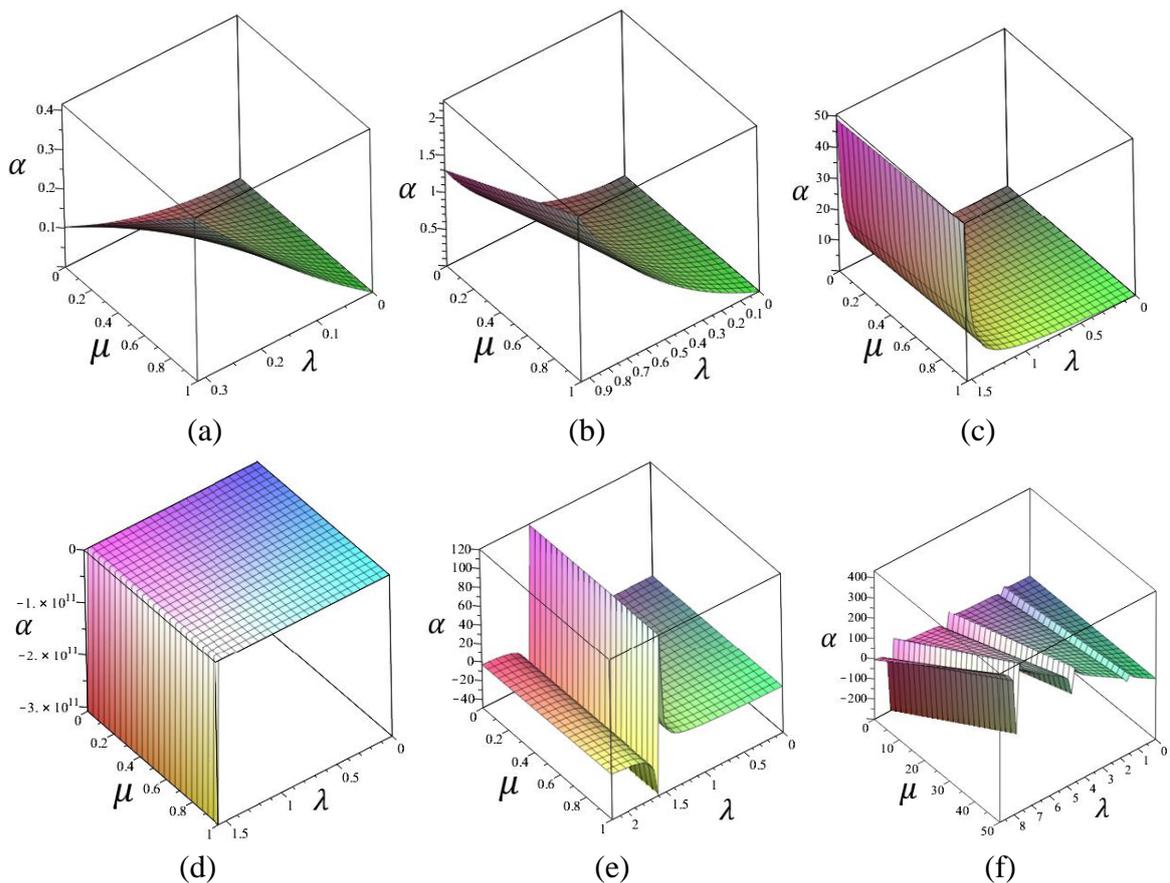


Figura 6.2: Análise dos parâmetros da equação transcendental: (a) $0 \leq \lambda \leq 0.1\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (b) $0 \leq \lambda \leq 0.3\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (c) $0 \leq \lambda \leq 0.49\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (d) $0 \leq \lambda \leq 0.5\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (e) $0 \leq \lambda \leq 0.7\pi$ e $0 \leq \mu \leq 1$; (f) $0 \leq \lambda \leq 2.8\pi$ e $0 \leq \mu \leq 50$;

Vale observar que à medida que ocorre uma variação e aumento no parâmetro de compressibilidade a função matemática chega a uma singularidade (“explode”), devido ao

fato da parcela da função tangente ($\tan(\lambda)$) nas raízes da equação transcendental. Isso representa a frequência acústica. Ao realizar a varredura na equação transcendental para determinar as raízes, ou seja, as frequências naturais acopladas, esse efeito é mais notório.

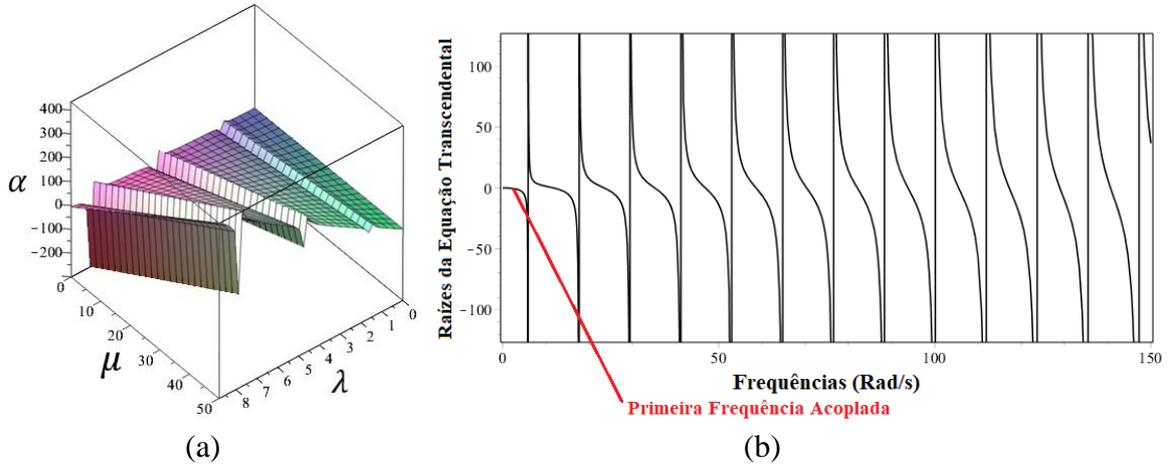


Figura 6.3: Exemplo de raízes da equação transcendental pelo MMTM: (a) varredura dos parâmetros α , μ e λ e (b) exemplo de obtenção das raízes na equação transcendental.

Com a plotagem e avaliação da Equação (6.5), apresentada na figura anterior, a primeira raiz representa a frequência acoplada de massa adicional do problema acoplado. Entretanto, para tal análise é necessário avaliar o parâmetro de compressibilidade. Assim, ao observar a equação transcendental é possível notar que a singularidade é obtida quando $\lambda = \pi/2$. Portanto, o parâmetro de compressibilidade limita a raiz real que expressa a frequência natural acoplada a uma condição de $\lambda < \pi/2$.

Esse efeito é também evidenciado em formulações bidimensionais, como por exemplo, na resolução da Equação da Onda de Helmholtz (fluido compressível) analisada nos trabalhos de Silva (2007) e de Ribeiro (2010).

Aplicando na Equação (5.9) a condição de pressão na entrada ($x=0$) igual a P_e obtida pela interação fluido-estrutura (Equação 6.2) e em $x=L_x$ a pressão nula ($P_s=0$) no limite da cavidade, as amplitudes de pressão A e B da Equação (5.9), neste caso acoplado, são expressas por:

$$A = P_e \quad (6.9)$$

$$B = -\frac{P_e}{\tan \lambda} \quad (6.10)$$

Então, substituindo as amplitudes apresentadas nas Equações 6.9 e 6.10, a distribuição de pressões hidrodinâmicas acopladas na direção longitudinal x expressas pela Equação (5.2) é dada, neste caso acoplado, por:

$$P(x)_{IFE} = -\omega_x^{IFE} \rho_f c x_e \left[\tan(\lambda) \cos\left(\frac{\omega_x^{IFE} x}{c}\right) - \text{sen}\left(\frac{\omega_x^{IFE} x}{c}\right) \right] \quad (6.11)$$

O método da matriz de transferência modificado, recebe essa denominação de modificado por ser utilizado para análise simplificada da interação fluido-estrutura em sistemas bidimensionais (ou até mesmo em sistemas tridimensionais). Para tal, Pedroso (2003) faz a composição num espaço de frequências entre uma frequência acoplada na direção da interação fluido-estrutura unidimensional (problema do pistão) com uma frequência acústica desacoplada no domínio do fluido na direção perpendicular. Assim, a composição de frequência no método da matriz de transferência modificado é expressa por $\omega_{acoplada}^{2D} = \sqrt{(\omega_x^{acoplada})^2 + (\omega_y^{desacoplada})^2}$ e foi validada nos trabalhos de Pedroso (2003), Souza (2007) e Mendes (2021).

6.3. ESTRUTURA-CAVIDADE ACOPLADOS PELO ARTIFÍCIO DO CAMPO DE PRESSÃO PRESCRITO (ACPP)

A formulação analítica, proposta neste trabalho, para o problema acoplado fluido-estrutura é baseada na formulação variacional (energética) e denominada de artifício do campo de pressão prescrito (ACPP). Assim, a estrutura é representada pela rigidez e massa generalizada e o fluido é acoplado na solução através de uma imposição do campo de pressão acoplado, que já deve ser conhecido.

Vale ressaltar que diversas formulações que foram apresentadas no capítulo de revisão da literatura traz a resolução do problema de interação fluido-estrutura através da imposição da deformada da estrutura como condição de contorno nas equações de movimento do fluido. Neste trabalho, tal metodologia de impor um campo de pressão adimensional com pressões hidrodinâmicas conhecidas para a o cálculo da massa adicional ainda não foi encontrada na literatura. A ideia é válida, uma vez que em um regime incompressível o campo de pressão acoplado prescrito produz um efeito de massa adicional para qualquer dimensão de reservatório, dependente apenas das condições de contorno e propriedades físicas do meio

acústico, bem como da flexibilidade da estrutura na interface através de parâmetros generalizados.

6.3.1. Solução Analítica Para IFE De Uma Estrutura Rígido-móvel Acoplada com uma Cavidade de Condição de Contorno IFE-A-F-F

Inicialmente foi desenvolvida um esquema de acoplamento apresentado na Figura 6.4, representado por um acoplamento em que a estrutura faz um deslocamento de corpo rígido, ou seja, não apresenta nenhuma flexibilidade e acopla com uma cavidade de condição de contorno F-A-F-F. Note que a condição de contorno são as mesmas apresentadas no método da matriz de transferência (MMTM), ou seja, o acoplamento é feito em um problema unidimensional (1D).

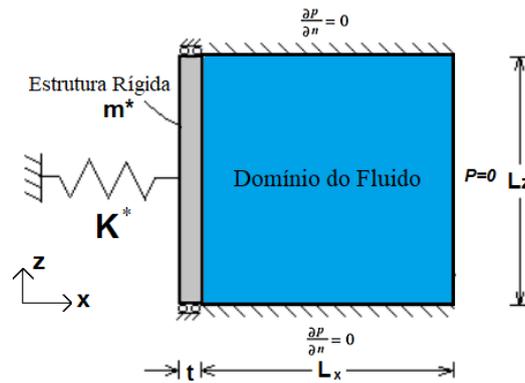


Figura 6.4: Modelo analítico do ACPP com respectivas condições de contorno.

A estrutura rígida-móvel de um grau de liberdade possui energia cinética e potencial de deformação da mola, expressas por:

$$T_e = \frac{m_e^* [\dot{x}_e(t)]^2}{2} \quad (6.11)$$

$$U_e = \frac{\bar{K}_{i,j}^{F+C} x_e(t)}{2} \quad (6.12)$$

Onde T_e é a energia cinética da estrutura, U_e é a energia potencial de deformação elástica, m_e^* a massa generalizada, $\bar{K}_{i,j}^{F+C}$ a rigidez generalizada de flexão e cisalhamento combinadas, $\dot{x}_e(t)$ a velocidade e $x_e(t)$ o deslocamento a estrutura. O deslocamento da estrutura é idealizado por um movimento harmônico, expresso por:

$$x_e(t) = Ae^{\omega_e t} \quad (6.13)$$

Em que A é a amplitude de vibração da estrutura, ω_e é a frequência natural da estrutura e t o tempo. Para o meio acústico, a energia cinética e potencial de acústica do fluido (V_f) é assumida apenas a parcela que contribui na direção do acoplamento, ou seja, uma cavidade unidirecional (1D). Assim, a energia cinética e potencial do fluido, já simplificada em relação as Equações (5.18) e (5.19), são dadas por:

$$T_f = \frac{1}{2\rho_f\omega_f^2} \int_0^{L_x} \left(\frac{\partial p(x)}{\partial x}\right)^2 dx \quad (6.14)$$

$$U_f = \frac{1}{2\rho_f c^2} \int_0^{L_x} [p(x)]^2 dx \quad (6.15)$$

Onde T_f é a energia cinética da cavidade acústica, e ω_f é a frequência natural da cavidade acústica. U_f é a energia potencial da cavidade acústica, ρ_f é a massa específica do fluido, L_x é o comprimento da cavidade acústica unidirecional (longitudinal) e $p(x)$ é o modo de vibração acoplado do campo de pressão hidrodinâmica do fluido (campo de pressão prescrito).

Para representar o campo de pressão acoplado a estrutura é assumida com deslocamento de corpo rígido, sendo que o campo de pressão produzido pelo primeiro modo de massa adicional é representado por um modo linear, também conhecido como “modo de rampa”. Tal campo de pressão assumido condiz com o efeito da incompressibilidade do fluido. A forma modal acoplada para campo de pressão hidrodinâmica na interface fluido-estrutura e ao longo da cavidade acústica é apresentado na Figura 6.5 abaixo.

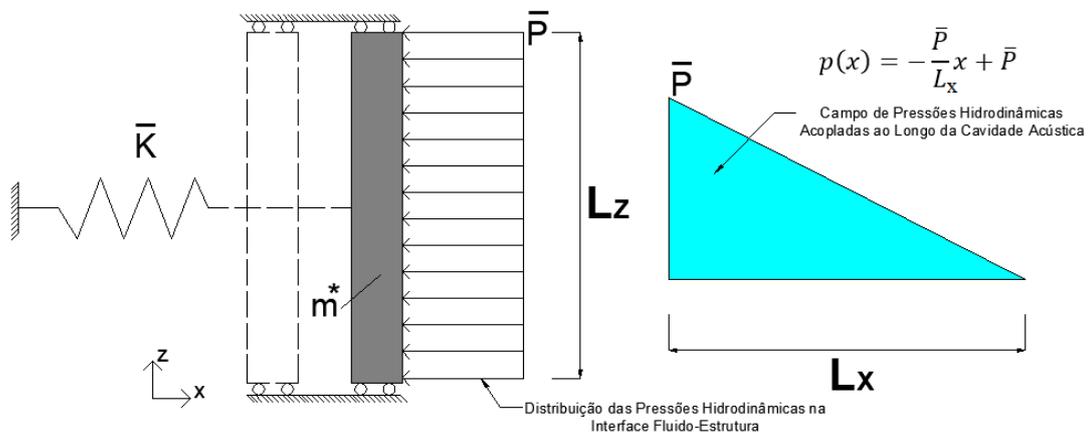


Figura 6.5: Campo de pressão idealizado para acoplamento fluido-estrutura unidirecional.

Conforme visto na Figura 6.5, o campo de pressão prescrito para o efeito acoplado é então representado por:

$$p(x) = -\frac{\bar{P}}{L_x}x + \bar{P} \quad (6.16)$$

Onde \bar{P} é uma amplitude de pressão adimensional na cavidade devido a um movimento estrutural na interface e L_x é o comprimento da cavidade acústica. O campo de pressão corresponde a uma cavidade de dimensão transversal L_z . A condição para interação fluido-estrutura é aplicada assumindo que a variação da pressão na interface é originada pela movimentação da massa de fluido devido aceleração da estrutura, expressa por:

$$\left[\frac{\partial p(x)}{\partial x} \right]_{x=0} = -\rho_f \ddot{x}_e(t) \quad (6.17)$$

Assim, realizando a derivada da Equação (6.16), que representa a inércia de fluido movimentada, e ainda, assumindo o deslocamento da estrutura conforme a Equação (6.13) e realizando a sua diferenciação até obter a aceleração ($\ddot{x}_e(t)$), a amplitude de pressão na cavidade acústica devido a amplitude de movimento da estrutura, para uma cavidade de dimensão transversal L_z , é reescrita por:

$$\bar{P} = A L_z L_x \rho_f (\omega_x^{IFE})^2 e^{\omega_x^{IFE}t} \quad (6.18)$$

Uma vez dispo de as energias cinética e potencial da estrutura e do fluido, bem como da amplitude de pressão do fluido expressa em termos da amplitude de deslocamento da estrutura (Equação 6.18), a função Lagrange (Γ) que expressa o balanceamento entre energia cinética e potencial do problema acoplado fluido-estrutura é definida por:

$$\Gamma = T_e + T_f - U_e - U_f \quad (6.19)$$

Substituindo as equações de energias cinéticas e potenciais da estrutura e do fluido (Equações 6.11, 6.12, 6.14 e 6.15), reorganizando os termos, bem como adotando o fluido como incompressível ($c \rightarrow \infty$). Então, a parcela da energia potencial do fluido pode ser desprezada e a função Lagrange (Γ) para o caso acoplado é reescrita da seguinte forma:

$$\Gamma = [m_e^* (\omega_x^{IFE})^2 + L_z L_x \rho_f (\omega_x^{IFE})^2 - \bar{K}_{i,j}^{F+C}] \frac{A^2 (e^{\omega_x^{IFE} t})^2}{2} \quad (6.20)$$

É válido notar que a frequência da estrutura (ω_e) e a frequência acústica (ω_f) quando agora acopladas no balanceamento energético é representada por uma frequência acoplada fluido-estrutura (ω_x^{IFE}). Outro aspecto válido a salientar é que a parcela de energia cinética do fluido contém uma espécie de massa adicional de fluido, que representa toda massa de fluido movimentada em uma cavidade unidimensional de comprimento transversal L_z e longitudinal L_x . Por fim, utilizando o princípio da energia mínima de Ritz e realizando a derivada da função Lagrange em relação ao coeficiente de amplitude A , é possível determinar a equação que expressa as frequências naturais acopladas a partir de um problema de valores próprios. O procedimento é dado por:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial A} = 0 \quad (6.21)$$

Com isso, o balanceamento energético reflete as frequências naturais do problema acoplado fluido-estrutura, expressa por:

$$\omega_x^{IFE} = \sqrt{\frac{\bar{K}_{i,j}^{F+C}}{m_e^* + L_z L_x \rho_f}} \quad \text{ou simplesmente:} \quad \omega_x^{IFE} = \sqrt{\frac{\bar{K}_{i,j}^{F+C}}{m_e^* + m_a}} \quad (6.22)$$

Em que a parcela $m_a = L_z L_x \rho_f$ é a massa adicional de fluido (m_a) movimentada devido ao movimento de corpo rígido do pistão. Vale ressaltar que em uma cavidade acústica unidimensional, qualquer movimento de corpo rígido na interface, quando no regime incompressível, é produzido um campo de pressão linear (modo de rampa) e toda massa de fluido movimentada, aspectos teóricos estes que condizem com a formulação proposta.

Portanto, sabendo que nessa formulação acoplada pistão-reservatório toda massa de fluido é movimentada, o método aqui apresentado equivale (no regime incompressível) ao método da matriz de transferência (MMTM). Contudo, algumas vantagens e desvantagens do ACPD em relação ao MMTM são elencadas:

- A equação para obtenção da frequência natural é de simples manuseio para qualquer caso e depende diretamente da rigidez e massa da estrutura e de parâmetros físicos e geométricos da cavidade;
- Não é necessária nenhuma implementação computacional ou resolução de equação transcendental, tornando o ACPP um procedimento relativamente mais rápido quando comparada com MMTM;
- O ACPP possibilita a inclusão da flexibilidade da estrutura através de parâmetros generalizados (massa e rigidez) e de outros campos de pressão prescritos, acoplados pelo princípio energético, caracterizando-o como uma proposta simples e de grande potencialidade para uso na área;
- O ACPP trata-se de uma formulação incompressível. Enquanto o MMTM é uma formulação compressível.

Nos próximos tópicos (item 6.3.2 e 6.3.3) essa metodologia é estendida a casos mais complexos, como por exemplo, acoplamento de estrutura rígida-móvel com uma cavidade acústica F-A-F-A, que é a condição de contorno de uma barragem rígida-móvel acoplada com fluido acústico F-A-F-A. Além disso, a metodologia também é estendida para a condição de acoplamento de estrutura flexível com uma cavidade acústica F-A-F-A, que é a condição de contorno de uma barragem deformável acoplada com fluido acústico F-A-F-A, ou seja, caso mais real.

Para isto, na metodologia do ACPP, a consideração de outras condições de contorno do reservatório e flexibilidade da estrutura, foi feita através de uma equivalência da massa de fluido movimentada pelo ACPP (problema 1D) com a massa adicional obtida pelo procedimento de cálculo bidimensional (problema 2D) da resolução analítica fechada pelo método de separação de variáveis na equação de Laplace (fluido incompressível). Tal equivalência e procedimento proposto são apresentados a seguir.

6.3.2. Solução Analítica para IFE de uma Estrutura Rígida-móvel Acoplada com Cavidade Acústica de Condição de Contorno IFE-A-F-A

A metodologia do ACPP foi inicialmente realizada para um acoplamento unidimensional de uma estrutura rígida-móvel acoplada com uma cavidade de condição de contorno IFE-A-F-F. Entretanto, nesta etapa do trabalho, pretende-se apresentar uma metodologia simplificada para análise de uma estrutura rígida-móvel acoplada com uma cavidade acústica de condição

de contorno IFE-A-F-A com o uso da mesma solução analítica unidimensional, impondo apenas uma equivalência entre a massa adicional entre ambas as condições de contorno do meio acústico.

Para isto, é analisada algumas soluções analíticas da equação de Laplace (fluido incompressível) para um domínio bidimensional, encontradas nos trabalhos de Westergard (1933), Chakrabarti & Chopra (1974) e de Silva (2005). Tais soluções servem de base para a equivalência no ACPP.

Nos trabalhos citados, foi resolvido analiticamente o problema de uma barragem rígida-móvel na interface de um fluido incompressível, com condição de contorno IFE-A-F-A. Desta forma, a estrutura possui um movimento de corpo rígido e a formulação analítica que contempla o efeito bidimensional da cavidade é governada pela equação de Laplace ($\nabla^2 p(x,z) = 0$). Em que $p(x,y)$ é o campo de pressão na cavidade acústica. Todo procedimento de resolução da Equação de Laplace deixa de ser mencionados neste trabalho, mas podem ser minuciosamente encontradas nos trabalhos de Silva (2007) e de Ribeiro (2010).

Equivalência do ACPP com a Solução Analítica de Westergard (1933)

Westergard (1933) fez uma aproximação no campo de pressão e forneceu uma solução para pressão hidrodinâmica e para a massa adicional acoplada barragem-reservatório com as condições de contorno citadas. O campo de pressão na interface e ao longo da cavidade acústica assumido por Westergard (1933) é apresentado na Figura 6.6.

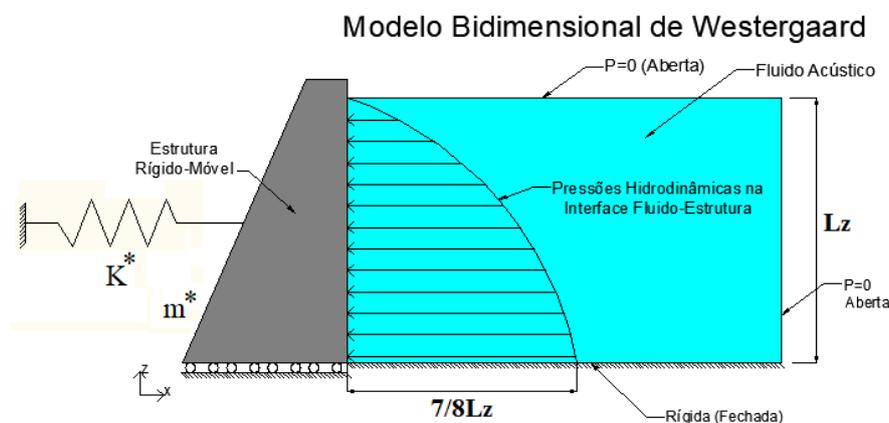


Figura 6.6: Distribuição de pressão hidrodinâmica de uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A.

A partir da Figura 6.6 pode-se observar que a estrutura da barragem tem deslocamento rígido-móvel semelhante a um sistema de um grau de liberdade. Isso condiz com a hipótese de Westergaard (1933), onde é assumido que a barragem e a fundação se movimentam juntos e, ao vibrar, introduz uma pressão na interface fluido-estrutura de forma igualitária em toda altura. Assim, tendo por base o trabalho de Westergaard (1933), a solução analítica desenvolvida por ele para o cálculo da pressão hidrodinâmica $p(0, z)$ e para massa adicional $m(0, z)$ na interface fluido-estrutura são, respectivamente, dadas por:

$$p(0, z) = \frac{7}{8} \rho_f L_z \ddot{x}_e \sqrt{1 - \frac{z}{L_z}} \quad (6.23)$$

$$m(0, z) = \frac{7}{12} \rho_f L_z^2 \ddot{x}_e \left[1 - \left(\frac{L_z - z}{L_z} \right)^{3/2} \right] \quad (6.24)$$

Onde $p(0, z)$ e $m(0, z)$ são as expressões do campo de pressão hidrodinâmica e de massa adicional na interface fluido-estrutura, respectivamente.

Ao analisar a equação da massa adicional proposta por Westergaard (1933), pode-se assumir um movimento de corpo rígido de aceleração unitária da estrutura ($\ddot{x}_e = 1$). Então, para uma altura $z = L_z$ a massa adicional é máxima. Realizando as substituições citadas, a máxima massa adicional na interface barragem-reservatório, para uma aceleração unitária, pode ser expressa por:

$$m_{a_{m\acute{a}x}} = \frac{7}{12} \rho_f L_z^2 \quad (6.25)$$

Sabendo que a resolução analítica do ACPD foi feita para uma estrutura rígido-móvel acoplada com uma cavidade IFE-A-F-F e que nela é movimentado 100% da massa adicional da cavidade ($m_a = L_z L_x \rho_f$), ao analisar a Equação 6.25 uma equivalência com a condição de contorno IFE-A-F-F pode ser obtida. Assim, igualando a máxima massa adicional de fluido no problema IFE-A-F-F com a máxima massa adicional de fluido movimentada representada pelo problema IFE-A-F-A, a equivalência pode ser expressa pela seguinte relação:

$$(m_a)_{\text{modelo analítico 1D pelo MCPP}} = (m_{a_{m\acute{a}x}})_{\text{modelo bidimensional 2D de Westergaard (1933)}}$$

Ou seja, igualando as expressões da massa adicional, tem-se que:

$$\rho_f L_z L_x = \frac{7}{12} \rho_f L_z^2 \text{ então } L_x = 0,5833 L_z$$

Portanto, para contabilizar o efeito da massa adicional no ACPD para uma estrutura rígido-móvel com condição de contorno IFE-A-F-A, o comprimento acústico longitudinal (L_x) assumido deve ser 58,33% da altura da cavidade L_z . Com isso, é possível observar que em um mesmo sistema rígido-móvel uma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-A movimenta o valor de 7/12, ou seja, 58,33% da massa adicional da mesma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-F. A equivalência entre os campos de pressão e massa adicional pode ser visualizada na Figura 6.7.

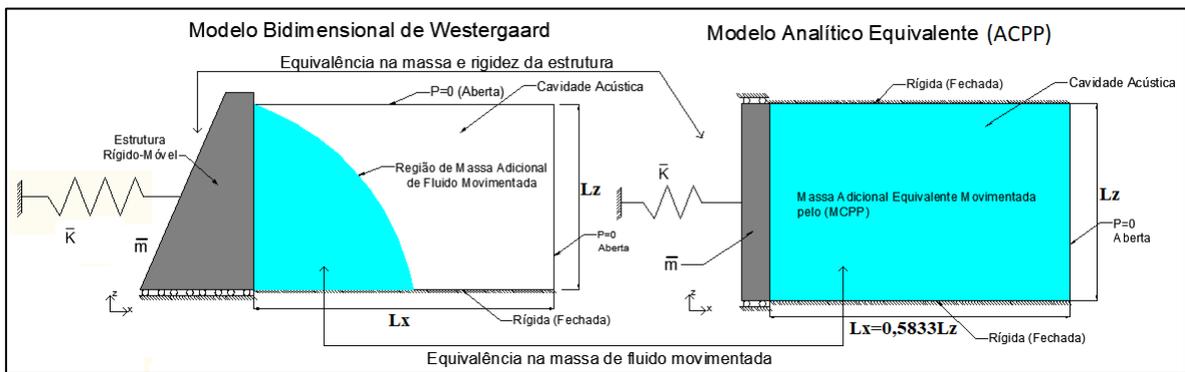


Figura 6.7: Equivalência entre a massa adicional de Westergaard (1933) para uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPD.

Além da solução analítica de Westergaard (1933), foi realizada a equivalência do ACPD com a solução analítica da Equação de Laplace realizada por Chakrabarti & Chopra (1974).

Equivalência do ACPD com a Solução Analítica de Chakrabarti & Chopra (1974)

Assumindo um campo de pressão representado pelo produto de duas funções independentes $p(x,z) = F(x).G(y)$ e aplicando a técnica de separação de variáveis na Equação de Laplace, Chakrabarti & Chopra (1974) apresentaram uma solução analítica exata em séries para o campo de pressões e massa adicional, aplicada também para uma barragem rígido-móvel acoplada com uma cavidade acústica IFE-A-F-A. A solução obtida para o problema em termos do campo de pressão (P) e da massa adicional (m) na interface barragem-reservatório são dadas por:

$$p(x, z) = \rho_f L_z \ddot{x}_e 2 \sum_{r=1}^{\infty} \frac{(-1)^{r+1}}{\mu_r^2} e^{-\mu_r \frac{x}{L_z}} \cos\left(\mu_r \frac{z}{L_z}\right) \quad (6.26)$$

$$m(0, z) = \rho_f L_z^2 \ddot{x}_e 2 \sum_{r=1}^{\infty} \frac{(-1)^{r+1}}{\mu_r^3} \text{sen} \left(\mu_r \frac{z}{L_z} \right) \quad (6.27)$$

Onde $p(x,y)$ representa o campo de pressão hidrodinâmica acoplada, r é o número de termos da série e μ_r é um coeficiente adimensional, dado por:

$$\mu_r = \frac{\pi}{2} (2r - 1); \quad r = 1, 2, 3, 4.. \quad (6.28)$$

Ao analisar a equação da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974), pode-se adotar um movimento de corpo rígido de aceleração unitária da estrutura ($\ddot{x}_e = 1$). Além disso, na Equação 6.28 da massa adicional foi possível avaliar a convergência do número de termos da série. A partir de 500 termos a série converge bem e, para uma altura $z = L_z$, a massa adicional é máxima e a Equação 6.28 pode ser expressa por:

$$m_{a\text{máx}} = 0,54275 \rho_f L_z^2 \quad (6.29)$$

A Figura 6.8 apresenta a convergência da série da Equação 6.27 e o coeficiente obtido. Alguns dos coeficientes obtidos na análise são destacados no gráfico para visualização dos valores obtidos.

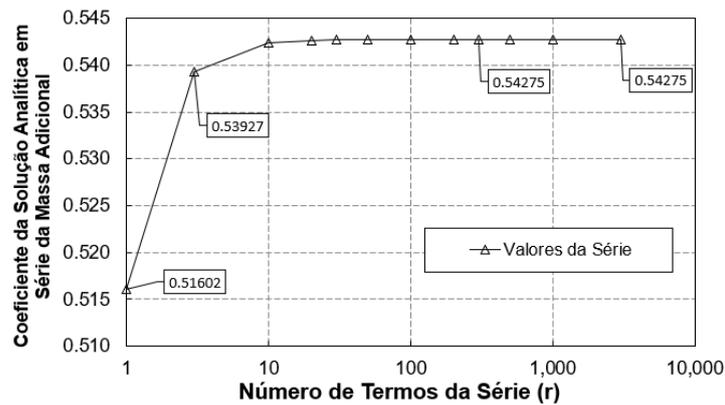


Figura 6.8: Análise da convergência da série para expressão da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974).

Prosseguindo com a análise, de maneira análoga realizado anteriormente na equivalência com a solução de Westergaard (1933), sabe-se que a resolução analítica do ACPD movimenta 100% da massa adicional da cavidade ($m_a = L_z L_x \rho_f$), ao analisar a Equação 6.29 uma equivalência com a condição de contorno IFE-A-F-A pode ser obtida. Assim, ao

igualar a máxima massa adicional de fluido no problema IFE-A-F-F com a máxima massa adicional de fluido movimentada representada pelo problema IFE-A-F-A, a equivalência pode ser expressa por:

$$(m_a)_{\text{modelo analítico 1D pelo MCPP}} = (m_{a,máx})_{\text{modelo bidimensional 2D de Chakrabarti Chopra (1974)}}$$

Ou seja, igualando as expressões da massa adicional, tem-se que:

$$\rho_f L_z L_x = 0,54275 \rho_f L_z^2 \text{ então } L_x = 0,54275 L_z$$

Portanto, para contabilizar o efeito da massa adicional no ACPP para uma estrutura rígido-móvel com condição de contorno IFE-A-F-A, com equivalência ao modelo de Chakrabarti & Chopra (1974), o comprimento acústico longitudinal (L_x) assumido deve ser 54,27% da altura da cavidade L_z . Com isso, é possível observar que em um mesmo sistema rígido-móvel uma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-A movimenta o valor de 54,27% da massa adicional da mesma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-F. A equivalência entre os campos de pressão e massa adicional pode ser visualizada na Figura 6.9.

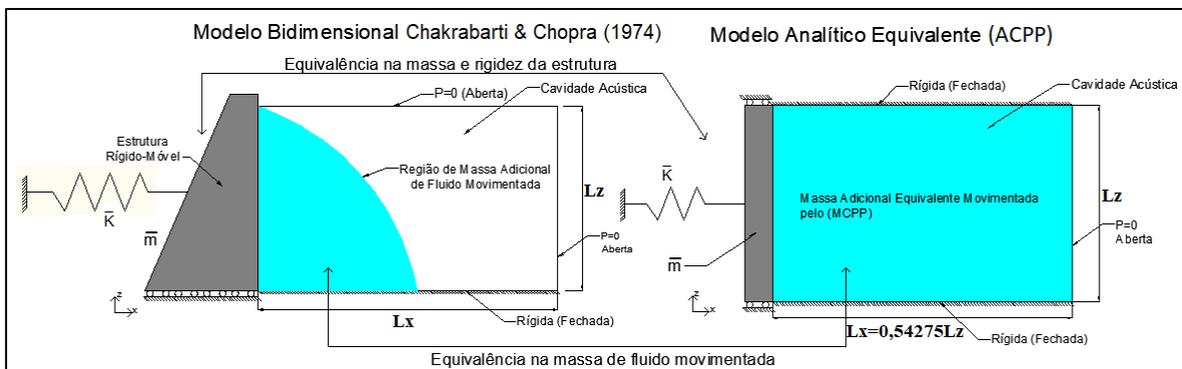


Figura 6.9: Equivalência entre a massa adicional de Chakrabarti & Chopra (1974) para uma barragem rígido-móvel acoplada com cavidade acústica F-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPP.

Por fim, além da equivalência para uma estrutura rígido-móvel acoplada com cavidade acústica de condição de contorno F-A-F-A, o efeito da flexibilidade da estrutura também pode ser contabilizado pelo ACPP, apresentado no item a seguir.

6.3.3. Solução Analítica para IFE de uma Estrutura Flexível Acoplada com uma Cavidade de Condição de Contorno F-A-F-A

Nesta etapa, pretende-se apresentar uma metodologia simplificada para análise de uma estrutura flexível acoplada com uma cavidade acústica de condição de contorno IFE-A-F-A com o uso da mesma solução analítica unidimensional ACP, impondo a deformada da estrutura por parâmetros generalizados e o acoplamento ao impor apenas uma equivalência entre a massa adicional entre ambas as condições de contorno do meio acústico.

Para isto, Chakrabarti & Chopra (1974) resolvem a equação de Laplace (fluido incompressível) para um domínio bidimensional com fronteira flexível com condição de contorno IFE-A-F-A. Neste caso, a condição na interface fluido-estrutura deixa de ser rígido móvel e passa a depender da deformada da estrutura, expressa por $\partial p / \partial \vec{n} = -\rho_f \ddot{x}_e \psi(z/L_z)$. Em que $\psi(z/L_z)$ é a deformada modal da parede flexível na interface fluido-estrutura.

Assim, a resolução da equação de Laplace (fluido incompressível) com fronteira flexível é obtida da solução analítica de Chakrabarti & Chopra (1974).

Equivalência do ACP com a Solução Analítica de Chakrabarti & Chopra (1974)

De maneira semelhante à da estrutura rígida-móvel, ao assumir um campo de pressão representado pelo produto de duas funções independentes $p(x,z) = F(x).G(y)$ e ao aplicá-lo na técnica de separação de variáveis, Chakrabarti & Chopra (1974) apresentaram também uma solução analítica exata em séries para o campo de pressões e massa adicional aplicada na Equação de Laplace que, neste caso, leva em consideração a flexibilidade da estrutura. A solução obtida para o problema em termos do campo de pressão (P) e da massa adicional (M) são expressas por:

$$p(x, z) = \rho_f \ddot{x}_e 2 \sum_{r=1}^{\infty} \frac{I_{j,r}}{\mu_r} e^{-\mu_r \frac{x}{L_z}} \cos\left(\mu_r \frac{z}{L_z}\right) \quad (6.30)$$

$$M(0, z) = \rho_f L_z \ddot{x}_e 2 \sum_{r=1}^{\infty} \frac{I_{j,r}}{\mu_r^2} \text{sen}\left(\mu_r \frac{z}{L_z}\right) \quad (6.31)$$

Onde $p(x,y)$ representa o campo de pressão hidrodinâmica acoplada, r é o número de termos da série, μ_r é um coeficiente adimensional e $I_{j,r}$ é um coeficiente que leva em consideração a deformada modal flexível na interface fluido-estrutura, dados por:

$$\mu_r = \frac{\pi}{2}(2r - 1); r = 1,2,3,4\dots \quad (6.32)$$

$$I_{j,r} = \int_0^{L_z} \psi(z/L_z) \cos\left(\mu_r \frac{z}{L_z}\right) dz \quad (6.33)$$

Ao analisar a equação da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974), pode-se também adotar uma aceleração unitária da estrutura ($\ddot{x}_e = 1$) e aplicar a função de deformada modal $\psi(z/L_z)$. Neste trabalho a função de deformada de uma viga engastada-livre (Equação 4.3) foi assumida. Com isso, ao impor a deformada de viga engastada-livre na Equação 6.33 e, em seguida, na Equação 6.31 da massa adicional e, para uma altura $z=L_z$, foi possível avaliar a convergência do número de termos da série. A partir de 500 termos a série converge bem e a massa adicional máxima pode ser expressa por:

$$m_{a\text{máx}} = 0,25243 \rho_f L_z^2 \quad (6.34)$$

A Figura 6.10 apresenta a convergência da série da Equação 6.31 e o coeficiente obtido. Alguns dos coeficientes obtidos na análise são destacados no gráfico para visualização dos valores obtidos.

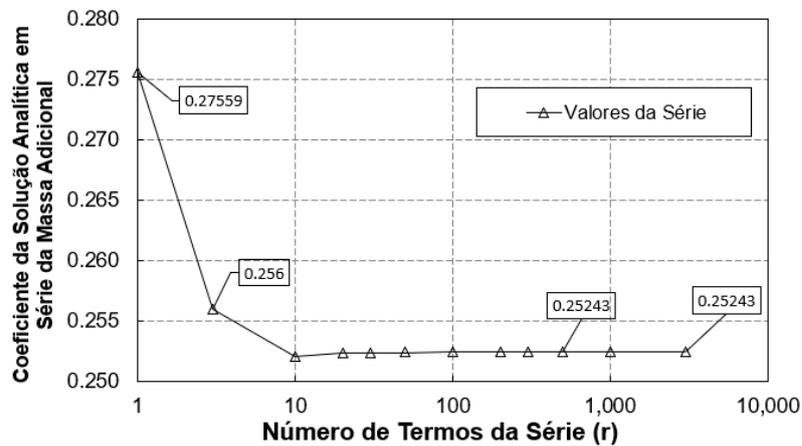


Figura 6.10: Análise da convergência da série para expressão da massa adicional proposta por Chakrabarti & Chopra (1974).

Da mesma forma que nos casos anteriores, sabendo que a resolução analítica do ACPM movimenta 100% da massa adicional da cavidade ($m_a = L_z L_x \rho_f$), ao analisar a Equação 6.34 uma equivalência pode ser obtida. Então, igualando a máxima massa adicional de fluido

no problema IFE-A-F-F com a máxima massa adicional de fluido movimentada representada pelo problema IFE-A-F-A. A equivalência pode ser expressa por:

$$(m_a)_{\text{modelo analítico 1D pelo MCPP}} = (m_{a,máx})_{\text{modelo bidimensional 2D Flexível de Chakrabarti Chopra (1974)}}$$

Ou seja, igualando as expressões da massa adicional, tem-se que:

$$\rho_f L_z L_x = 0,25243 \rho_f L_z^2 \text{ então } L_x = 0,25243 L_z$$

Portanto, para contabilizar o efeito da massa adicional no ACPD para uma estrutura flexível (engastada-livre) com condição de contorno IFE-A-F-A, com equivalência ao modelo de Chakrabarti & Chopra (1974), o comprimento acústico longitudinal (L_x) assumido deve ser 25,24% da altura da cavidade L_z .

Com isso, é possível observar que um sistema acoplado entre estrutura flexível, de deformada engastada-livre, com uma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-A, movimenta o valor de 25,24% da massa adicional da mesma cavidade com condição de contorno IFE-A-F-F com estrutura rígido-móvel.

Além disso, a rigidez generalizada e a massa generalizada devem ser aplicadas no modelo do ACPD. Com isso, as propriedades da flexibilidade da estrutura são controladas através dos parâmetros generalizados e o campo de pressão prescrito é acoplado levando em consideração essa deformada. A equivalência entre os campos de pressão e massa adicional pode ser visualizada na Figura 6.11.

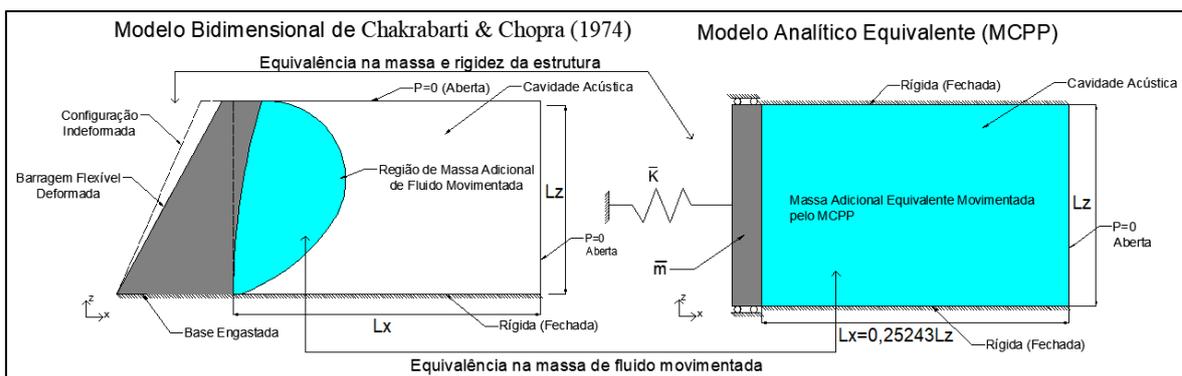


Figura 6.11: Equivalência entre a massa adicional de Chakrabarti & Chopra (1974) para uma barragem flexível acoplada com cavidade acústica IFE-A-F-A e o modelo analítico pelo ACPD.

Portanto, vale ressaltar que a metodologia de equivalência entre o modelo bidimensional e unidimensional estudado com a função de viga engastada livre apresentada, é válido no regime incompressível de modos dominantes de massa adicional do problema acoplado. Assim, além do primeiro modo fundamental, o estudo foi expandido para outros modos dominantes de massa adicional para as mesmas condições, ou seja, os coeficientes da forma modal de viga foram resolvidos, as análises das convergências realizadas e as equivalências para diferentes modos foram obtidas. Por fim, a metodologia final simplificada do ACPP é apresentada na Figura 6.12.

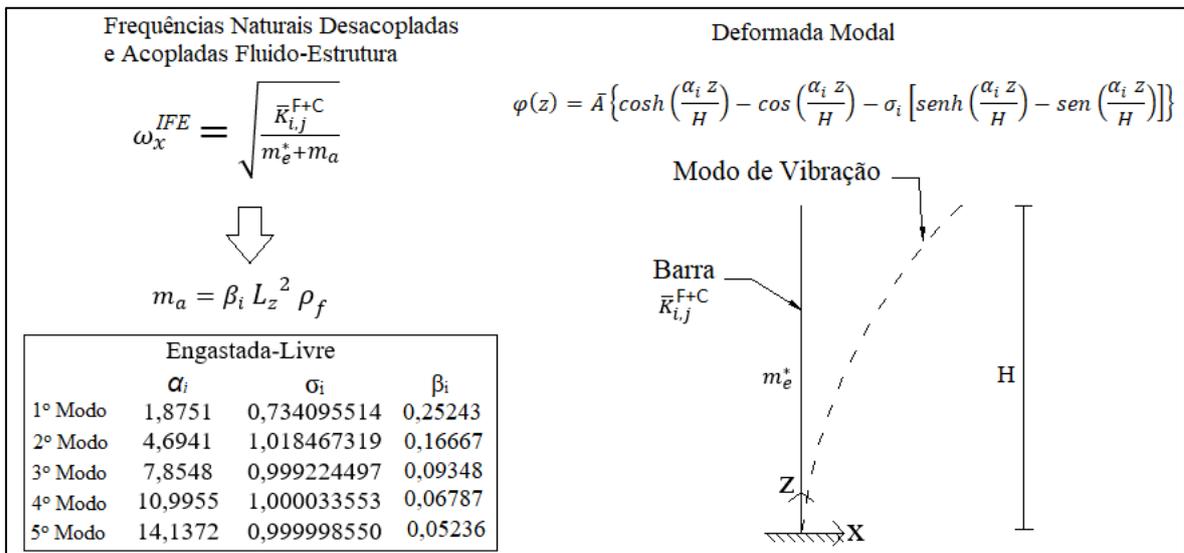


Figura 6.12: Esquema do ACPP e equivalência entre a massa adicional simplificada para condição de contorno engastada-livre e diferentes modos.

A Figura 6.12 apresenta o esquema da fórmula simplificada. É válido notar que quando a massa adicional (m_a) é igual a zero a obtenção das frequências naturais é relativa à estrutura desacoplada. Para determinar a frequência acoplada basta apenas conhecer o nível de fluido (L_z) a sua massa específica e aplicar o coeficiente β_i desenvolvido neste trabalho. Com isso, verificações de efeitos acoplados fluido-estrutura aplicado não só em barragens, mas em outras estruturas poderão ser rapidamente avaliadas com o auxílio do ACPP.

6.3.4. Aplicação do ACPP para Análise da IFE em Estruturas de Eclusas

Sabe-se que no caso da eclusa, o reservatório é confinado no seu entorno com estruturas relativamente próximas uma da outra. Então, o problema de IBR passa a se tornar um problema de IER, em que a proximidade de outra estrutura na fronteira longínqua altera o comportamento do conjunto acoplado fluido-estrutura. As estruturas de eclusas são flexíveis

e podem vibrar em oposição de fase (OP - sentidos diferentes) e em fase (F - mesmo sentido), criando um campo de pressão hidrodinâmica impulsiva que pode ou não se sobrepor em relação as duas interfaces fluido-estrutura. A Figura 6.13 apresenta os modos em oposição de fase e em fase em uma eclusa de inércia constante.

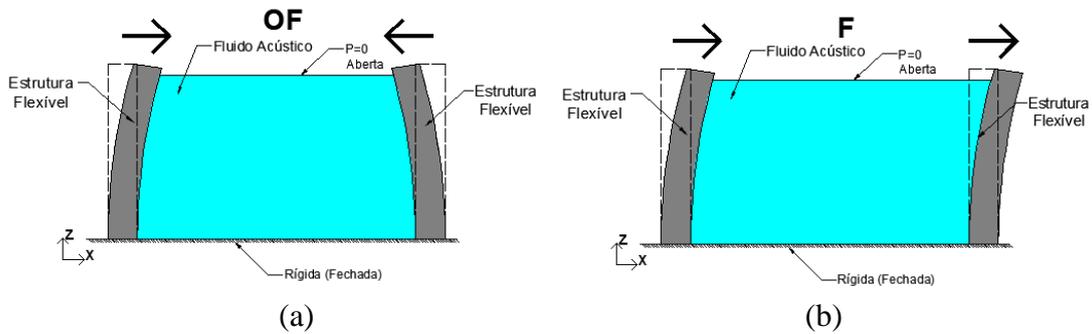


Figura 6.13: Esquema de Eclusa: (a) modo em oposição de fase e (b) modo em fase.

Dito isso, pode-se afirmar que, de uma forma geral, o estudo da IER é similar ao estudo da IBR, devendo ser analisado algumas particularidades, tais como: a interferência dos campos de pressão hidrodinâmica gerados pelas vibrações de ambas as estruturas e a faixa de frequência do reservatório desacoplado tanto para condição de contorno F-F-F-A quanto para a condição F-A-F-A.

Nesse sentido, a proximidade das estruturas pode fazer com que um campo de pressão influencie no outro e vice-versa. Então, cada projeto de eclusa deve ser analisado minuciosamente. Portanto, toda formulação analítica desenvolvida para o ACPP será confrontada com o MEF nas aplicações em eclusas.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados a formulação analítica para IFE do ACPP. O ACPP apresentado é uma metodologia de cálculo simples que pode ser facilmente utilizada para fins práticos e rápidos em estimativas de frequências naturais em barragens e eclusas de concreto de gravidade. Para demonstrar a potencialidade do ACPP, um esquema com as etapas do método pseudo-dinâmico desenvolvido por Chopra (1978), que foi apresentado no capítulo 2.3, e do Artifício do Campo de Pressão Prescrito, desenvolvido neste trabalho, são apresentados na Figura 6.14.

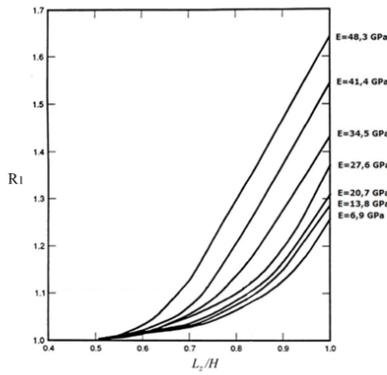
Método Pseudo-Dinâmico

1º Etapa: Determinar o período e a frequência natural fundamental da estrutura desacoplada

$$T_s = 0,01206 \frac{H}{\sqrt{E}}$$

2º Etapa: Utilizar um ábaco para determinar o parâmetro R1 e calcular o período e a frequência natural fundamental da barragem acoplada com fluido

$$\hat{T}_s = R_1 T_s$$



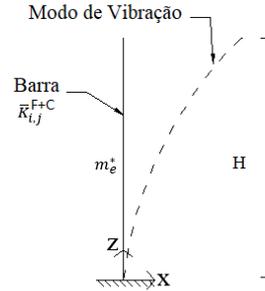
Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP)

1º Etapa: Calcular os parâmetros generalizados (massa e rigidez) da estrutura associados ao modo de vibração desejado, sendo com inércia constante ou inércia variável (expressa pelas funções lineares).

2º Etapa: Determinar a massa adicional com base na altura de fluido (Lz) represada na interface da barragem associada ao modo de vibração desejado.

$$m_a = \beta_i L_z^2 \rho_f$$

| Engastada-Livre | | | |
|-----------------|------------|-------------|-----------|
| | α_i | σ_i | β_i |
| 1º Modo | 1,8751 | 0,734095514 | 0,25243 |
| 2º Modo | 4,6941 | 1,018467319 | 0,16667 |
| 3º Modo | 7,8548 | 0,999224497 | 0,09348 |
| 4º Modo | 10,9955 | 1,000033553 | 0,06787 |
| 5º Modo | 14,1372 | 0,999998550 | 0,05236 |



Deformada Modal

$$\varphi(z) = \bar{A} \left\{ \cosh\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \cos\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \sigma_i \left[\sinh\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) - \sin\left(\frac{\alpha_i z}{H}\right) \right] \right\}$$

3º Etapa: Calcular as frequências naturais da estrutura desacoplada ($m_a=0$) ou as frequências naturais acoplada fluido-estrutura de massa adicional associada ao modo de vibração desejado.

$$\omega_x^{IFE} = \sqrt{\frac{\bar{K}_{i,j}^{F+C}}{m_e^* + m_a}}$$

Figura 6.14 - Esquema com a sequência de cálculo do Método Pseudo-Dinâmico e do Artifício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP).

Através da Figura 6.14 pode-se observar que, o ACPP quando comparado ao método pseudo-dinâmico, demonstra abranger a variação de rigidez (elasticidade), a variação inercial (geometria), bem como diferentes frequências associadas aos modos de vibração da estrutura. No ACPP, se a estrutura acoplada com fluido for esbelta, a massa e rigidez generalizada é igual a massa e rigidez flexional, na qual pode ser obtida de forma simples em diversos livros de dinâmica estrutura. Caso a estrutura seja espessa, a rigidez e a massa generalizada podem ser facilmente obtidas pela composição em série das frequências flexional e cisalhante, conforme explicadas no capítulo 4. Com isso, o ACPP incorpora a variação de elasticidade, de inércia e engloba na análise possibilidade de simulação desde estruturas esbeltas a espessas, tornando uma vantagem em análises acopladas fluido-estrutura em relação ao método pseudo-dinâmico.

Além disso, no ACPP a massa adicional de fluido pode ser obtida para diferentes modos de vibração e depende apenas da altura de fluido represada. Isso também traz um aspecto prático da formulação em relação ao método pseudo-dinâmico. Portanto, pode-se afirmar que o ACPP demonstra potencialidade para determinar as frequências desacopladas e acopladas em problemas de interação fluido-estrutura.

7. FORMULAÇÃO NUMÉRICA E ASPECTOS COMPUTACIONAIS

7.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os aspectos computacionais utilizados na análise numérica através do *software* ANSYS®. A análise é baseada no método dos elementos finitos, que é caracterizado por ser um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno. Em outras palavras, o MEF possibilita resolver equações diferenciais governantes sobre um domínio qualquer transformando-as em um sistema algébrico de equações aproximadas. Com o uso do MEF, neste trabalho, é possível determinar a resposta dinâmica dos sistemas em estudo e comparar com os valores obtidos pelos resultados experimentais e das técnicas analíticas, quando disponíveis.

Nos tópicos deste capítulo; as equações básicas da teoria da elasticidade, que regem o comportamento elástico da estrutura, e a formulação numérica aplicada no domínio da estrutura; no meio acústico (fluido) e para a interação fluido-estrutura (formulação U-P) são apresentadas. Toda formulação numérica U-P, empregada neste trabalho e que é utilizada no *software* ANSYS®, foi estudada e repertoriada com base nos trabalhos de Pedroso (1994) e Pedroso (2003).

7.2. FORMULAÇÃO NUMÉRICA PARA INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

A análise para o problema acoplado fluido-estrutura no ANSYS® é baseada na formulação denominada U-P, ou seja, o deslocamento para estrutura e a pressão para o fluido são assumidas como incógnitas. O fluido é modelado por um campo de pressão com a formulação provinda a partir da resolução da equação da onda através do método de Galerkin. A estrutura é descrita por variáveis de deslocamento, uma vez que surge no sistema final uma matriz de acoplamento que permite a interação e resolução do sistema acoplado.

7.2.1. Montagem das Matrizes Estruturais pelo MEF

O princípio de conservação de energia está relacionado ao desenvolvimento do MEF e traz que uma variação virtual devido ao trabalho externo das cargas aplicadas deve ser compensada por uma variação similar da energia de deformação interna no corpo submetido a esse carregamento, ou seja, diante qualquer estado de tensão aplicado em um sólido, ele

irá absorver essa energia e impor um equilíbrio (estático ou dinâmico) através de energia interna de deformação (teoricamente sem perdas de energia). Assim, temos que:

$$\delta S = \delta W \quad (7.1)$$

Onde S é a energia de deformação interna, W é o trabalho externo e δ o operador virtual. A energia de deformação interno e o trabalho externo podem ser expandidos para:

$$S = S_1 + S_2 \quad (7.2)$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (7.3)$$

Onde S_1 é a energia de deformação interna, S_2 é a energia de deformação que ocorre quando uma superfície se move contra uma resistência distribuída, ou seja, semelhante a um apoio elástico contínuo, W_1 é o trabalho externo que considera os efeitos inerciais, W_2 é o trabalho externo que considera força de pressão e W_3 são forças nodais concentradas externas.

A energia de deformação interna (S_1) é expressa por:

$$\delta S_1 = \int_V \{\delta \varepsilon\} \{\sigma\} (dV)^T \quad (7.4)$$

Onde $\{\varepsilon\}$ é o vetor de deformação, $\{\sigma\}$ é o vetor de tensão e dV é o diferencial de volume do elemento. Sabendo que a lei de Hooke generalizada é dada por $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$, a Equação (7.4) da energia de deformação interna pode ser reescrita por:

$$\delta S_1 = \int_V (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (7.5)$$

As deformações podem ser relacionadas com os deslocamentos nodais, de forma que:

$$\{\varepsilon\} = [B_u]\{u\} \quad (7.6)$$

Em que $[B_u]$ é a matriz deslocamento-deformação que é baseada nas funções interpoladoras (aproximadas) do elemento finito e $\{u\}$ é o vetor de deslocamento nodal. A matriz deslocamento-deformação tridimensional é expressa por:

$$[B_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} [N_u] \quad (7.7)$$

Onde $[N_u]$ é a matriz das funções de forma. Então, substituindo a Equação (7.6) na Equação (7.5), esta última pode ser reescrita por:

$$\delta S_1 = \{\delta u\}^T \int_V [B_u]^T [D] [B_u] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int_V [B_u]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (7.8)$$

No tocante a energia de deformação que ocorre quando uma superfície se move contra uma resistência distribuída (S_2), que é assimilada a rigidez de uma mola elástica de fundação, sendo expressa por:

$$\delta S_2 = \int_A \{\delta w_n\}^T \{\sigma\} dA \quad (7.9)$$

Onde w_n é o movimento normal à superfície (espécie de deslocamento elástico de fundação), $\{\sigma\}$ é o vetor da tensão realizada pela superfície e dA é o diferencial da área de abrangência da resistência distribuída. O deslocamento normal está relacionado ao deslocamento nodal por:

$$\{w_n\} = [N_n] \{u\} \quad (7.10)$$

Onde $[N_n]$ é a matriz das funções de forma para movimentos normais à superfície. O vetor tensão $\{\sigma\}$ pode ser relacionado com uma rigidez elástica da fundação k_n , que é expressa em unidades de força por comprimento por unidade de área. Então, temos que:

$$\{\sigma\} = k_n \{w_n\} \quad (7.11)$$

Assim, substituindo as Equações (7.10) e (7.11) na Equação (7.9), e ainda, assumindo que k_n é uma rigidez constante sobre a área, temos que:

$$\delta S_2 = \{\delta u\}^T k_n \int_A [N_n]^T [N_n] dA \{u\} \quad (7.12)$$

Quanto ao trabalho externo que considera os efeitos inerciais W_1 , ele é expresso por:

$$\delta W_1 = - \int_V \{\delta w\}^T \frac{\{F^{accel}\}}{V} dV \quad (7.13)$$

Onde $\{w\}$ é o vetor de deslocamentos de um ponto geral e $\{F^{accel}\}$ é o vetor força aceleração, V é o volume do elemento. Com base na segunda Lei de Newton, temos que:

$$\frac{\{F^{accel}\}}{V} = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{w\} \quad (7.14)$$

Em que ρ é a densidade da estrutura e t é o tempo. Os deslocamentos no elemento são relacionados com deslocamentos nodais por:

$$\{w\} = [N_u] \{u\} \quad (7.15)$$

Então, substituindo as Equações (7.15) e (7.14) na Equação (7.13), esta última pode ser reescrita por:

$$\delta W_1 = -\{\delta u\}^T \rho \int_V [N_u]^T [N_u] dV \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} \quad (7.16)$$

A energia do trabalho externo que considera força de pressão W_2 é dada por:

$$\delta W_2 = \int_{A_p} \{\delta w_n\}^T \{P\} dA_p \quad (7.17)$$

Onde $\{P\}$ é um vetor de pressão aplicada normal a superfície externa de cada elemento e dA_p é o diferencial da área em que a pressão atua. Sabendo que os deslocamentos no elemento normais são relacionados com deslocamentos nodais pela Equação (7.10), então a Equação (7.17) pode ser reescrita por:

$$\delta W_2 = \{\delta u\}^T \int_{A_p} [N_n]^T \{P\} dA_p \quad (7.18)$$

A energia do trabalho externo que considera força concentrada nodal W_3 é dada por:

$$\delta W_3 = \{\delta u\}^T \{F_e^{nd}\} \quad (7.19)$$

Em que $\{F_e^{nd}\}$ é o vetor de forças nodais aplicadas ao elemento.

Por fim, as Equações (7.8), (7.12), (7.16), (7.18) e (7.19) podem ser substituídas no equilíbrio de energia (conservação da energia) dado pela Equação (7.1), chegando-se a:

$$\begin{aligned} & \{\delta u\}^T \int_V [B_u]^T [D] [B_u] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int_V [B_u]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV + \{\delta u\}^T k_n \int_A [N_n]^T [N_n] dA \{u\} \\ & = -\{\delta u\}^T \rho \int_V [N_u]^T [N_u] dV \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} \\ & + \{\delta u\}^T \int_{A_p} [N_n]^T \{P\} dA_p + \{\delta u\}^T \{F_e^{nd}\} \end{aligned} \quad (7.20)$$

Observa-se na Equação (7.20) acima que o termo $\{\delta u\}^T$ é um conjunto de deslocamentos virtuais comuns em todos os termos da equação. Então, dividindo todos os termos da Equação (7.20) por $\{\delta u\}^T$ a Equação (7.20) reduz-se a:

$$([K_E] + [K_E^f])\{u\} - \{F_e^{th}\} = -[M_E]\{\ddot{u}\} + \{F_e^{pr}\} + \{F_e^{nd}\} \quad (7.21)$$

Onde:

$$[K_E] = \int_V [B_u]^T \cdot [D] \cdot [B_u] \cdot dV \quad (7.22)$$

$$[K_E^f] = k \int_A [N_n]^T \cdot [N_n] \cdot dA \quad (7.23)$$

$$\{F_e^{th}\} = \int_V [B_u]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon^{th}\} \cdot dV \quad (7.24)$$

$$[M_E] = \rho \int_V [N_u]^T \cdot [N_u] \cdot dV \quad (7.25)$$

$$\{\ddot{u}\} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} \quad (7.26)$$

$$\{F_e^{pr}\} = \int_{A_p} [N_n]^T \{P\} dA_p \quad (7.27)$$

Ao desconsiderar na Equação (7.21) o termo $[K_E^f]$ e o efeito térmico expresso por $\{F_e^{th}\}$, logo em seguida agrupando os vetores de carga e considerando uma força devido a resistências friccionais opostas ao movimento, a equação geral pode ser reescrita por:

$$[M_E]\{\ddot{u}\} + [C_E]\{\dot{u}\} + [K_E]\{u\} = \{F\} \quad (7.28)$$

Em que $[M_E]$ é a matriz de massa da estrutura, $\{\ddot{u}\}$ é o vetor de aceleração nodal, $[C_E]$ é a matriz de amortecimento estrutural, $\{\dot{u}\}$ é o vetor de velocidade nodal, $[K_E]$ é a matriz de rigidez estrutural, $\{u\}$ é o vetor de deslocamento nodal estrutural e $\{F\}$ é um vetor de forças externas quaisquer. As matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura são definidas por:

$$[M_E] = \int_V \rho [N_u]^T \cdot [N_u] \cdot dV \quad (7.29)$$

$$[C_E] = \int_V [N_u]^T \cdot \mu_E [N_u] \cdot dV \quad (7.30)$$

$$[K_E] = \int_V [B_u]^T \cdot [D] \cdot [B_u] \cdot dV \quad (7.31)$$

Onde $[B_u]$ é a matriz da derivada das funções de forma do elemento, $[D]$ é a matriz elástica tensão-deformação, $[N_u]$ é a matriz de funções de forma do elemento estrutural, μ_E é um parâmetro de viscosidade do material estrutural que impõe uma resistência do tipo viscosa constante no material, dV é diferencial de volume, ρ é a massa específica do material estrutural e o índice T significa transposta na matriz.

O amortecimento apresentado na Equação (7.30) trata-se de um amortecimento do tipo coeficiente de amortecimento constante do material. Uma outra opção de analisar a matriz de amortecimento estrutural é utilizar o clássico amortecimento de Rayleigh, sendo dois coeficientes (α e β) utilizados para definir as constantes e, conseqüentemente, a matriz de amortecimento. O amortecimento de Rayleigh é expresso por:

$$[C_E] = \alpha. [M_E] + \beta. [K_E] \quad (7.32)$$

Em que os coeficientes (α e β) são calculados das razões de amortecimento modal (ζ_i). Essa razão de amortecimento modal (ζ_i) é a razão entre o amortecimento real e o amortecimento crítico para um modo de vibração particular i . Então, se ω_i é uma frequência natural do modo i , α e β satisfazem a relação expressa por:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (7.33)$$

7.2.2. Equação de Movimento da Estrutura com Pressões do Fluido na Interface Fluido-Estrutura

Num primeiro momento, a interação parte da equação clássica de movimento da estrutura, sendo o fluido incorporado como uma força. Por tudo isso, a equação de movimento da estrutura é dada por:

$$[M_E]\{\ddot{u}\} + [C_E]\{\dot{u}\} + [K_E]\{u\} = \{F\} + \{F_I\} \quad (7.34)$$

Onde $\{F_I\}$ é o vetor de forças decorrente às pressões do fluido na região de interface fluido-estrutura. Em problemas de análise estática a Equação (7.34) é reduzida para $[K_E]\{u\} = \{F\} + \{F_I\}$. Para o problema desacoplado a Equação (7.34) apresentada tem o efeito do fluido desprezado, ou seja, $\{F_I\} = 0$. Na equação de movimento da estrutura, o vetor de forças do fluido $\{F_I\}$ aplicado na interface do acoplamento é obtido realizando a integração da pressão do fluido na superfície de contato, sendo dado por:

$$\{F_I\} = \int_S \{N_u\} P \{n\} dS \quad (7.35)$$

Onde $\{N_u\}$ são as funções de forma interpoladoras utilizadas para discretizar as componentes de deslocamentos u , v , w da estrutura, P é a pressão do fluido, $\{n\}$ é o vetor na direção normal à superfície e dS é o diferencial de superfície. Destaca-se ainda que os deslocamentos da estrutura e a pressão do fluido são regidos pelas Equações (7.36) e (7.37), respectivamente.

$$U = \{N_u\}^T \{u\} \quad (7.36)$$

$$P = \{N_p\}^T \{p\} \quad (7.37)$$

Em que o vetor $u = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots \ u_i \ v_i \ w_i]$ representa os deslocamentos nodais no elemento, onde u_i , v_i e w_i corresponde aos deslocamentos do nó i , nas direções x , y e z , respectivamente. De maneira paralela a isto, $p = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_N]$ representa as pressões que estão vinculadas às variáveis nodais no elemento do fluido. Assim, substituindo a Equação (7.37) na equação (7.35) tem-se que:

$$\{F_I\} = \int_S \{N_u\} \{N_p\}^T \{n\} dS \{p\} \quad (7.38)$$

Por definição, a matriz de acoplamento $[FS]$ relaciona a pressão de o fluido e as forças sobre a interface fluido-estrutura. Portanto, com base na Equação (7.38) pode-se notar que a integração na superfície de $\int_S \{N_u\} \{N_p\}^T \{n\} dS$ representa a matriz fluido-estrutura $[FS]$ para o sistema acoplado, então:

$$\{F_I\} = [FS]\{p\} \quad (7.39)$$

Desta forma, substituindo a Equação (7.39) na Equação (7.34), à equação de movimento da estrutura para o problema acoplado pode ser reescrita, de uma forma geral, como:

$$[M_E]\{\ddot{u}\} + [C_E]\{\dot{u}\} + [K_E]\{u\} - [FS]\{p\} = \{F\} \quad (7.40)$$

7.2.3. Equação da Onda Acústica (Helmholtz) para Meios Fluidos com Deslocamentos da Estrutura na Interface Fluido-Estrutura

De maneira paralela a resolução da equação de movimento da estrutura com as forças nodais de pressão do fluido, a equação da onda é resolvida aplicando-se o método de Galerkin com a discretização por elementos finitos, correlacionando a variação de pressão na interface da cavidade com os deslocamentos da estrutura através da matriz de acoplamento. A equação da onda acústica que governa a distribuição de pressões em meios acústicos, bem como sua evolução no tempo é expressa por:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \ddot{P} = 0 \quad (7.41)$$

Onde P é a pressão, $\nabla^2 p$ é o operador laplaciano de pressão e c é a velocidade do som no meio fluido. A Equação (7.41) deve satisfazer algumas condições de contorno. A Figura 7.1 ilustra um típico sistema de interação fluido-estrutura, em que o reservatório, com suas condições de contorno apropriadas, acopla com uma barragem. Possibilidades de distintas condições de contorno do domínio acústico são apresentadas.

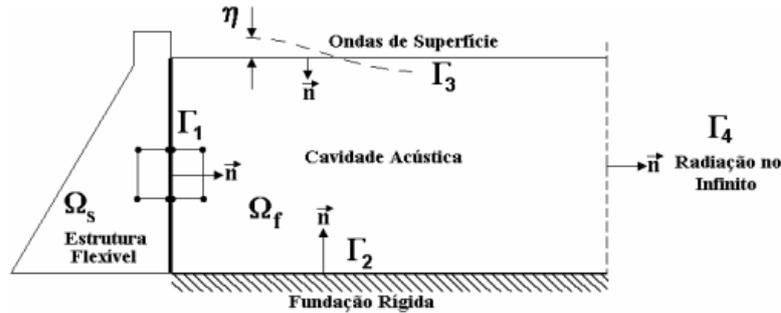


Figura 7.1: Exemplo de sistema de interação barragem-reservatório (PEDROSO, 2003).

Na Figura 7.1 é possível observar o domínio da estrutura (Ω_s) e o domínio do fluido (Ω_f). O domínio do problema barragem-reservatório possui quatro interfaces, sendo: Γ_1 interface com uma estrutura, Γ_2 interface com contorno rígido, Γ_3 superfície livre e Γ_4 interface de fronteira longínqua. Diferentes condições de contorno podem ser assumidas nas interfaces, sendo expressas no Quadro 7.1 a seguir, onde \vec{n} é o vetor normal com a superfície Γ e g é a aceleração da gravidade.

Quadro 7.1– Condições de contorno gerais no problema acoplado barragem-reservatório.

| Domínio | Descrição dos Contornos | Equação da Condição de Contorno |
|-----------------------|---|---|
| Barragem-Reservatório | Interface fluido-estrutura (Γ_1) | $\frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = -\rho_f \ddot{U}(t)$ |
| | Interface com contorno rígido (Γ_2) | $\frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = 0$ |
| | Superfície livre com pressão nula (Γ_3) | $p = 0$ |
| | Superfície livre com ondas de gravidade (Γ_3) | $\frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = -\frac{1}{g} \ddot{p}$ |
| | Fronteira longínqua com pressão nula (Γ_4) | $p = 0$ |
| | Fronteira longínqua com radiação no infinito (Γ_4) | $\frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = -\frac{1}{c} \dot{p}$ |

Aplicando o método de Galerkin na equação da onda e aproximando as pressões exatas no fluido “ P ” por “ \hat{p} ” surge um erro residual (ϵ) em relação a equação da onda.

$$\epsilon = \nabla^2 \hat{p} - \frac{1}{c^2} \ddot{\hat{p}} \neq 0 \quad (7.42)$$

Com base no método de Galerkin, ao integrar o produto do erro (ϵ) com a função aproximada “ \hat{p} ” em todo o domínio fluido o resultado é zero, sendo esta denominada condição de ortogonalidade. A condição é expressa por:

$$\int_{\Omega_f} \epsilon \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = 0 \quad (7.43)$$

Substituindo o erro expresso pela Equação (7.42) na Equação (7.43) temos que:

$$\int_{\Omega_f} \left(\nabla^2 \hat{p} - \frac{1}{c^2} \ddot{\hat{p}} \right) \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = 0 \quad (7.44)$$

Desenvolvendo e separando em duas integrais, temos:

$$\int_{\Omega_f} \nabla^2 \hat{p} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f - \int_{\Omega_f} \frac{1}{c^2} \ddot{\hat{p}} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = 0 \quad (7.45)$$

Ao analisar a Equação (7.45), temos que a primeira integral pode ser resolvida aplicando uma integração por partes em duas dimensões, dada pelo teorema de Green-Gauss. O resultado é expresso por:

$$\int_{\Omega_f} \nabla^2 \hat{p} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = - \int_{\Omega_f} \nabla \hat{p} \cdot \nabla \hat{p} \cdot d\Omega_f + \int_{\Gamma} \nabla \hat{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma \quad (7.46)$$

A segunda integral da Equação (7.45) acima é avaliada no contorno da cavidade acústica, ou seja, essa integral deve ser separada tendo em vista os tipos de condição de contorno. Assim a Equação (7.46) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_f} \nabla^2 \hat{p} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = & - \int_{\Omega_f} \nabla \hat{p} \cdot \nabla \hat{p} \cdot d\Omega_f + \int_{\Gamma_1} \nabla \hat{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_1 + \int_{\Gamma_2} \nabla \hat{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_2 \\ & + \int_{\Gamma_3} \nabla \hat{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_3 + \int_{\Gamma_4} \nabla \hat{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_4 \end{aligned} \quad (7.47)$$

Condições de Contorno Para Interação Barragem-Reservatório

Para a interação barragem-reservatório opta-se pela montagem do sistema com as condições de contorno “mais abrangentes”, ou seja, a consideração das condições de superfície livre *sloshing* e de irradiação no infinito na fronteira longínqua foram consideradas. Vale ressaltar que, caso as condições de contorno na superfície livre e na fronteira longínqua for assumida de pressão nula ($P=0$), as integrais de superfície Γ_3 e Γ_4 são desprezadas. Nesta fase, essas condições de contorno são levadas em consideração, pois posteriormente no sistema matricial final, tanto a matriz de superfície livre quanto a matriz de radiação pode ser desprezada, caso seja necessário.

Então, substituindo nas suas integrais de contorno as equações que contemplam as condições de contorno (Figura 7.1), tais como: interação fluido-estrutura na superfície Γ_1 , interface com contorno rígido em Γ_2 , ondas de gravidade na superfície livre Γ_3 e condição de irradiação no infinito na superfície Γ_4 , a Equação (7.47) pode ser reescrita por:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_f} \nabla^2 \hat{p} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = & - \int_{\Omega_f} \nabla \hat{p} \cdot \nabla \hat{p} \cdot d\Omega_f - \int_{\Gamma_1} \rho_f \cdot \ddot{\hat{U}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_1 - \int_{\Gamma_3} \frac{1}{g} \cdot \ddot{\hat{p}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_3 \\ & - \int_{\Gamma_4} \frac{1}{c} \cdot \dot{\hat{p}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_4 \end{aligned} \quad (7.48)$$

Portanto, substituindo a Equação (7.48) na primeira integral da Equação (7.45) temos que:

$$\begin{aligned} - \int_{\Omega_f} \nabla \hat{p} \cdot \nabla \hat{p} \cdot d\Omega_f - \int_{\Gamma_1} \rho_f \cdot \ddot{\hat{U}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_1 - \int_{\Gamma_3} \frac{1}{g} \cdot \ddot{\hat{p}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_3 \\ - \int_{\Gamma_4} \frac{1}{c} \cdot \dot{\hat{p}} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_4 - \int_{\Omega_f} \frac{1}{c^2} \ddot{\hat{p}} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = 0 \end{aligned} \quad (7.49)$$

Discretização pelo Método dos Elementos Finitos

Os deslocamentos na estrutura “ U ” e as pressões no fluido “ P ” são aproximadas, respectivamente, pelas funções \hat{u} e \hat{p} . Essas funções aproximadas são dadas em função dos deslocamentos $\{u\}$ e pressões nodais $\{p\}$, através de matrizes com funções de forma $[Nu]$ e $[Np]$ adequadas para o problema. Então, temos que:

$$\mathbf{U} \approx \hat{\mathbf{u}} = [N_u] \cdot \{u\} \quad (7.50)$$

$$\mathbf{P} \approx \hat{\mathbf{p}} = [N_p] \cdot \{p\} \quad (7.51)$$

As derivadas das pressões podem ser aproximadas da seguinte forma:

$$\nabla p \approx \nabla \hat{p} = \nabla [N_p] \cdot \{p\} = \{L\} \cdot [N_p] \cdot \{p\} = [B_p] \cdot \{p\} \quad (7.52)$$

Onde $\{L\}$ é o vetor de derivadas $\{L\} = \{\partial/\partial x \ \partial/\partial y\}^T$ e $[B_p]$ é a matriz das derivadas das funções de forma de pressão do fluido. Com isso, aplicando as Equações (7.50), (7.51) e (7.52) na Equação (7.49) pode-se transformar cada uma das integrais desta última equação em sistemas matriciais, expressos por:

$$\int_{\Omega_f} \nabla \hat{p} \cdot \nabla \hat{p} \cdot d\Omega_f = \{p\}^T \int_{\Omega_f} [B_p]^T \cdot [B_p] \cdot d\Omega_f \cdot \{p\} = \{p\}^T \cdot [K_f] \cdot \{p\} \quad (7.53)$$

$$\int_{\Omega_f} \frac{1}{c^2} \ddot{p} \cdot \hat{p} \cdot d\Omega_f = \{p\}^T \int_{\Omega_f} \frac{1}{c^2} \cdot [N_p]^T \cdot [N_p] \cdot d\Omega_f \cdot \{\ddot{p}\} = \{p\}^T \cdot \frac{1}{c^2} \cdot [M_f] \cdot \{\ddot{p}\} \quad (7.54)$$

$$\int_{\Gamma_1} \rho_f \cdot \ddot{u} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_1 = \{p\}^T \int_{\Gamma_1} \rho_f \cdot [Nu]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_1 \cdot \{\ddot{u}\} = \{p\}^T \cdot [FS]^T \cdot \{\ddot{u}\} \quad (7.55)$$

$$\int_{\Gamma_3} \frac{1}{g} \cdot \ddot{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_3 = \{p\}^T \int_{\Gamma_3} \frac{1}{g} \cdot [Np]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_3 \cdot \{\ddot{p}\} = \{p\}^T \cdot [SL] \cdot \{\ddot{p}\} \quad (7.56)$$

$$\int_{\Gamma_4} \frac{1}{c} \cdot \dot{p} \cdot \vec{n} \cdot \hat{p} \cdot d\Gamma_4 = \{p\}^T \int_{\Gamma_4} \frac{1}{c} \cdot [Np]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_4 \cdot \{\dot{p}\} = \{p\}^T \cdot [R] \cdot \{\dot{p}\} \quad (7.57)$$

Portanto, substituindo as Equações (7.53) a (7.57) na Equação (7.45), dividindo todos os termos dos dois lados da igualdade por $\{p\}^T$ e organizando os termos, chega-se à equação de movimento da cavidade acústica em termos das condições de fronteiras impostas. Tal equação de movimento do fluido é dada por.

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [SL]\{\ddot{p}\} + [R]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} + \rho_f \cdot [FS]^T \{\ddot{u}\} = 0 \quad (7.58)$$

Onde $[K_f]$ é a matriz de rigidez do fluido, $[M_f]$ é a matriz de massa do fluido, $[FS]^T$ é a matriz de acoplamento fluido estrutura (transposta), $[SL]$ é a matriz de superfície livre de ondas de gravidade e $[R]$ é a matriz de radiação no infinito.

$$[M_f] = \int_{\Omega_f} [Np]^T \cdot [Np] \cdot d\Omega_f \quad (7.59)$$

$$[SL] = \int_{\Gamma_3} \frac{1}{g} \cdot [Np]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_3 \quad (7.60)$$

$$[R] = \int_{\Gamma_4} \frac{1}{c} \cdot [Np]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_4 \quad (7.61)$$

$$[K_f] = \int_{\Omega_f} [Bp]^T \cdot [Bp] \cdot d\Omega_f \quad (7.62)$$

$$[FS]^T = \int_{\Gamma_1} [Nu]^T \cdot \vec{n} \cdot [Np] \cdot d\Gamma_1 \quad (7.63)$$

7.2.4. Montagem do Problema Acoplado Barragem-Reservatório

Na consideração do efeito acoplado barragem-reservatório as equações de movimento da estrutura e do fluido são resolvidas simultaneamente. As duas equações, discretizadas pelo MEF, são expressas concomitantemente por:

$$[M_E]\{\ddot{u}\} + [C_E]\{\dot{u}\} + [K_E]\{u\} - [FS]\{p\} = \{F\} \quad (7.64)$$

$$[M_f]\{\ddot{p}\} + [SL]\{\ddot{p}\} + [R]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} + \rho_f \cdot [FS]^T\{\ddot{u}\} = 0 \quad (7.65)$$

As equações acima podem ser arranjadas em um único sistema matricial, dado por:

$$\begin{bmatrix} [M_E] & 0 \\ \rho_f \cdot [FS]^T & [M_f] + [SL] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_E] & 0 \\ 0 & [R] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_E] & -[FS] \\ 0 & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (7.66)$$

A Equação (7.66) representa a denominada formulação U-P e abrange o caso mais completo para o problema de interação fluido-estrutura. No entanto, caso a condição de superfície livre e/ou radiação no infinito seja adotada por pressão nula ($P=0$), as matrizes de superfície livre $[SL]$ e de radiação no infinito $[R]$ podem ter valores assumidos iguais a zero. Vale observar que a formulação U-P contempla matrizes de massa e rigidez não simétricas, o que aumenta o custo computacional.

Para o caso de vibrações livres não amortecidas, sabe-se que os deslocamentos da estrutura e as pressões no fluido variam harmonicamente no tempo com uma frequência natural, ou seja, a segunda derivada temporal do deslocamento da estrutura e da pressão do fluido é

possível de ser transformada por Fourier: ($\ddot{u} = -\omega^2 \cdot u$) e ($\ddot{p} = -\omega^2 \cdot p$). Além disso, neste caso, as matrizes de amortecimento estrutural $[C_E]$, a matriz de radiação no infinito $[R]$ e o vetor de cargas externas $\{F\}$ podem ser desprezados com valor igual a zero.

7.3. ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO SOFTWARE ANSYS®

7.3.1. Breve Descrição do Software ANSYS®

O *software* ANSYS® é um programa de simulação para engenharia que utiliza o método dos elementos finitos implementado para análises. O *software* possui a sua empresa matriz na cidade de Canonsburg, estado da Pensilvânia, nos Estados Unidos. O *software* ANSYS possibilita a simulação de diversos problemas de engenharia, tais como: problemas térmicos, estruturais, análises em fluidodinâmica, eletromagnéticas, multifísica e problemas acoplados.

Neste trabalho foi utilizada a plataforma ANSYS Mechanical APDL. Esta plataforma permite a escolha de uma gama de tipos de elementos finitos, bem como possibilita a criação de rotinas em arquivo formato .txt que favorecem as modelagens praticamente toda automatizada. Isso possibilita a modelagem de sistemas mais complexos. O tópico a seguir apresenta os elementos finitos utilizados neste trabalho.

7.3.2. Descrição dos Tipos de Elementos Finitos Utilizados no ANSYS®

O *software* ANSYS® contém diversos tipos de elementos finitos aplicados em diversas modelagens de problemas de engenharia. Neste trabalho, os modelos bidimensionais (2D) de estruturas foram discretizados com o uso dos elementos BEAM189 (elemento de barra) e PLANE183 (elemento isoparamétrico no plano). Nas modelagens tridimensionais das estruturas o elemento SOLID95 (elemento volumétrico) foi utilizado. O elemento COMBIN14 (elemento amortecedor-mola) foi utilizado tanto nas modelagens dos modelos rígido-móveis.

No domínio do fluido, quando discretizado por um modelo bidimensional (2D) foram empregados os elementos FLUID29 (elemento acústico no plano). Nas discretizações tridimensionais do domínio do fluido foram utilizados os elementos FLUID30 (elemento acústico volumétrico). A seguir são apresentadas as principais características dos elementos

finitos utilizados neste trabalho. As funções de forma podem ser encontradas em (BIBLIOTECA DO ANSYS®, 2022).

Elemento BEAM189

O elemento BEAM189 (Figura 7.2) é adequado para analisar estruturas de barras esbeltas e espessas, pois além de contabilizar o efeito da flexão o elemento é baseado na teoria de Timoshenko, que incorpora os efeitos de deformação por cisalhamento. Esse elemento de barra é quadrático de três nós, que pode ser utilizado para discretização bidimensional ou tridimensional. Cada um dos três nós do elemento possui seis graus de liberdade, que contabilizam translações nas direções x , y e z e rotações em torno de direções x , y e z . Assim, o elemento é adequado para aplicações lineares, grandes rotações e/ou deformações.

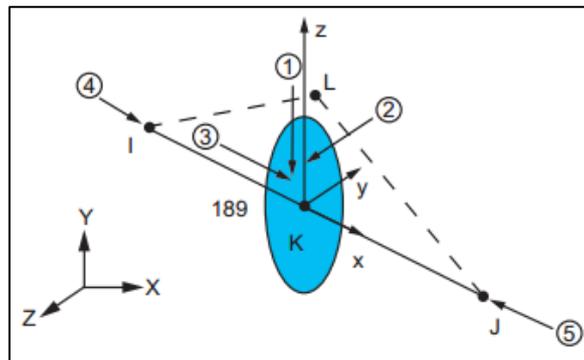


Figura 7.2: Elemento finito BEAM189. (Adaptado de Biblioteca do ANSYS®).

Elemento PLANE183

O elemento PLANE183 é um elemento para análises bidimensionais e possui seis ou oito nós com dois graus de liberdade em cada nó, captando translações nas direções nodais x e y . O elemento tem comportamento de deslocamento quadrático e pode ser usado para discretizar no estado plano de tensão ou estado plano de deformação. A Figura 7.3 apresenta as opções de geometria do elemento (quadrilateral ou triangular).

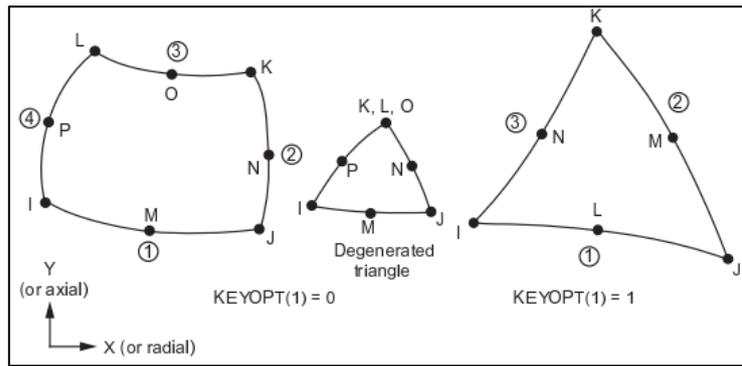


Figura 7.3: Elemento finito PLANE183. (Adaptado de Biblioteca do ANSYS®).

Elemento SOLID95

O elemento SOLID95 (Figura 7.4) é empregado para modelagem 3D de estruturas sólidas, dispondo de 20 nós (I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, A, B) com três graus de liberdade por nó, ou seja, capta translações nas direções x, y e z. Um dos benefícios deste elemento é que a geometria estrutural pode ser discretizada de forma tetraédrica ou prismática (quadrada, piramidal ou trapezoidal), favorecendo representar numericamente praticamente qualquer geometria de estrutura.

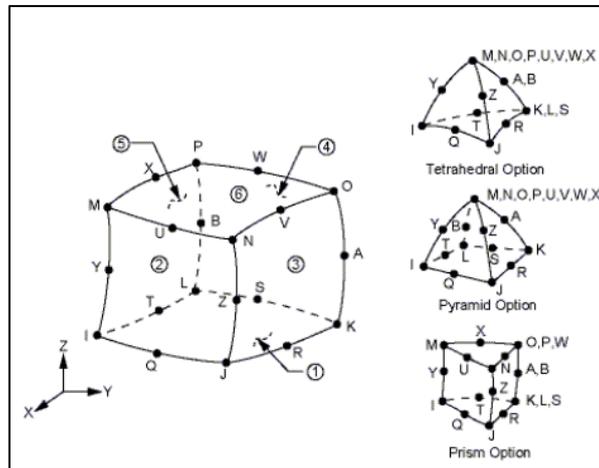


Figura 7.4: Elemento finito SOLID95. (Biblioteca do ANSYS®).

Elemento COMBIN14

O elemento finito COMBIN14 pode ser aplicado em análises bidimensionais ou tridimensionais. Este elemento não possui massa, mas possui mola elástica e/ou a capacidade de amortecimento que podem ser removidas do elemento, quando necessárias. O elemento COMBIN14 possui duas opções: a primeira opção é a amortecedor-mola, caracterizando o

elemento com tensão uniaxial com até três graus de liberdade em cada nó, com translações nas direções nodais x , y e z . Nenhuma flexão ou torção é considerada nesta opção amortecedor-mola. Entretanto, a segunda opção é de amortecedor-mola de torção, caracterizada por um elemento puramente rotacional com três graus de liberdade em cada nó, com rotações em torno dos eixos nodais x , y e z . Nenhuma flexão ou esforço axial é considerada nesta opção amortecedor-mola de torção. A Figura 7.5 traz a geometria do elemento COMBIN14 para as duas opções citadas.

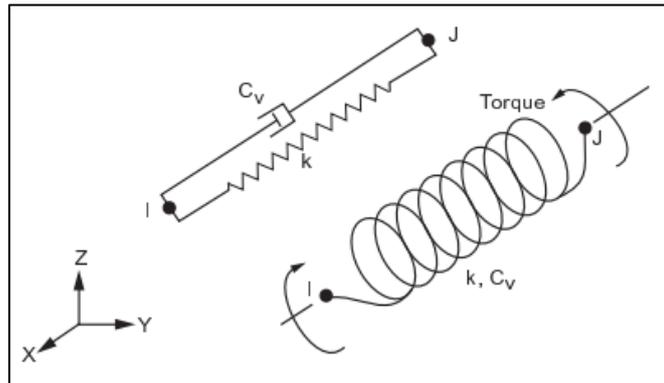


Figura 7.5: Elemento finito COMBIN14. (Biblioteca do ANSYS®).

Elemento FLUID29

O FLUID29 é um elemento de fluido acústico que pode ser empregado nas análises bidimensionais em problemas de interação fluido-estrutura, com aplicações típicas que incluem propagação de ondas e dinâmica de estruturas submersas. O elemento tem quatro nós de canto com três graus de liberdade por nó, captando as translações nas direções nodais x e y na interface fluido-estrutura e pressões no meio fluido. Efeitos de aceleração, como por exemplo, em problemas de ondas de superfície livre sloshing, podem ser simulados por este elemento. Além disso, dependendo da análise o elemento pode ser discretizado com geometria quadrilateral ou triangular. O elemento FLUID29, quando utilizado em conjunto com elemento FLUID129, incorpora na análise a capacidade de incluir amortecimento absorvente na interface. A Figura 7.6 apresenta a geometria do elemento FLUID29.

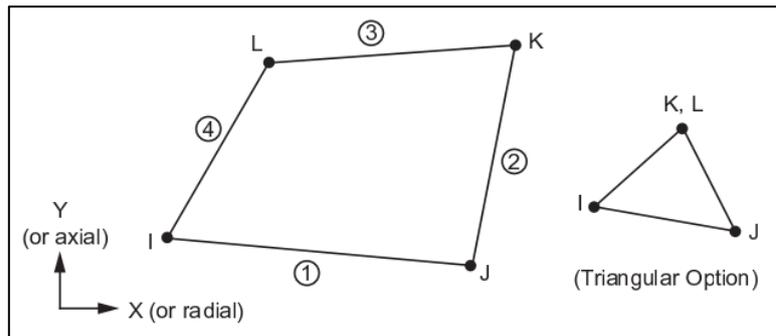


Figura 7.6: Elemento finito FLUID29. (Biblioteca do ANSYS®).

Elemento FLUID30

No que diz respeito à malha para o fluido acústico em análises tridimensionais, o elemento FLUID30 pode ser empregado neste tipo de análise, pois apresenta oito nós de canto (I, J, K, L, M, N, O, P) com quatro graus de liberdade por nó, captando as translações na interface fluido-estrutura nas três direções (U_x , U_y , U_z), bem como as pressões (P). Esse elemento é amplamente utilizado para modelar o meio fluido em problemas de interação fluido-estrutura, bem como efeitos de superfície livre *sloshing* podem ser incluídos. O FLUID30 é um elemento volumétrico que possui geometrias quadradas, tetraédricas, piramidal ou trapezoidal.

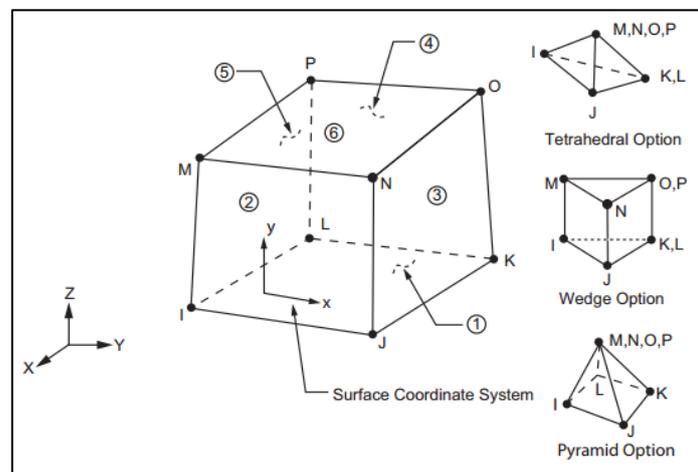


Figura 7.7: Elemento finito FLUID30. (Biblioteca do ANSYS®).

7.3.3. Tipos de Análise no ANSYS®

Na resolução das equações de movimento em vibrações livres (análise modal) através do MEF por meio do *software* ANSYS® foram utilizados os módulos *Block Lanczos*, no qual é adequado para sistemas estruturais desacoplados com as matrizes de rigidez e massa simétricas, e o *Unsymmetric*, ideal para resolução dos sistemas acoplados fluido-estrutura

com as matrizes assimétricas. Além disso, em problemas onde o amortecimento é considerado o método *Damped* ou *QR Damped* podem ser utilizados.

Na análise harmônica, feita através do método *Harmonic*, a resposta da estrutura varia harmonicamente em uma faixa de frequência (varredura sob carregamento sinusoidal), ou seja, é possível obter valores e amplitudes (“picos”) de deslocamentos, deformações, tensões, pressões etc. em função do espectro de frequência para situações antes ou após as ressonâncias dos sistemas. As respostas de "pico" são então identificadas e investigações mais detalhadas nessas frequências de pico podem ser realizadas. Na análise harmônica apenas as vibrações forçadas (varredura sob carregamento sinusoidal) do regime estacionário de uma estrutura são analisadas. O regime transiente que ocorrem logo no início da excitação, que podem ser diferentes dessa varredura sinusoidal em uma situação física real, não são contabilizadas em uma análise harmônica.

7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados conceitos sobre os aspectos computacionais utilizados na análise numérica através do *software* ANSYS®. Foram apresentadas as equações básicas da formulação numérica aplicada no domínio da estrutura, no meio acústico (fluido) e na interação fluido-estrutura por meio da formulação U-P. Por fim, foram explorados os tipos de elementos finitos utilizados e os métodos de análises.

8. ASPECTOS TEÓRICOS DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

8.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados os aspectos teóricos relacionados com a parte experimental. Inicialmente a fundamentação teórica para análise experimental explora conceitos e formulações que tem por base as pesquisas de Oliveira (2012) e Mendes (2010), onde é apresentada a Transformada de Fourier, bem como o método de identificação modal, sendo o método básico no domínio da frequência (BFD – *Basic Frequency Domain*). Posteriormente, são apresentados os procedimentos intrincados ao desenvolvimento de uma mesa vibratória, bem como do sistema de aquisição de dados de baixo custo que são utilizados para efetivação do ensaio experimental.

8.2. IDENTIFICAÇÃO MODAL NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

8.2.1. Transformada de Fourier

Diversas estruturas de engenharia estão submetidas a carregamentos dinâmicos que tem sua intensidade variando no tempo, como por exemplo, o efeito do vento atuando em um edifício, um terremoto na base de uma barragem, entre outros casos. Essas variações são descritas por funções de tempo $f = f(t)$ e geralmente possuem variação aleatória.

De uma forma geral, salvo a influência de outros parâmetros, pode-se afirmar que se uma estrutura está submetida a uma carga dinâmica ou com característica estocástica, a resposta da estrutura seguirá essa mesma tendência, como por exemplo, um edifício submetido a um sismo qualquer possui os seus deslocamentos aleatórios no tempo que não seguem uma função. Por outro lado, se essa mesma estrutura estiver submetida a um carregamento harmônico sinusoidal terá os seus deslocamentos regidos por comportamento sinusoidal. Contudo, tanto para os carregamentos atuantes quanto para resposta estrutural dinâmica, essas variações aleatórias no espaço temporal podem ser representadas através de uma decomposição no domínio da frequência por uma análise de Fourier (MENDES, 2010).

Esta análise no domínio da frequência é possível de ser efetuada a partir da análise de Fourier, também conhecida por análise espectral. Um ou vários registros das séries temporais (acelerações, velocidades ou deslocamentos) medidas na estrutura são decompostas em

ondas harmônicas sinusoidais. Assim, uma vez dispo de estas ondas harmônicas é possível obter os parâmetros modais da estrutura (OSÓRIO, 2015). A Figura 8.1 apresenta um registro no tempo (até o comprimento de período limite T do registro) que é decomposto no domínio da frequência em várias ondas sinusoidais.

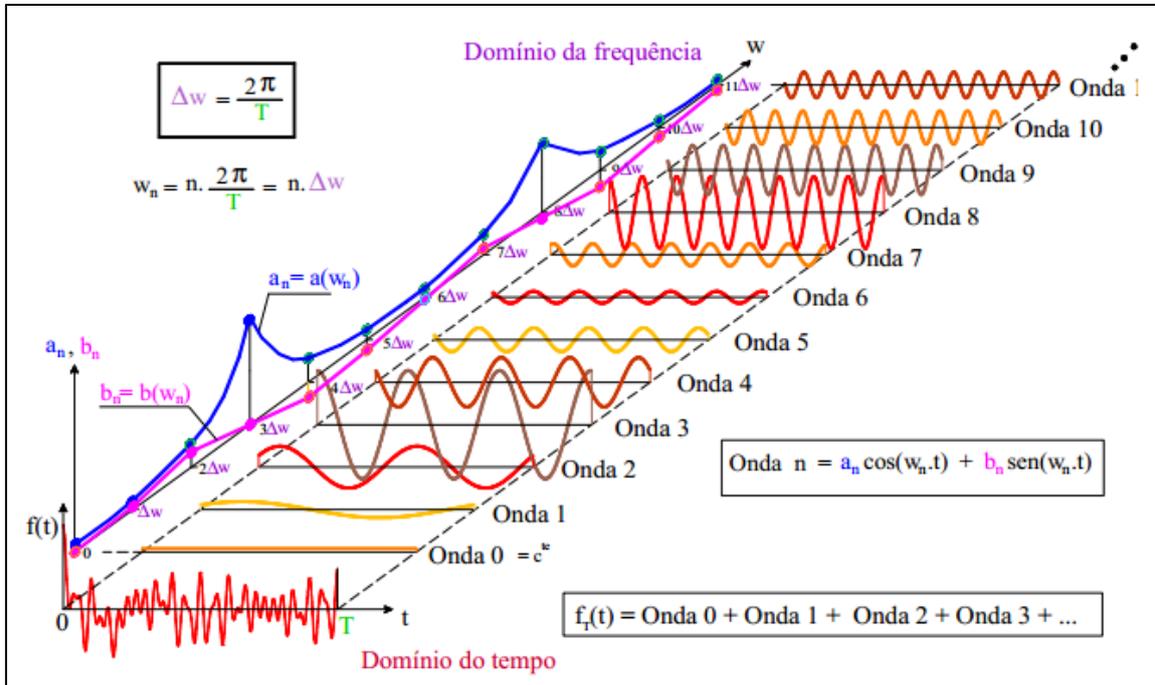


Figura 8.1: Decomposição de uma série temporal em ondas sinusoidais. (OLIVEIRA, 2012; MENDES, 2010).

Através da Figura 8.1 é possível observar que o comprimento T do registro determina o intervalo de espaçamento em frequência ($\Delta\omega$) das diversas ondas sinusoidais. Outro aspecto importante é que o registro no tempo pode ser representado pelo somatório de diversas ondas sinusoidais com períodos iguais a T e seus submúltiplos (T, T/2, T/3, T/4, ...). Portanto, estas ondas possuem frequências crescentes dadas por (1/T, 2/T, 3/T, ..., 10/T, ...) em Hz ou ($[2\pi/T]$, $2[2\pi/T]$, $3[2\pi/T]$, ..., $10[2\pi/T]$, ...) em Rad/s. Então, considerando $\Delta\omega=2\pi/T$ as frequências das ondas apresentadas são expressas por:

$$\omega_1 = \Delta\omega, \omega_2 = 2\Delta\omega, \omega_3 = 3\Delta\omega, \omega_4 = 4\Delta\omega, \dots, \omega_n = n\Delta\omega \quad (8.1)$$

Onde n é o número de ondas sinusoidais. Assim, o registro temporal f(t) em um determinado intervalo de comprimento de período T, pode ser expresso por:

$$f_T(t) = c + \underbrace{\text{onda 1}}_{\omega_1=\Delta\omega} + \underbrace{\text{onda 2}}_{\omega_2=2\Delta\omega} + \underbrace{\text{onda 3}}_{\omega_3=3\Delta\omega} + \dots + \underbrace{\text{onda } n}_{\omega_n=n\Delta\omega} + \dots \quad (8.2)$$

Onde c é uma constante que representa a onda 0 apresentada na Figura 8.1. Cada onda senoidal “ n ” pode ser representada por uma combinação linear de duas funções trigonométricas (cosseno e seno). Então, temos que:

$$\text{onda } n = a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t) \quad (8.3)$$

Onde a_n e b_n são os coeficientes de onda que variam de acordo com a função a ser representada, t é o tempo e ω_n é a frequência. Substituindo a Equação (8.3) na Equação (8.2), temos que o registro temporal pode ser reescrito por:

$$f_T(t) = c + \underbrace{a_1 \cos(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t)}_{\text{onda 1}} + \underbrace{a_2 \cos(\omega_2 t) + b_2 \sin(\omega_2 t)}_{\text{onda 2}} + \dots + \underbrace{a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)}_{\text{onda } n} + \dots \quad (8.4)$$

Ou reescrita de uma forma geral por:

$$f_T(t) = c + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)] \quad (8.5)$$

A Equação (8.5) apresenta a forma clássica de uma Série de Fourier. Para realizar a decomposição do registro no tempo nas ondas sinusoidais representadas pela Equação (8.5), em um intervalo $[0, T]$, deve-se determinar a constante c e os coeficientes a_n e b_n das n ondas.

A Equação (8.5) pode ser reescrita empregando identidades trigonométricas das funções cosseno e seno na forma complexa (Equação 8.6), obtendo assim a chamada representação da Série de Fourier em sua forma complexa (Equação 8.7). As equações citadas são expressas, respectivamente, por:

$$\cos(\omega_n t) = \frac{e^{i\omega_n t} + e^{-i\omega_n t}}{2} \quad e \quad \sin(\omega_n t) = \frac{-i e^{i\omega_n t} + i e^{-i\omega_n t}}{2} \quad (8.6)$$

$$f_T(t) = c + \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) e^{i\omega_n t} + \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) e^{-i\omega_n t} \right] \quad (8.7)$$

Onde $i = \sqrt{-1}$ é a raiz imaginária. Assumindo que $n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$, ou seja, que $-\infty < \omega_n = n \cdot \Delta\omega < +\infty$, a Equação (8.7) pode ser reescrita por:

$$f_T(t) = \frac{a_0 - i b_0}{2} e^{i\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) e^{i\omega_n t} + \sum_{n=-\infty}^{+1} \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) e^{i\omega_n t} \quad (8.8)$$

Ou na sua forma compacta, denominada forma complexa da Série de Fourier, dada por:

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) e^{i\omega_n t} \quad (8.9)$$

Sabe-se que, de uma forma geral, uma função qualquer $f(t)$ na forma complexa da Série de Fourier possui relação entre o domínio do tempo $f(t)$ e da frequência $f(\omega)$, expressa por:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{i\omega t} \quad \text{onde} \quad C_n = \frac{1}{T} \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} . dt}_{f(\omega)} \quad (8.10)$$

Onde C_n são os coeficientes complexos de Fourier da função $f(t)$. Portanto, aplicando o intervalo de período de onda $[0, T]$ nos limites dos domínios das funções e combinando as equações, temos a seguinte expressão para os coeficientes complexos de Fourier:

$$C_n = \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) = \frac{1}{T} \underbrace{\int_0^T f_T(t) e^{i\omega_n t} . dt}_{f_T(\omega_n)} \quad (8.11)$$

Portanto, a partir da Equação (8.11), pode-se obter a chamada Transformada Discreta de Fourier (TDF - *Discrete Fourier Transform*) da função $f(t)$ que é aplicada no finito intervalo de comprimento T e expressa por:

$$f_T(\omega_n) = \int_0^T f_T(t) e^{i\omega_n t} . dt \quad (8.12)$$

Ou também escrita por:

$$f_T(\omega_n) = \left(\frac{a_n - i b_n}{2} \right) \cdot T \quad (8.13)$$

Onde $f_T(\omega_n)$ é uma função complexa com parte real $a(\omega_n).T/2$ e uma parte imaginária $-b(\omega_n).T/2$.

A Equação (8.13) acima, que representa a TDF, pode ser resolvida através da Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) por meio de recursos computacionais. Neste trabalho, a TDF foi resolvida através da FFT com uso do *software* EXCEL, através da implementação das equações nas planilhas eletrônicas. Com isso, o espectro de frequência pode ser elaborado, com gráficos que relacionam uma varredura na frequência em função das amplitudes reais ou imaginárias de Fourier.

8.2.2. Método Básico no Domínio da Frequência (BFD – Basic Frequency Domain)

O método básico no domínio da frequência (BFD – *Basic Frequency Domain*) é um método rápido e simples de identificação modal, sendo também conhecido como método de seleção de picos (PP - *Peak Picking*). Este método permite obter as frequências ressonantes com a análise dos picos da resposta da estrutura no domínio da frequência, pois nestas condições as amplitudes obtidas na FFT apresentam uma concentração energética. Neste trabalho, um grau de liberdade instrumentado tem o registro temporal avaliado pela Transformada Rápida de Fourier (OLIVEIRA, 2012).

A montagem gráfica da FFT permite identificar as frequências naturais através dos picos de frequências ressonantes, as quais devem corresponder a modos globais de vibração da estrutura. Assim, para se obter os modos de vibração é necessário definir um grau de liberdade de referência.

8.2.3. Identificação das Razões de Amortecimento

Em um ensaio laboratorial, o espectro de saída nas FFT apresenta seus picos nas frequências ressonantes amortecidas da estrutura, uma vez que o efeito do amortecimento intrínseco do próprio material da estrutura existe no sistema e não tem como ser eliminado. Se o amortecimento da estrutura for baixo, o geralmente ocorre em estruturas de engenharia civil, as frequências amortecidas obtidas são próximas das frequências naturais do sistema

$$\delta = \ln \frac{v_n}{v_{n+1}} = \frac{2 \pi \xi_n}{\sqrt{1 - \xi_n^2}} \quad (8.15)$$

8.3. SIMULADORES DE VIBRAÇÃO (MESA VIBRATÓRIA)

No âmbito da análise dinâmica experimental, podem ser utilizados em laboratórios diversos tipos de simulador de vibração, que consiste em todo um aparato que permite aplicar cargas dinâmicas (impulsiva, harmônica etc.) e, conseqüentemente, possibilita estudar os seus efeitos na estrutura. Uma mesa vibratória é um tipo de simulador de vibração que permite a realização de ensaios experimentais aplicados na área da Engenharia Civil e da Engenharia Mecânica, servindo tanto para sustentar a estrutura a ser ensaiada quanto para aplicar a carga dinâmica.

De uma forma geral, uma mesa vibratória é basicamente caracterizada em função do seu tipo de acionamento, tais como: sistema hidráulico, sistema pneumático, sistema elétrico ou sistema de biela - manivela. Além disso, dependendo do seu tipo de acionamento, uma mesa vibratória possui diversos componentes que interagem para o seu funcionamento, como por exemplo, uma plataforma para apoiar a estrutura teste, rolamentos lineares, válvulas, mangueiras, cabos, pistões, um controlador (*hardware*) dos movimentos da mesa, entre outros dispositivos (HUANG, 2018).

Ao realizar a caracterização de uma mesa vibratória algumas informações são primordiais, como por exemplo, o número de graus de liberdade de movimento da mesa, a capacidade máxima de carga, a máxima amplitude de deslocamento, a máxima velocidade, a máxima aceleração e a faixa de frequência abrangida. Para se ter uma ideia dessas mesas vibratórias, Huang (2018) apresenta em seu trabalho diversas mesas vibratórias para ensaios dinâmicos, sendo algumas delas sintetizadas neste trabalho e apresentadas na Figura 8.3.

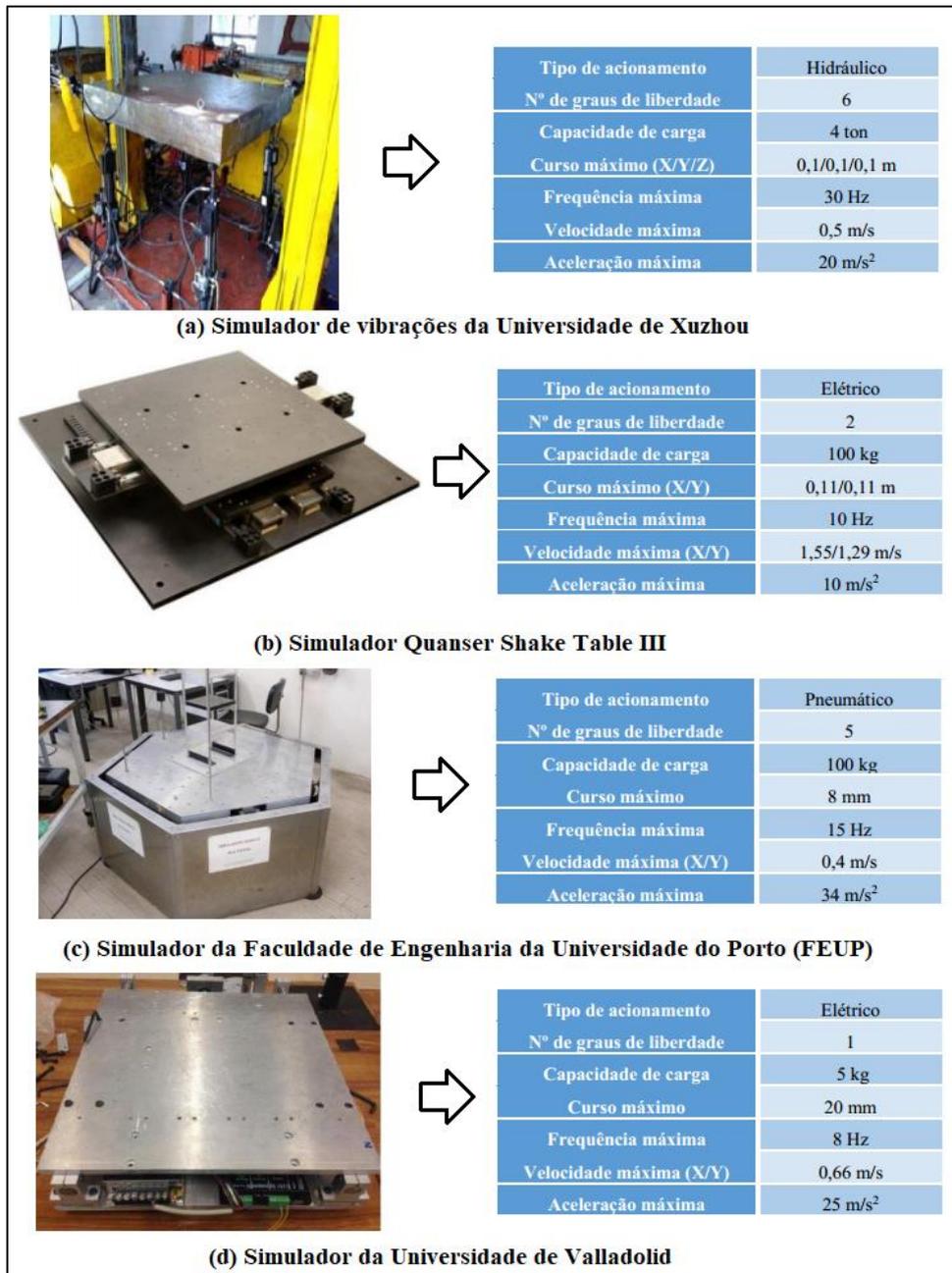


Figura 8.3: Exemplo de mesas vibratórias. (Adaptado de Huang, 2018).

Através da Figura 8.3 foi possível observar algumas mesas vibratórias, com suas principais faixas de capacidades para ensaios. Assim, nota-se que a construção de uma mesa vibratória para ensaios dinâmicos é uma tarefa que requer uma análise minuciosa de cada elemento integrante e sua influência na vibração da mesa, uma vez que o movimento dinâmico que ela aplicará na estrutura a ser ensaiada depende de todo processo de construção. No próximo item é apresentada uma mesa vibratória, na qual foi construída especificamente para este trabalho.

8.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados conceitos sobre os aspectos teóricos da identificação modal no domínio da frequência e apresentado alguns modelos de simulador uniaxial. A transformada rápida de Fourier foi organizada e implementada em uma planilha do EXCEL que serviu de base para obtenção dos espectros de frequência. Além disso, através dos diferentes simuladores foi possível entender as variáveis relacionadas a construção da mesa harmônica.

9. CONSTRUÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE VIBRAÇÕES DINÂMICAS

9.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os aspectos práticos relacionados a construção de uma mesa vibratória que contribuíram para o estudo experimental. Inicialmente é apresentada a estrutura da mesa vibratória, em seguida os aspectos relacionados a forma de aquisição de dados e, por fim, são discutidos o resultado de testes iniciais na mesa e em um modelo de pórtico plano.

9.2. ESTRUTURA DO SIMULADOR UNIAXIAL PROPOSTO

Nesta tese, foi proposta a construção de uma mesa vibratória para análise dinâmica experimental de pequenos modelos. O tipo de acionamento desse simulador de vibração é do tipo sistema de biela - manivela, sendo capaz de realizar simulações de ondas sinusoidais para diferentes amplitudes e frequências.

Para isso, uma plataforma principal formada por uma chapa de madeira de compensado naval com 18 mm de espessura é apoiada em uma chapa de aço de 1,5mm de espessura, ambas em nível horizontal e sem inclinações. Por sua vez, a chapa de aço é presa numa grelha feita com perfis de aço de seção 20mmx20mmx1,5mm quadrada vazada. Essa plataforma principal recebe as estruturas para o ensaio, então foi construída de modo que apresente uma elevada rigidez e não admita deflexões consideráveis que possam gerar frequências parasitas durante os ensaios.

Na parte inferior da plataforma principal foram instalados quatro rolamentos acoplados a dois eixos lineares (eixos guia) de aço carbono de 16 mm de diâmetro. Esse eixo guia é responsável por permitir o movimento translacional da mesa em apenas uma direção, tornando-a um simulador uniaxial (simulador com um grau de liberdade). Cada eixo guia é do tipo trilho, sendo completamente apoiado em uma base metálica rígida formada por perfis de aço de seção 30mmx50mmx1,5mm retangular vazada.

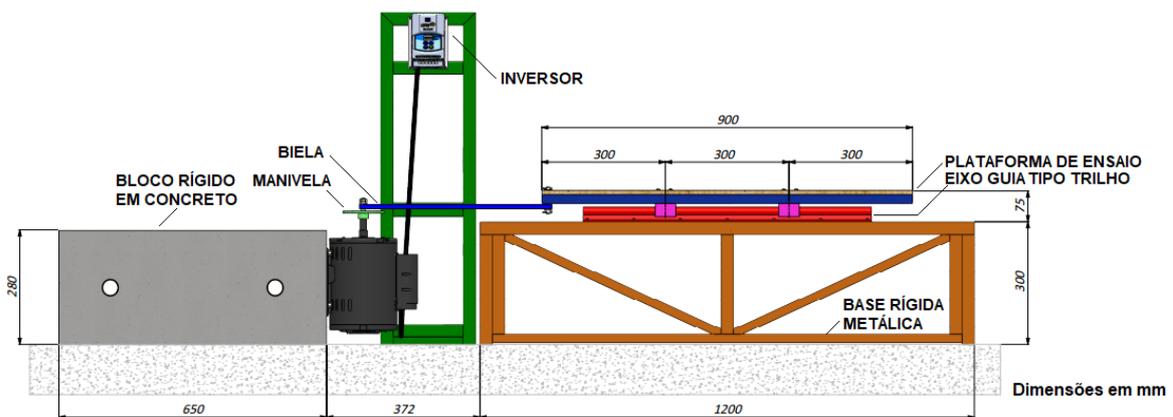
O eixo guia do tipo trilho é adequado para esse propósito, pois independentemente da posição dos rolamentos fixos à plataforma, ele transmite toda carga vertical recebida

diretamente para a base metálica rígida, não existindo praticamente nenhuma deflexão. A base metálica rígida, por sua vez, transmite essas cargas verticais para o piso de concreto.

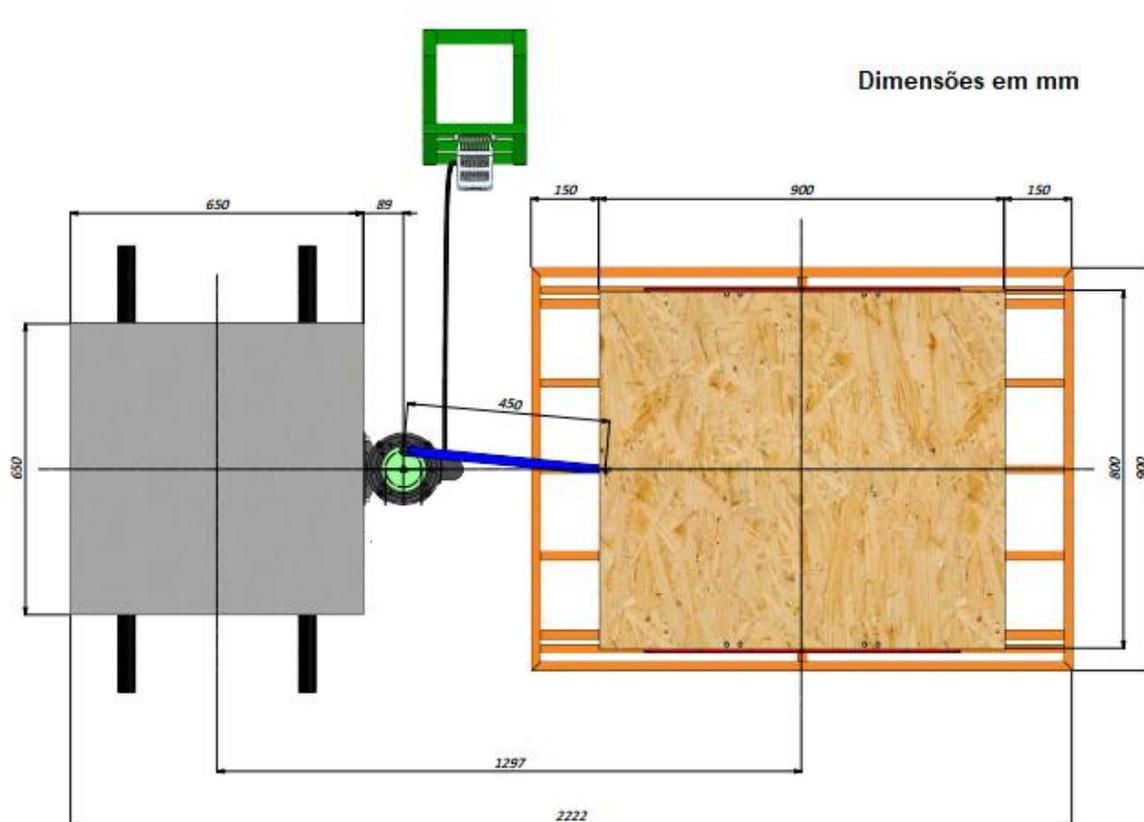
Em uma extremidade da plataforma foi acoplada uma biela de aço com rolamento acoplada com parafuso de rosca parcial de 3/8 polegada de diâmetro que, por sua vez, é acoplada a uma manivela de 10 cm de diâmetro em um eixo de um motor elétrico. Esse sistema permite que o movimento circular seja transformado em movimento de translação na plataforma.

O motor elétrico é fixado em um bloco de concreto com uso de parabolts de aço inox. Um inversor de frequências é utilizado para controlar a velocidade angular de rotação do motor elétrico. Portanto, quando o motor é acionado, o movimento plano de rotação da manivela impulsiona a biela e, conseqüentemente, a plataforma, refletindo em um movimento harmônico sinusoidal.

Vale ressaltar que o fato do motor ser fixado no bloco de concreto e a plataforma fixada na base metálica rígida, ou seja, fixos em sistemas independentes, o movimento de vibração do próprio motor, quando acionado, diminui a possibilidade de ruídos ou frequências “parasitas” nos ensaios experimentais. A Figura 9.1 apresenta um esquema da mesa vibratória.



(a) Vista Frontal

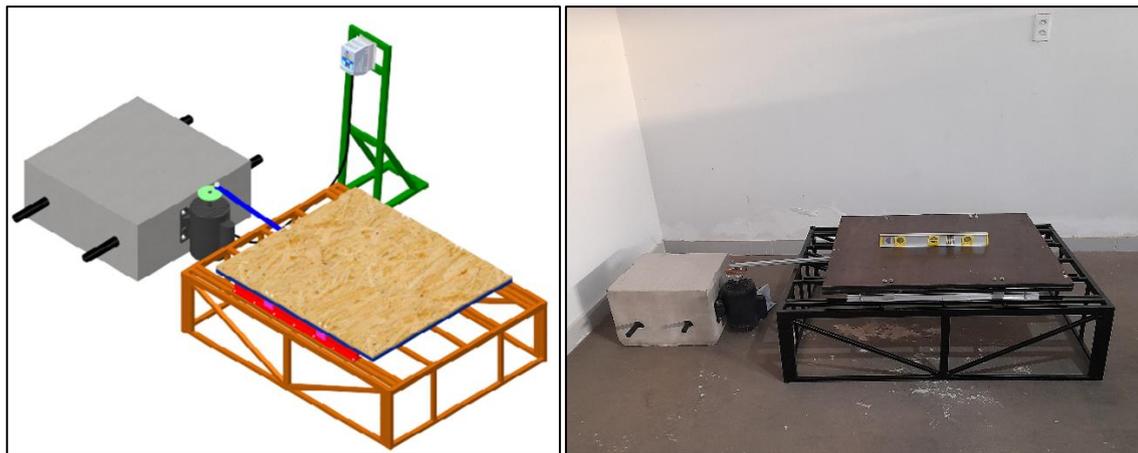


(b) Vista Superior

Figura 9.1: Esquema da mesa vibratória desenvolvida: (a) Vista Frontal e (b) Vista Superior.

Ao observar a Figura 9.1, sabe-se que a posição de acoplamento entre biela e manivela reflete em uma amplitude de vibração na translação da plataforma. Assim, diferentes possibilidades de amplitudes podem ser incorporadas na mesa vibratória. Neste trabalho, optou-se por uma amplitude de vibração fixa de aproximadamente 76 mm.

No que diz respeito ao conjunto de acionamento da plataforma, o inversor de frequência utilizado para controlar a velocidade de rotação angular do motor é o CFW500 da marca WEG. O inversor de frequência CFW500 produz um acionamento de velocidade variável de alta performance para motores elétricos, com corrente de saída de 1,0 a 211 A, que reflete, respectivamente, numa faixa de potências de 0,25 a 175 cv. O motor elétrico utilizado na construção da mesa vibratória foi um motor monofásico de 220Volts da marca WEG com 2CV de potência e uma frequência de até 60Hz. Com todos esses equipamentos básicos, o conjunto (plataforma, base e sistemas de acionamento) foi construído. A Figura 9.2 abaixo apresenta a mesa vibratória.



(a) Vista Isométrica de projeto

(b) Mesa de Ensaio Construída



(c) Inversor de Frequência

(d) Fixação do motor

(e) Motor e bloco de concreto

Figura 9.2: Esquema da mesa vibratória.

9.3. DISPOSITIVO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

No estudo experimental dinâmico em estruturas sabe-se que, geralmente, são mais utilizados acelerômetros para determinar os movimentos estruturais e sensores captadores de pressão para o fluido. Além disso, é necessário de um sistema de aquisição de dados e da instalação direta destes sensores na estrutura física dos protótipos a serem estudados. De uma forma geral, no âmbito de pesquisas nacionais pode-se afirmar que, mesmo extremamente eficiente, todo esse aparato experimental é de alto custo e de difícil manuseio.

De maneira paralela a isso, nos últimos anos a técnica de captura de movimento por vídeo (TCMV) tem evoluído e pode possibilitar o estudo em diversas análises experimentais de estruturas, devido ao seu baixo custo e simplicidade de operação. Nessa vertente, no presente trabalho, foi utilizada a técnica de captura de movimento por vídeo para obtenção resposta dinâmica experimental dos modelos ensaiados. Assim, a abordagem experimental de estruturas pela TCMV em fenômenos complexos, pode ser mais acessível por diversos pesquisadores na área e possibilitar mais estudos dos efeitos acoplados fluido-estrutura.

Técnica de Captura de Movimento por Vídeo

A técnica de captura de movimento em vídeo foi utilizada através do *software* CvMob. O CvMob é uma ferramenta gratuita programada em linguagem C++ e que foi desenvolvida no Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA), sendo utilizada para análise visual automática do movimento humano. Assim, a partir de uma gravação em vídeo, este *software* gera dados sobre deslocamentos, velocidades e acelerações em quaisquer pontos de análise no vídeo.

Neste trabalho, o CvMob foi empregado para avaliar a resposta harmônica de um modelo de pórtico (teste inicial) e de um reservatório com amplitudes de ondas de superfície livre *sloshing*, demonstrando ter um elevado potencial e ser bem útil também na área experimental da Engenharia. A Figura 9.3 apresenta o procedimento de gravação do ensaio e da leitura dos deslocamentos horizontais no *software* CvMob de uma estrutura de pórtico plano com um grau de liberdade.



(a) Gravação Frontal do Ensaio

(b) Leitura dos dados no CvMob

Figura 9.3: Exemplo do procedimento de ensaio utilizando a TCMV.

Inicialmente, no processamento é necessário calibrar no CvMob dois pontos fixos de distâncias conhecidas no experimento real. Desta forma, todos os resultados são gerados em função desta calibração. Uma vez calibrado a leitura, pode-se obter deslocamentos, velocidades e acelerações nas duas direções (horizontal e vertical), bem como em diversos pontos, simultaneamente. A Figura 9.4 apresenta um exemplo de leitura e de processamento no *software* CvMob de deslocamentos, velocidades e nas acelerações horizontais de um pórtico plano com 1 grau de liberdade.

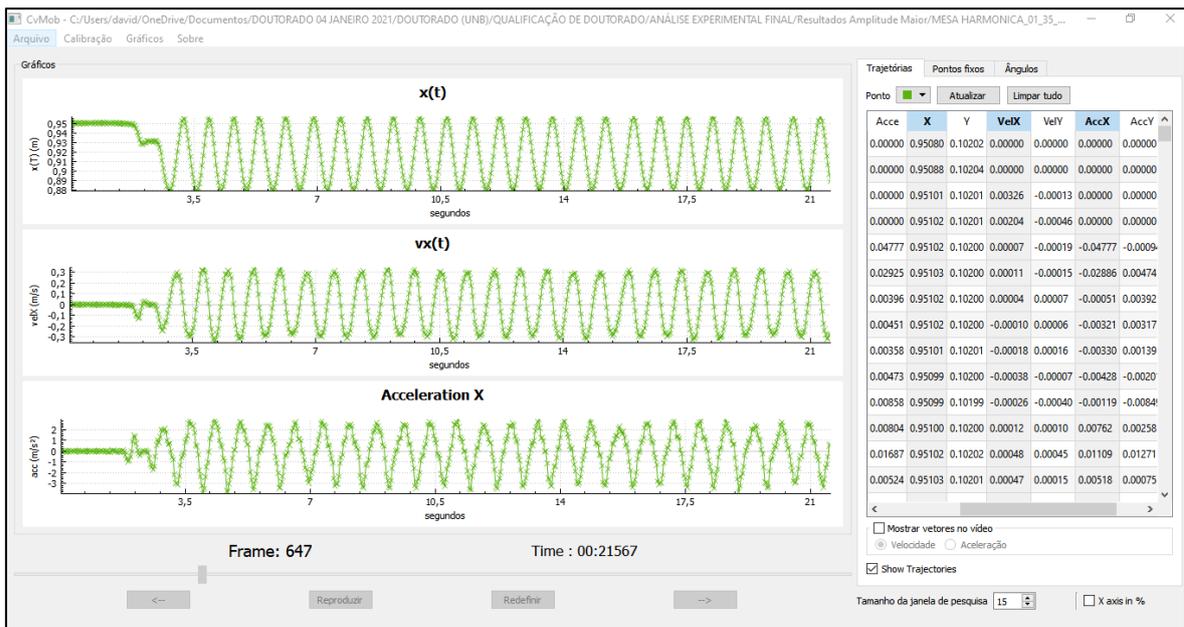


Figura 9.4: Exemplo de obtenção da resposta dinâmica no *software* CvMob utilizando a TCMV.

Com base na Figura 9.4 é possível observar que o sistema de captura de movimento por vídeo fornece de maneira simples e direta a resposta temporal da estrutura. Neste trabalho, para o ensaio do modelo experimental foi utilizada uma câmera de 48 MegaPixel (Mp) (resolução 8000x6000 pixel), com gravação do ensaio através de um tripé afastado aproximadamente 70cm da plataforma da mesa vibratória.

Portanto, tendo em vista que o modelo experimental de *sloshing* é realizado neste trabalho, os resultados obtidos pela técnica de captura por vídeo foram confrontados com modelagens numéricas e soluções analíticas. No próximo tópico são apresentados os resultados relacionados aos testes iniciais, com intuito de demonstrar a identificação das características dinâmicas da mesa vibratória vazia, bem como o ensaio experimental de um pórtico plano de um grau de liberdade.

9.4. TESTES INICIAIS NA MESA VIBRATÓRIA COM A TCMV

Neste tópico são apresentados os resultados relativos à obtenção das características dinâmicas da mesa vibratória vazia e da realização de ensaio em um pórtico 2D (plano). Com isso, todo procedimento experimental e leitura dos resultados pela técnica de captura de movimento em vídeo, através do CvMob, pode ser avaliado. Além disso, o uso da implementação analítica da teoria de identificação modal no domínio da frequência foi testado e validado.

9.4.1. Teste na Mesa Harmônica Vibratória

Para entender as características dinâmicas da mesa vibratória, a investigação experimental foi realizada inicialmente com a mesa vibratória vazia, sendo aplicada uma excitação harmônica sinusoidal para uma mesma amplitude de vibração. A excentricidade foi medida na manivela com auxílio de um paquímetro e apresentou valor de 38mm, refletindo em uma amplitude teórica de movimento de 76mm.

A plataforma foi avaliada pela TCMV através de uma gravação em vídeo pela câmera frontal e análise no ponto A. A Figura 9.5 apresenta o escopo do ensaio e a mesa vibratória. Vale ressaltar que o ponto de medição para leitura no CvMob era marcado com um círculo em tamanho milimétrico. O ponto A apresentado na Figura 9.5 foi feito bem maior do que o utilizado no ensaio apenas para indicar a região de leitura dos dados.



Figura 9.5: Região de leitura na plataforma, indicada no ponto A.

Análise de Deslocamentos, Velocidades e Acelerações

Partindo de uma baixa velocidade para realizar o movimento harmônico na mesa, imposta através do inversor de frequência, foi obtido no ponto A os deslocamentos, velocidades e as acelerações. Após o início do ensaio, os movimentos foram avaliados em um intervalo de tempo total de 0 a aproximadamente 20 segundos. A coordenada horizontal (x) de leitura do ponto A é de aproximadamente 0,950m. A Figura 9.6 apresenta os deslocamentos, velocidades e acelerações obtidas no ponto A para a excitação aplicada.

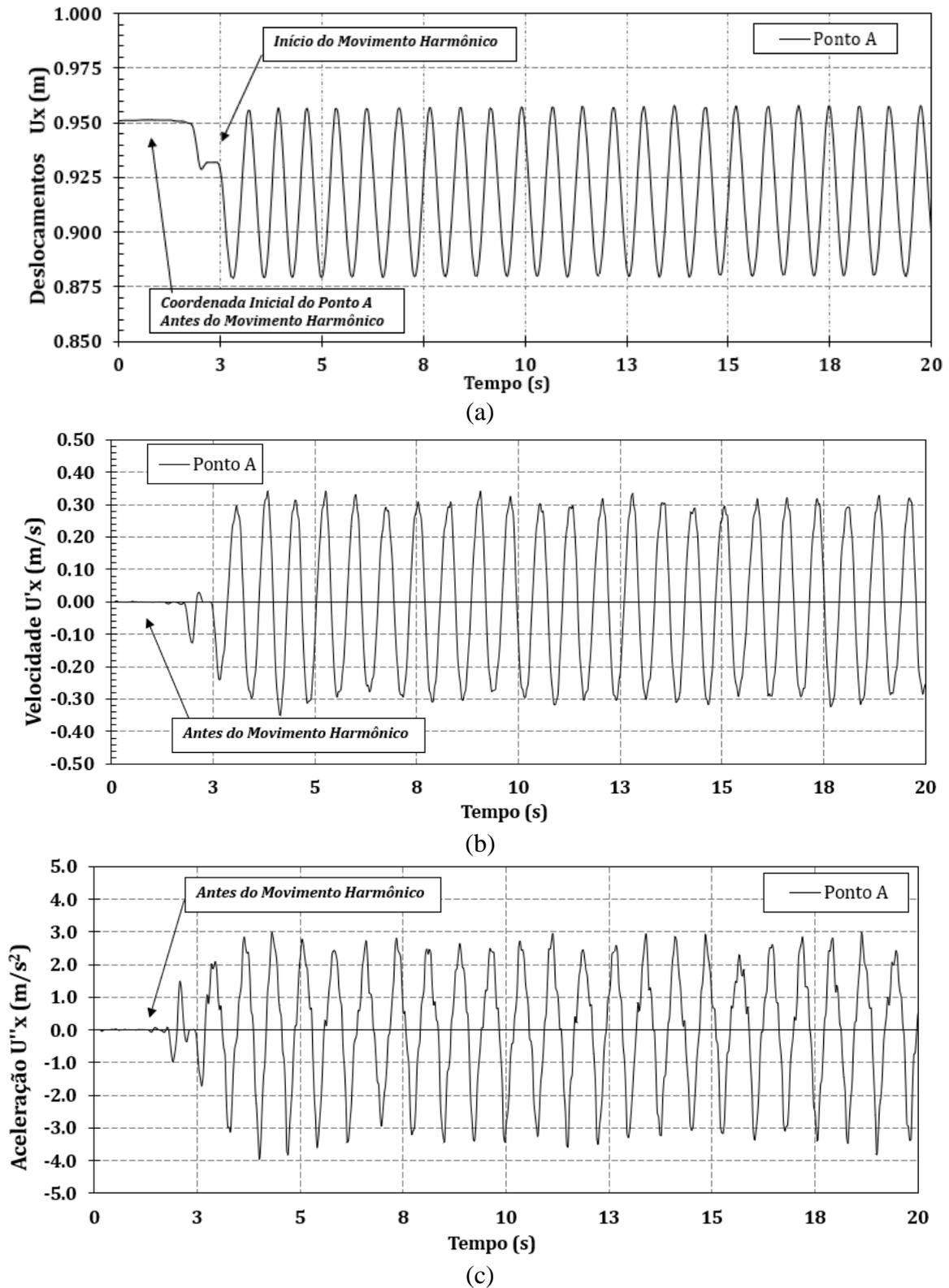
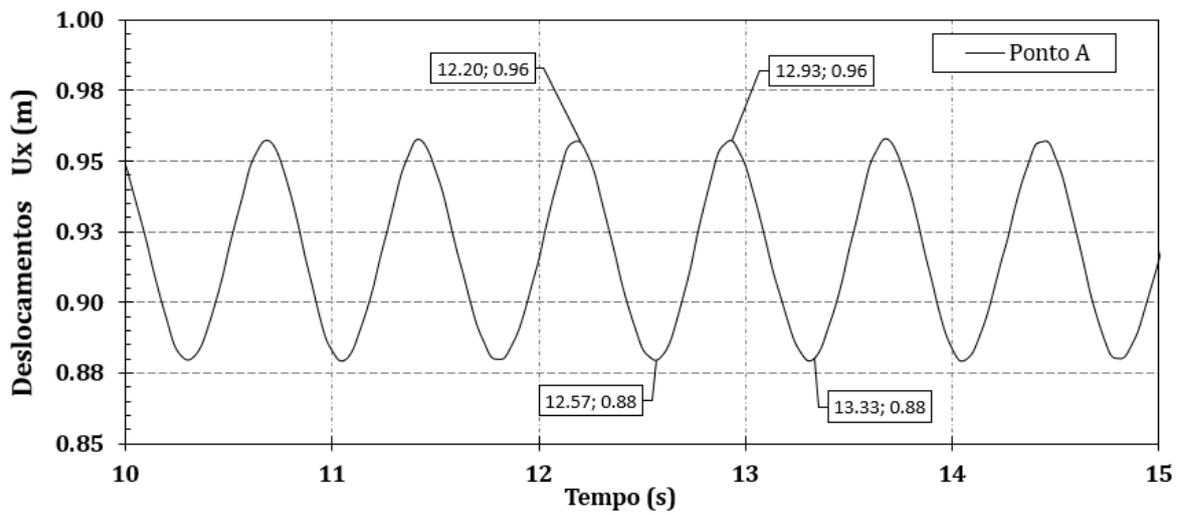


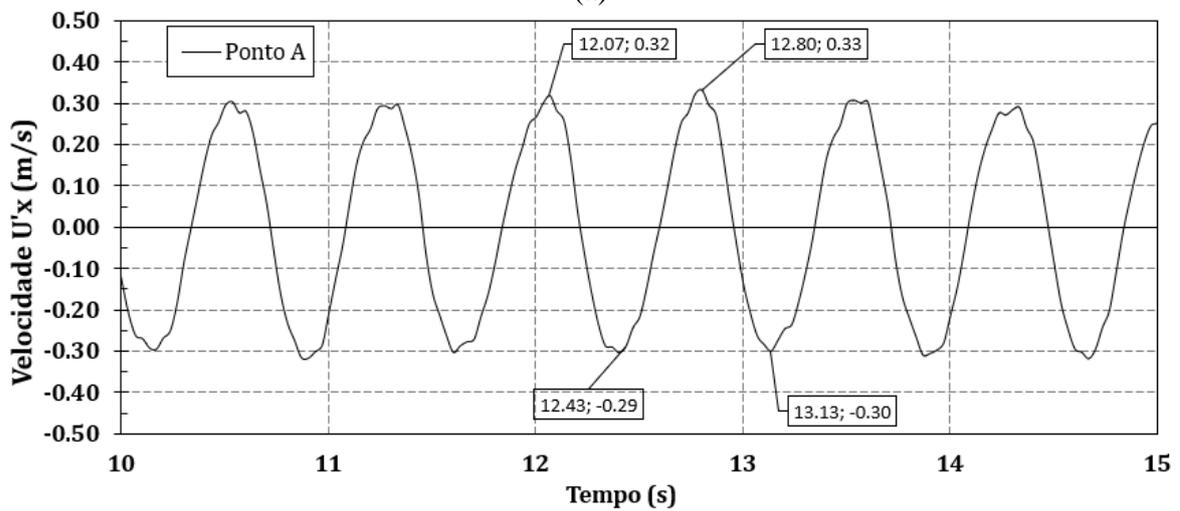
Figura 9.6: Resultados no ponto A para um intervalo de tempo entre 0 e 20 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações.

As leituras das acelerações, das velocidades e dos deslocamentos foram obtidos pela TCMV. Para analisar o sinal de deslocamentos, velocidades e acelerações, na Figura 9.7 é

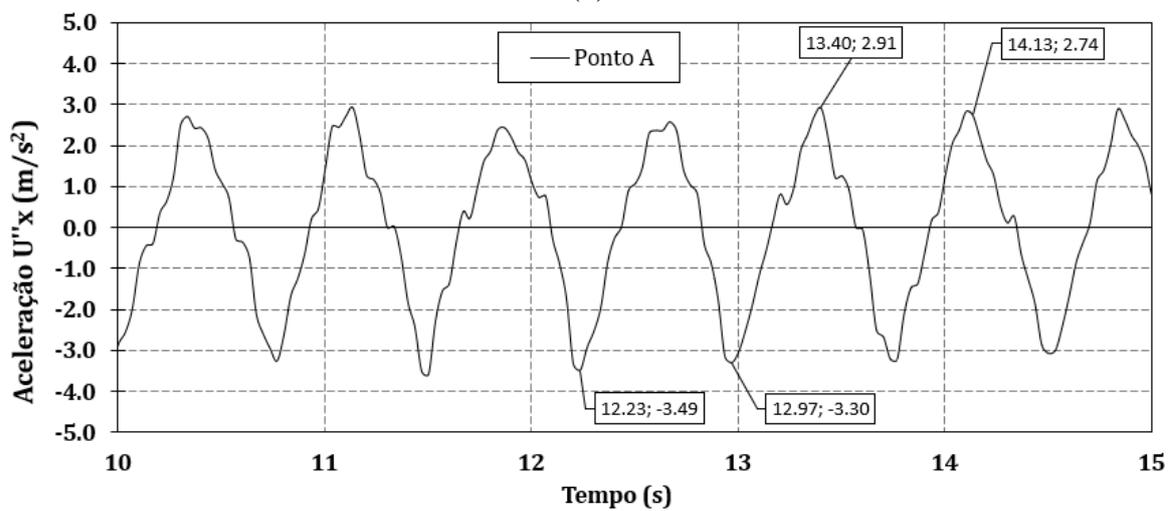
apresentado os mesmos gráficos da Figura 9.6, porém com um recorte no tempo entre 10 e 15s.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.7: Resultados no ponto A para um intervalo de tempo entre 10 e 15 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações.

Através dos gráficos de deslocamento, velocidade e aceleração, pode-se observar que a qualidade do sinal é melhor no gráfico dos deslocamentos quando comparado aos gráficos da velocidade e aceleração. Na curva de resposta da aceleração pequenos ruídos são observados. Neste gráfico dos deslocamentos, foi obtido uma função de resposta com característica sinusoidal, o que já era esperado, uma vez que a excitação produzida teve características do movimento harmônico simples.

Além disso, ao observar o gráfico dos deslocamentos, foi possível notar também que a amplitude lida na câmera foi de aproximadamente 80mm, que condiz com uma diferença de 5% em relação a amplitude teórica máxima lida na excentricidade da manivela do motor, que é de 76mm. Outro aspecto que pode ser observado no gráfico dos deslocamentos é que o período de onda permanece constante com valor de 0,73s. Tal período corresponde a uma frequência de movimento harmônico da mesa de 1,37Hz.

Com o intuito de analisar esta frequência da mesa, com base no registro de aceleração da Figura 9.6, foi realizada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para o intervalo de tempo de 0 a 20s. Deste modo, o espectro de frequência indica a frequência predominante do movimento e ilustra os pequenos ruídos, que se mostram desprezíveis na análise. A Figura 9.8 apresenta os resultados obtidos.

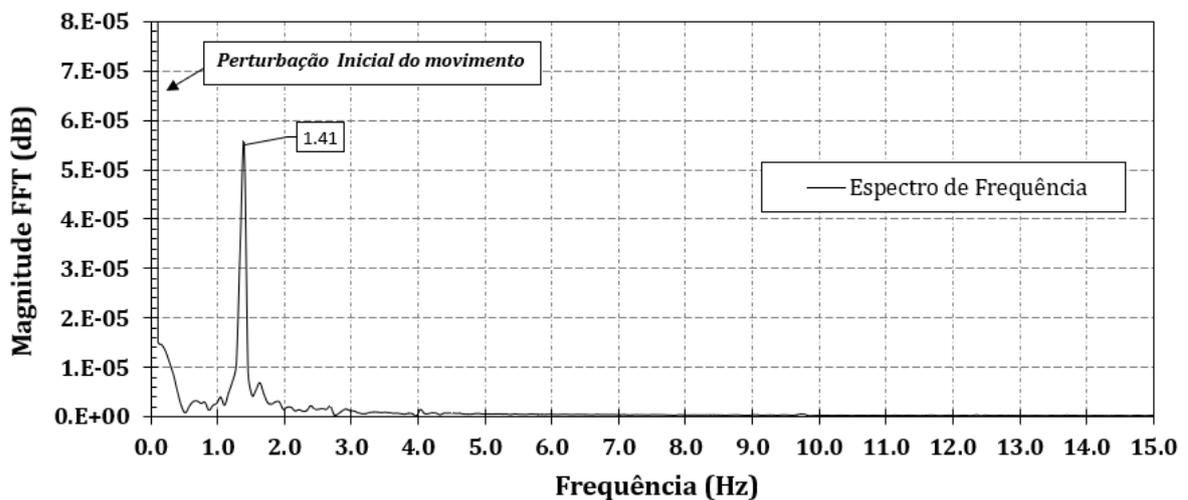


Figura 9.8: Espectro de frequência no ponto A para um intervalo de tempo entre 0 e 20s.

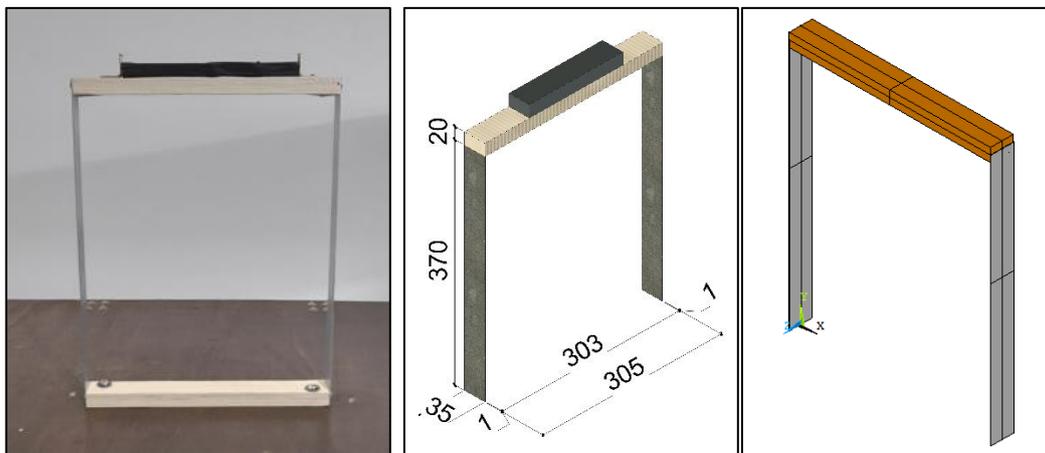
Através da Figura 9.8 é possível observar que a frequência obtida foi de 1,41Hz, próxima da frequência analisada e obtida pelo registro temporal de 1,37Hz. Para o objetivo deste trabalho, que é de estudar movimentos harmônicos de baixa frequência do efeito *sloshing*, a frequência de excitação da mesa é pertinente.

Além da análise na mesa vibratória, uma estrutura de um pórtico plano foi simulada com intuito de determinar o comportamento dessa estrutura e realizar um comparativo com a teoria analítica e numérica.

9.4.2. Modelo de um Pórtico Plano com Um Pavimento

Descrição e Parâmetros do Modelo

Para entender e avaliar a TCMV, um teste na mesa vibratória foi efetivado, com intuito de investigar experimentalmente um pórtico plano do tipo *shear building* e confrontar os resultados obtidos com a solução analítica e modelagem numérica. Para isto, a estrutura foi concebida com pilares em aço inoxidável 304, que são presos na plataforma por uma viga de madeira de compensado naval. Na parte superior, os pilares recebem a carga de outra viga de madeira de compensado naval, que possui uma massa fixa com uso de cantoneiras. A Figura 9.9 apresenta o modelo experimental e numérico do pórtico estudado, com as respectivas dimensões. As medidas foram realizadas com uso de um paquímetro.



(a) Modelo Experimental (b) Dimensões (em mm) (c) Modelo Numérico

Figura 9.9: Análise experimental em um pórtico plano.

Com o auxílio de uma balança foi possível realizar a medição da massa de cada componente (pilar, parafusos, arruelas, viga, cantoneira, massa acrescentada) que contribui no efeito inercial de translação na horizontal da estrutura, obtendo uma massa total de 923gramas (g). Foi assumido que metade da massa de cada pilar influenciará neste efeito inercial e que a outra metade é transferida para base do pórtico fixo na plataforma.

Na modelagem numérica o elemento BEAM189 foi utilizado na discretização e condição de contorno é de engastada na base dos pilares. Quanto as propriedades físicas e mecânicas dos materiais, no modelo numérico foi assumido para os pilares o aço inox 304 com massa específica (ρ) de 8000 kg/m^3 , módulo de Elasticidade (E) de 190 GPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a $0,30$.

Na viga de madeira superior, também foram assumidos a elasticidade (E) de 190 GPa e o coeficiente de Poisson de $0,30$ a fim de impor um modelo rígido com características de um pórtico plano do tipo *shear building*. Entretanto, a massa específica foi calibrada em função da massa total da viga, acrescentada a massa dos parafusos, das cantoneiras e da massa superior incluída. Assim, uma vez que no modelo numérico não foram modelados estes elementos citados, destaca-se que essa equivalência de massa específica foi necessária.

Uma vez que os parâmetros foram medidos, foi possível realizar a abordagem analítica, numérica e experimental do pórtico. A Figura 9.10 apresenta o ponto de análise pela TCMV, o processo de leitura pela TCMV e o modo de vibração numérico obtido no ANSYS.

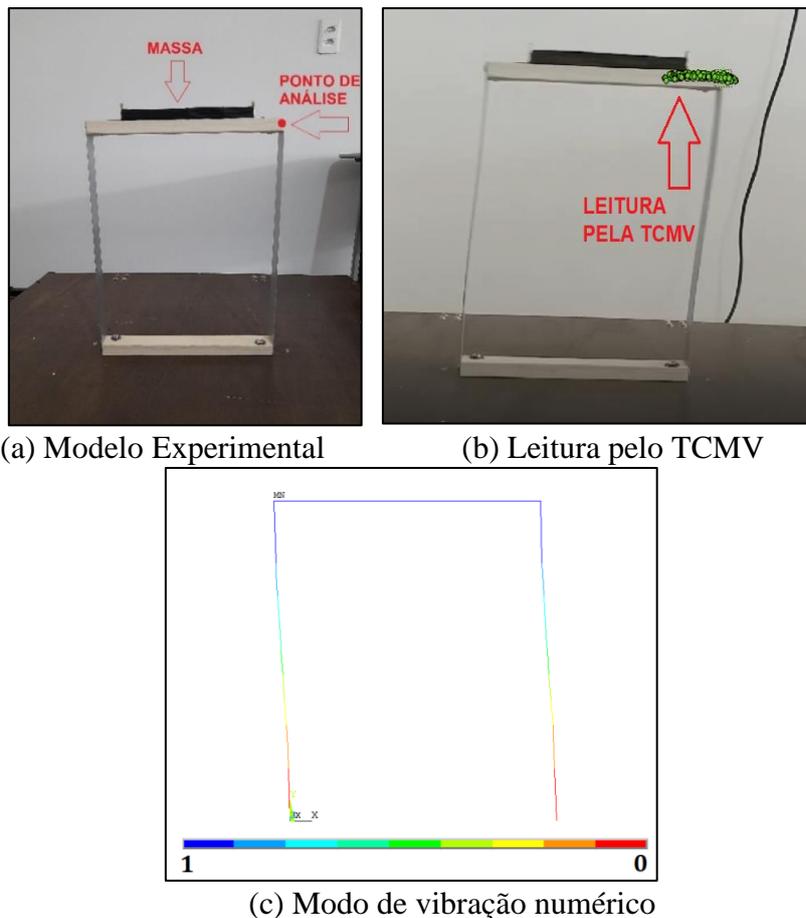


Figura 9.10: Análise de Estrutura de Pórtico Plano.

A formulação analítica utilizada para o comparativo na frequência do pórtico foi estudada em Pedroso (2005). A expressão é dada por:

$$F = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{3EI}{mH^3}} \quad (9.1)$$

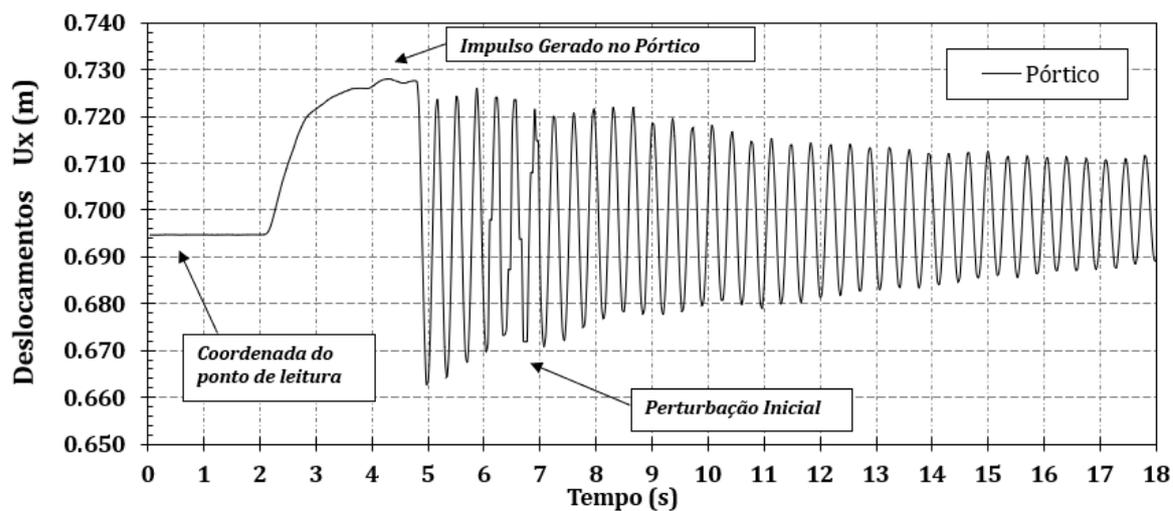
Onde F é a frequência natural, E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia, m é a massa e H é a altura.

Análise em Vibração Livre Amortecida

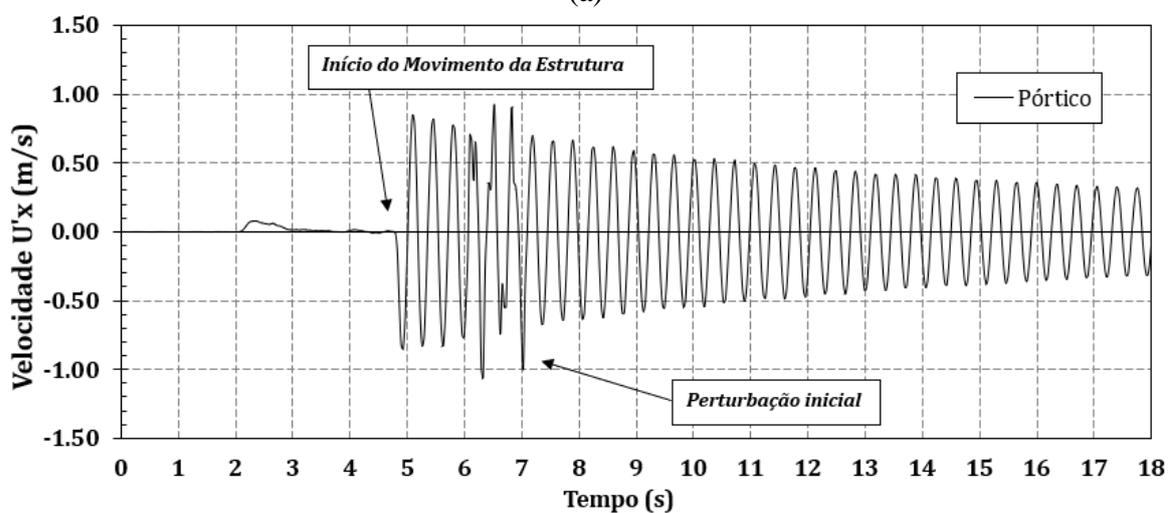
Inicialmente foi feita experimentalmente uma vibração livre amortecida no pórtico sem o acionamento do motor pelo inversor de frequência. O intuito é de determinar a frequência amortecida e a razão de amortecimento. Para isso, um impulso manual foi feito no pórtico, gerando um deslocamento no topo da estrutura na direção horizontal.

Ao se deformar e soltar o pórtico, a estrutura inicia o movimento de vibração livre. Contudo, devido ao amortecimento intrínseco do próprio sistema, a vibração caracteriza-se por uma vibração livre amortecida, uma vez que não é possível eliminar o amortecimento do experimento físico real.

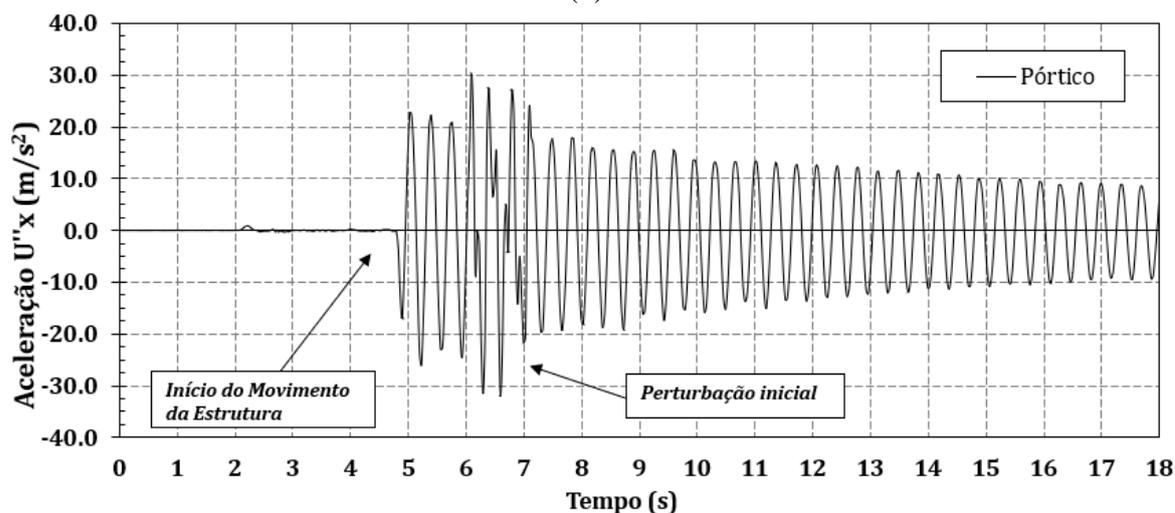
Durante o procedimento de ensaio o pórtico foi avaliado pela TCMV através de uma gravação em vídeo pela câmera frontal no ponto de análise mostrado. Com isso, foi possível obter os resultados de deslocamentos, velocidades e acelerações na vibração livre amortecida. Após o início do ensaio, os movimentos foram avaliados em um intervalo de tempo total de 0 a aproximadamente 18 segundos. A Figura 9.11 apresenta os deslocamentos, velocidades e acelerações obtidas no pórtico.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.11: Resultados no pórtico para um intervalo de tempo entre 0 e 18 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações.

As leituras das acelerações, das velocidades e dos deslocamentos foram obtidos pela TCMV. É possível observar que no início do ensaio (tempo 6 s) uma perturbação inicial imediata foi

obtida. Contudo, ao estabilizar o movimento nenhuma perturbação foi obtida. Para analisar o sinal de deslocamentos, velocidades e acelerações, na Figura 9.12 é apresentado os mesmos gráficos da Figura 9.11, com um recorte no tempo entre 10 e 15s.

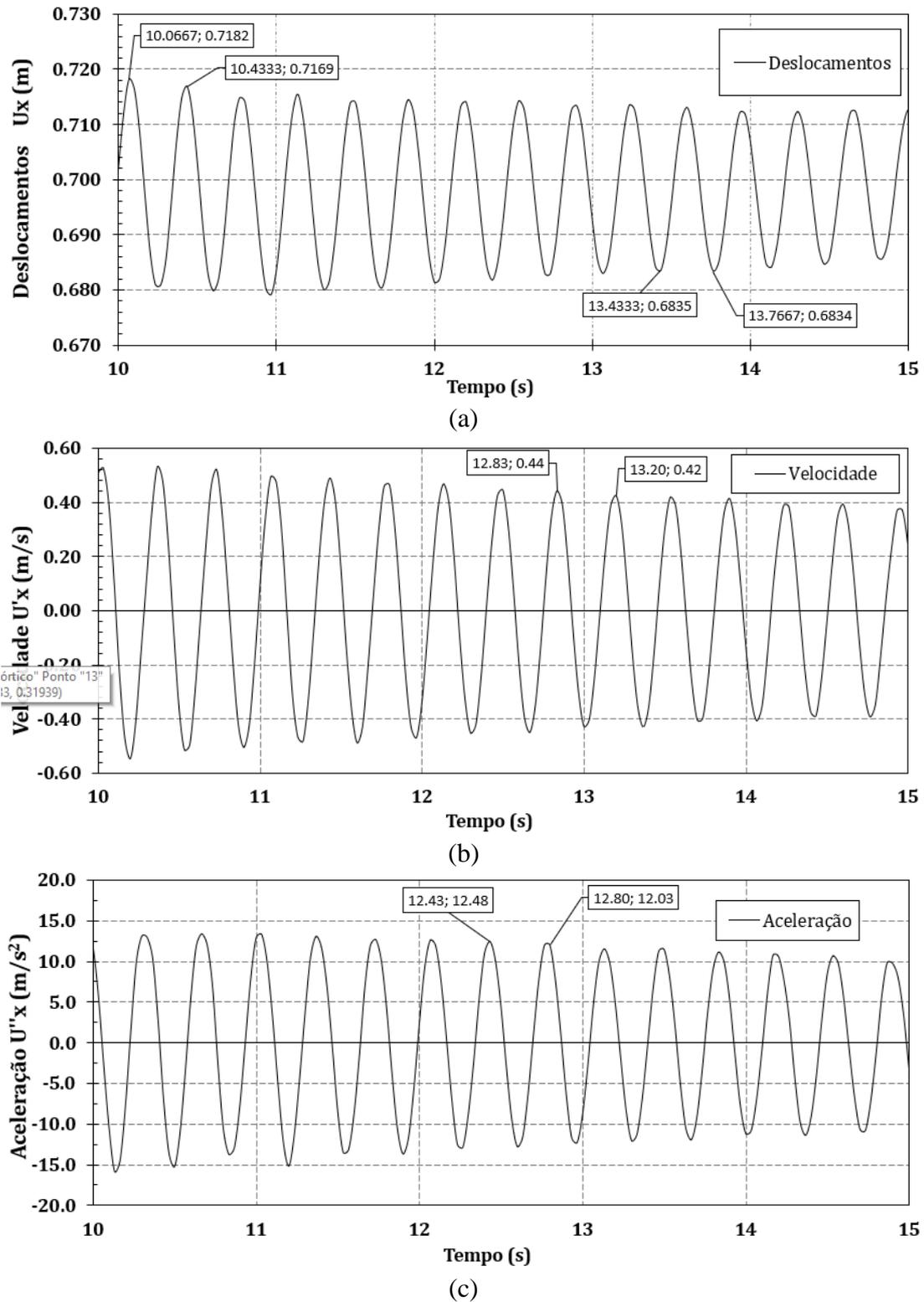


Figura 9.12: Resultados no pórtico para um intervalo de tempo entre 10 e 15 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações.

Através dos gráficos de deslocamento, velocidade e aceleração, pode-se comparar que a qualidade do sinal dos resultados obtido nas vibrações livres é melhor quando comparado, de forma qualitativa, aos pequenos ruídos presentes na análise harmônica da mesa. Tal fato pode ser justificado pelo atrito entre os elementos de mancais e trilho da mesa, vibração do próprio motor (mesmo que afastado), oscilações na própria corrente elétrica e diversos outros fatores que podem produzir pequenos ruídos no movimento harmônico, o que praticamente não existe na vibração livre amortecida do pórtico.

Além disso, nos gráficos da Figura 9.12, as funções de resposta com característica sinusoidal possuem uma atenuação e diminuição dos deslocamentos, velocidades e acelerações, o que já era esperado, uma vez que após a excitação impulsiva produzida os movimentos se dissipam. Isso devido ao efeito do amortecimento do sistema.

Foi obtido no gráfico dos deslocamentos o período de onda com valor de aproximadamente 0,37s. Tal período corresponde a uma frequência de movimento de 2,73Hz. Além disso, ao analisar o decaimento logarítmico do movimento, foi obtido uma taxa de amortecimento (ζ) de 1,164%. A taxa de amortecimento é muito baixa, caracterizado por um amortecimento subcrítico. Então, a frequência amortecida é praticamente a própria frequência natural da estrutura do pórtico.

Com o intuito de analisar esta frequência de vibração, com base nesse registro de deslocamentos, foi realizada a FFT para o intervalo de tempo de 0 a 18s. A Figura 9.13 apresenta os resultados obtidos.

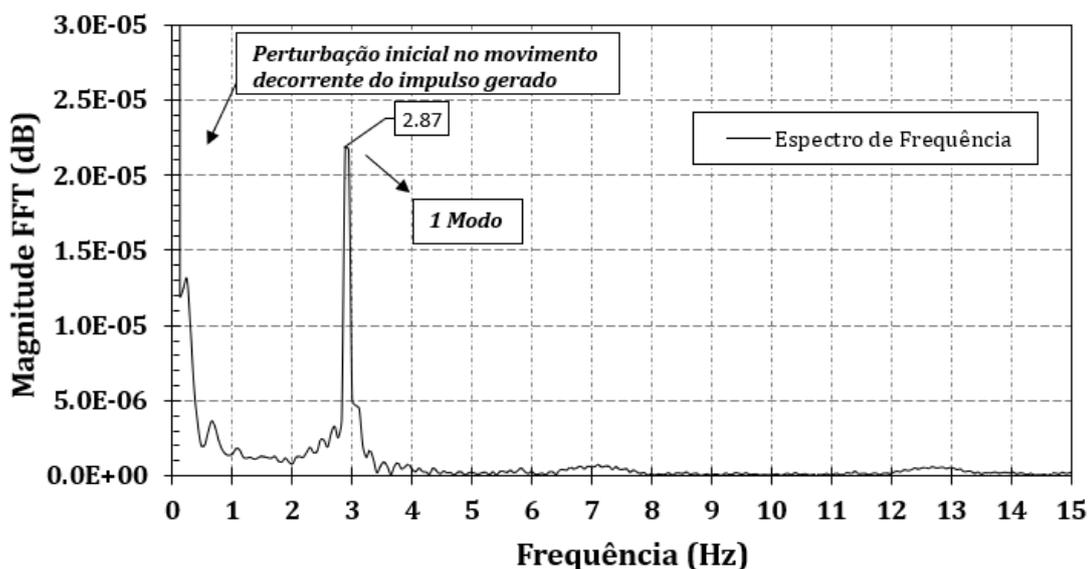


Figura 9.13: Espectro de frequência no pórtico para um intervalo de tempo entre 0 e 18s.

Através da Figura 9.13 é possível observar que o impulso gerado produz um pico no espectro de frequência, o qual pode ser desconsiderado. Além disso, no gráfico foi possível ver que a frequência obtida da FFT de todo o registro de deslocamentos foi de 2,87Hz. Esta frequência é próxima da frequência obtida pelo registro temporal de 2,73Hz, apresentando uma diferença de aproximadamente 4,88%.

Para demonstrar o potencial da TCMV, a Tabela 9.1 apresenta um comparativo entre as frequências experimentais, numéricas e analíticas do pórtico em estudo. Para tal, a frequência experimental que foi obtida no espectro de frequência é que foi levada utilizada para o comparativo. Os resultados analíticos e numéricos são oriundos de uma análise modal.

Tabela 9.1 – Frequências analíticas, numéricas e experimentais do pórtico plano.

| Frequência Analítica (Hz) | Frequência Numérica (Hz) | Frequência Experimental (Hz) | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] | Dif. (%) [3] |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 2,68 | 2,64 | 2,87 | 1,49 | 7,08 | 8,71 |

Legenda: [1]: diferença percentual entre Analítica e MEF; [2]: diferença percentual entre Analítica e Experimental e [3]: diferença percentual entre MEF e Experimental.

Com base na Tabela 9.1 é possível notar que os resultados analíticos, numéricos e experimentais foram satisfatórios, demonstrando um bom acordo entre sim. Os resultados experimentais tiveram uma diferença percentual de erro maior (máximo valor de 8,71%), mas diante das diversas variáveis físicas envolvidas, considera-se que os efeitos foram condizentes.

9.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a construção de bancada experimental para estudos de vibrações dinâmicas. Assim, é possível elencar algumas lições e aprendizados obtidos da construção da bancada para análise experimental.

As dificuldades encontradas durante a abordagem experimental podem ser elencadas, tais como:

- A análise pela TCMV não capta movimentos com amplitudes de vibração muito pequenas;

- A abordagem experimental com fluidos é de alta complexidade, como por exemplo, o tempo de espera excessivo até o líquido estabilizar, rebatimentos de ondas e não linearidades;
- O planejamento e operação dos ensaios devem ser com o máximo critério possível;
- O conjunto de equipamento (motor, inversor) devem ser compatíveis;
- A montagem da mesa vibratória demanda tempo e recursos financeiros.

10.RESULTADOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS

10.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos do estudo analítico e numérico acerca das pressões hidrodinâmicas impulsivas. Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes a análise das estruturas de barragens desacopladas. Em seguida, serão discutidos os resultados da cavidade acústica desacoplada (domínio do fluido). Por fim, serão apresentados os resultados das análises acopladas fluido-estrutura pelo ACP. Outros métodos ainda implementados no presente estudo em comparação com o ACP são o MMTM, o MEF e o método pseudo-dinâmico. Os estudos de convergência são apresentados no apêndice A.

10.2. ESTRUTURAS DESACOPLADAS

10.2.1. Descrição e Parâmetros dos Modelos

Neste tópico são apresentados os modelos estudados para validação da metodologia proposta para o cálculo de barragens desacopladas. A ideia desse procedimento é transformar um sistema contínuo de uma barragem em parâmetros generalizados, os quais contemplam o efeito cisalhante e flexional, bem como a variação inercial através de funções lineares da variação de inércia.

Assim, por meio desta metodologia, pode-se avaliar uma geometria de barragem esbelta (caso de comportamento regido pela hipótese de Navier) ou espessa (caso de comportamento regido pela hipótese de Timoshenko) com inércia constante ou variável (caso mais próximo da geometria de barragens gravidade).

Na demonstração das funções lineares de variação de inércia do ACP, inicialmente foram analisados três casos: o primeiro (caso A) é de uma barragem esbelta com inércia constante (caso de uma viga esbelta), o segundo (caso B) é de uma barragem espessa com inércia constante (caso de uma viga espessa) e, por fim, o terceiro (caso C) é de uma barragem espessa com inércia linearmente variável. A Figura 10.1 apresenta os casos citados.

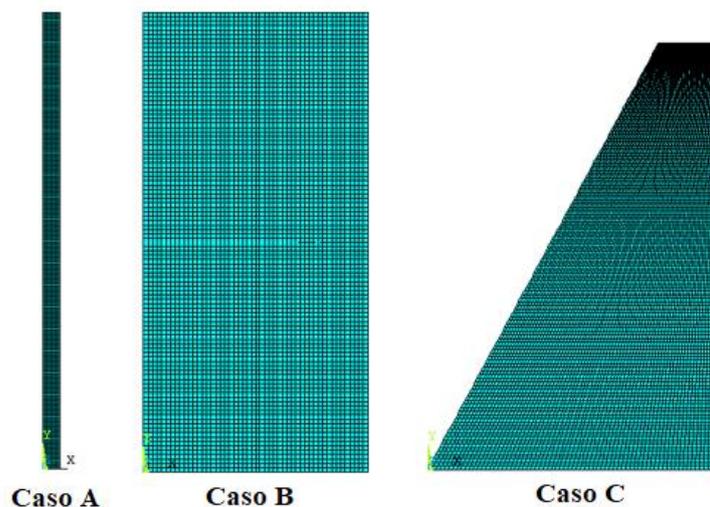


Figura 10.1: Modelos desacoplados avaliados.

Os modelos apresentados acima têm propriedades físicas, tais como: massa específica (ρ) equivalente a 2400 kg/m^3 , módulo de Elasticidade (E) de 30 GPa , coeficiente de Poisson (ν) igual a $0,20$. A condição de contorno é de engastada na base e livre no topo. As dimensões geométricas e suas respectivas funções, que expressam a variação de inércia, podem ser avaliadas na Tabela 10.1.

Tabela 10.1 – Parâmetros geométricos dos casos A, B e C avaliados.

| Caso | Descrição do Modelo | b (m) | B (m) | H (m) | Função Massa $m(z)$ (Kg/m) | Função Inércia $I(z)$ (m ⁴) |
|------|---|------------|------------|------------|-------------------------------|--|
| A | Barragem Esbelta com Inércia Constante (Flexão) | 10 | 10 | 100 | 24000 | 83,33 |
| B | Barragem Espessa com Inércia Constante (Flexão e Cisalhamento) | 160 | 160 | 100 | 384000 | 341333,33 |
| C | Barragem Espessa com Inércia Linearmente Variável (Flexão e Cisalhamento) | 10 | 100 | 100 | $-2160z + 240000$ | $-832,5z + 83333,33$ |

10.2.2. Frequências Naturais e Deformadas Modais

Os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais associadas ao primeiro modo de vibração fundamental tiveram seus valores analíticos obtidos pelo ACPD comparados tanto com o MEF quanto com o método pseudo-dinâmico. A Tabela 10.2 apresenta esse comparativo das frequências.

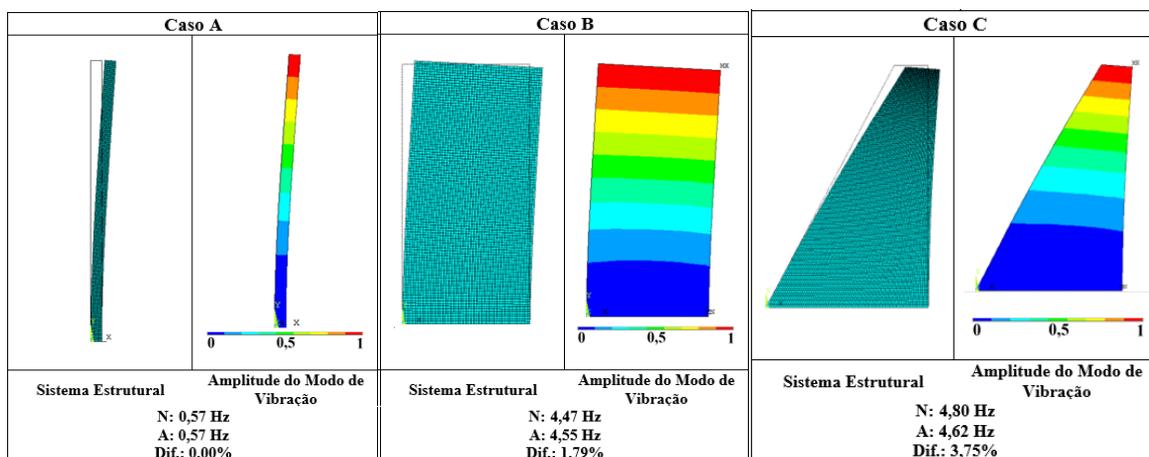
Tabela 10.2 – Frequências naturais analíticas e numéricas fundamentais (1º modo) dos diferentes casos analisados.

| Caso | Descrição do Modelo | Frequência Numérica (Hz) | Frequência Analítica ACPP (Hz) | Frequência Analítica Pseudo-Dinâmico (Hz) | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] |
|------|---|--------------------------|--------------------------------|---|--------------|--------------|
| A | Barragem Esbelta com Inércia Constante (Flexão) | 0,57 | 0,57 | Não capta | 0,00 | - |
| B | Barragem Espessa com Inércia Constante (Flexão e Cisalhamento) | 4,47 | 4,55 | 4,54 | 1,79 | 1,57 |
| C | Barragem Espessa com Inércia Linearmente Variável (Flexão e Cisalhamento) | 4,80 | 4,62 | 4,54 | 3,75 | 4,80 |

Legenda: [1]: Diferença percentual entre MEF e ACPP e [2]: Diferença percentual entre MEF e Pseudo-Dinâmico.

A partir da Tabela 10.2, nota-se que os resultados do ACPP possuem diferenças percentuais menores em relação ao MEF. Diante dos resultados encontrados na Tabela e considerando os seus baixos erros percentuais, pode-se afirmar que a modelagem foi validada e que as diferentes frequências naturais foram condizentes. Isto tanto para seu efeito de flexão isolado ou de flexão e cisalhamento combinados. Logo, os valores demonstraram um bom acordo.

O método pseudo-dinâmico fornece apenas uma frequência para a estrutura desacoplada (4,54Hz), a qual depende apenas do módulo de elasticidade e da altura da desta. Ademais, conforme observado na Tabela 10.2, este método não engloba análise para estruturas esbeltas. Por fim, as deformadas modais do primeiro modo de vibração fundamental acerca das frequências naturais apresentadas são visualizadas na Figura 10.2.



(a) Caso A

(b) Caso B

(c) Caso C

Figura 10.2: Deformadas modais numéricas das diferentes geometrias de barragens.

Para validar a metodologia de cálculo para estrutura desacoplada, foi realizado um estudo paramétrico com a variação da geometria da barragem, englobando o efeito de inércia constante e variável.

10.2.3. Estudo Paramétrico

Estrutura com Inércia Constante

Na complementação da análise foram obtidos resultados analíticos e numéricos referentes à primeira frequência natural e deformada modal de diferentes configurações geométricas de barragens. Estas, assumindo geometrias desde esbeltas à espessas e com a inércia constante.

Assim, foi feita uma variação de dimensões da seção transversal da geometria do Caso A (esbelta) e do Caso B (espessa). Os parâmetros físicos e mecânicos foram mantidos os mesmos já apresentados.

Na Tabela 10.3 são apresentadas as dimensões estudadas e os valores obtidos pelo ACPD para a rigidez e massa generalizados. A classificação do índice esbeltez também é indicada, sendo: estrutura esbelta ($H/B > 3$) ou estrutura espessa ($H/B < 3$).

Tabela 10.3– Geometrias, dimensões e parâmetros generalizados referentes ao 1º modo fundamental da estrutura desacoplada com inércia constante.

| Geometria | H (m) | B (m) | H/B (m) | Classificação | K* (N/m) | m* (Kg) |
|------------------|--------------|--------------|----------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 100 | 10 | 10.00 | Esbelta | 30543731,4 | 2400000 |
| 2 | 100 | 25 | 4.00 | Esbelta | 449585854,6 | 6000000 |
| 3 | 100 | 40 | 2.50 | Espessa | 1662554209 | 9600000 |
| 4 | 100 | 55 | 1.82 | Espessa | 3784494648 | 13200000 |
| 5 | 100 | 70 | 1.43 | Espessa | 6704970302 | 16800000 |
| 6 | 100 | 85 | 1.18 | Espessa | 10222400580 | 20400000 |
| 7 | 100 | 100 | 1.00 | Espessa | 14139626210 | 24000000 |
| 8 | 100 | 115 | 0.87 | Espessa | 18302500260 | 27600000 |
| 9 | 100 | 130 | 0.77 | Espessa | 22603711730 | 31200000 |
| 10 | 100 | 145 | 0.69 | Espessa | 26973541030 | 34800000 |
| 11 | 100 | 160 | 0.63 | Espessa | 31368782460 | 38400000 |

Na Tabela 10.4 são apresentados os resultados do estudo paramétrico com a obtenção da frequência natural a partir de diferentes razões entre a altura e largura da estrutura (H/B). Isso, considerando as estruturas com inércia constante desde sua base até a sua crista.

Tabela 10.4– Frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura desacoplada com inércia constante.

| Geometria | H (m) | B (m) | H/B (m) | Frequência | Frequência | Dif. (%) |
|-----------|-------|-------|---------|---------------|---------------------|----------|
| | | | | Numérica (Hz) | Analítica ACPP (Hz) | |
| 1 | 100 | 10 | 10.00 | 0.57 | 0.57 | 0.00 |
| 2 | 100 | 25 | 4.00 | 1.37 | 1.38 | 0.73 |
| 3 | 100 | 40 | 2.50 | 2.06 | 2.08 | 0.97 |
| 4 | 100 | 55 | 1.82 | 2.64 | 2.69 | 1.89 |
| 5 | 100 | 70 | 1.43 | 3.10 | 3.18 | 2.58 |
| 6 | 100 | 85 | 1.18 | 3.47 | 3.55 | 2.31 |
| 7 | 100 | 100 | 1.00 | 3.76 | 3.85 | 2.39 |
| 8 | 100 | 115 | 0.87 | 4.00 | 4.10 | 2.50 |
| 9 | 100 | 130 | 0.77 | 4.19 | 4.27 | 1.91 |
| 10 | 100 | 145 | 0.69 | 4.35 | 4.42 | 1.61 |
| 11 | 100 | 160 | 0.63 | 4.47 | 4.55 | 1.79 |

Observa-se na Tabela 10.4 que os resultados através do ACPP e do MEF foram próximos, demonstrando pequena diferença percentual e, conseqüentemente, um bom acordo. A frequência avaliada pelo método pseudo-dinâmico possui o valor de 4,54Hz para todas as geometrias. Isso mostra uma vantagem do ACPP em relação ao método pseudo-dinâmico, visto que a variação de largura da estrutura influencia na rigidez. Esta, por sua vez, irá influenciar nas frequências fundamentais da estrutura. A Figura 10.3 apresenta um gráfico com os valores da Tabela 10.4.

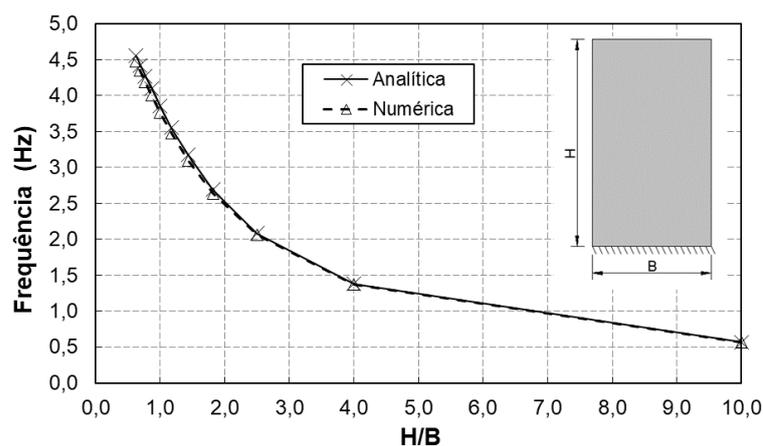


Figura 10.3: Frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes relações altura vs largura (H/B) da barragem com inércia constante.

A Figura 10.4 apresenta um gráfico com a deformada modal fundamental para as diferentes geometrias estudadas. Os valores foram obtidos através do MEF e a deformada modal

analítica teórica utilizada para o efeito de flexão e para o efeito do cisalhamento foram incluídas no gráfico.

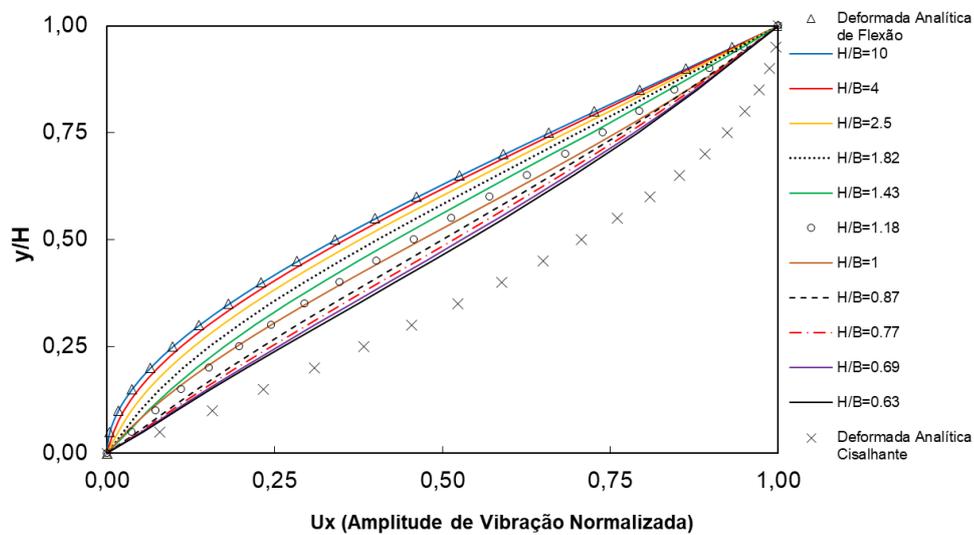


Figura 10.4: Deformadas modais analíticas e numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia constante.

O comportamento da deformada modal fundamental para as diferentes geometrias apresentadas na Figura 10.4 podem ser visualizadas na Figura 10.5.

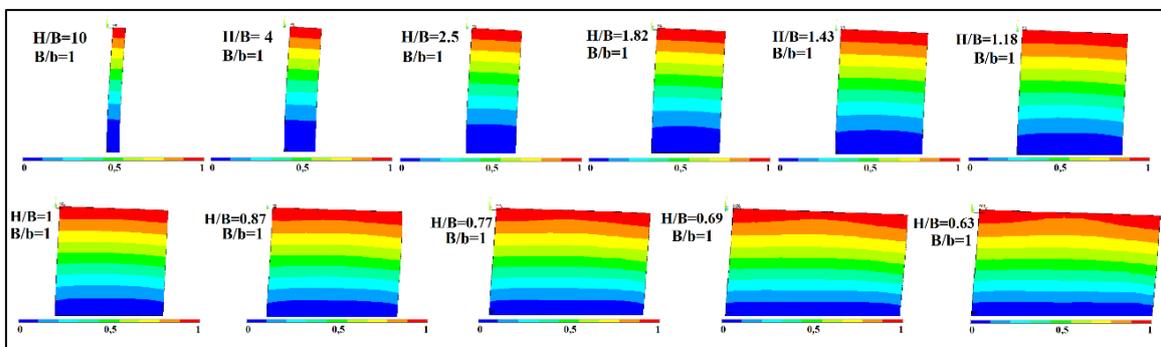


Figura 10.5: Deformadas modais numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia constante.

Nas Figuras 10.4 e 10.5, ao avaliar a altura (y/H) e a amplitude do modo (U_x), ambos normalizados, é possível notar que quanto mais espessa é a estrutura mais altas são as frequências. Além disso, quanto mais espessa é a estrutura, a sua deformada tende a uma deformada puramente de cisalhamento. Por outro lado, apesar das diferentes geometrias tenderem a deformada de cisalhamento, elas ficam mais próximas a deformada relativa ao efeito de flexão isolada, caracterizando-o como preponderante na deformada modal combinada.

Estrutura com Inércia Variável

No estudo das estruturas de barragens, com inércia variando linearmente da base a crista (Caso C), foi feita uma variação tanto na dimensão da largura de suas bases quanto na dimensão da largura de suas cristas.

Na Tabela 10.5 são apresentadas as dimensões estudadas e os valores obtidos pelo ACPP para a rigidez generalizada e massa generalizada. A classificação do índice esbeltez também é indicada. Neste caso, a maior largura (base da barragem) é que deve ser utilizada para classificar quanto a esbeltez.

Tabela 10.5– Geometrias, dimensões e parâmetros generalizados referentes ao 1º modo fundamental da estrutura desacoplada com inércia variável.

| Geometria | H (m) | B (m) | b (m) | H/B (m) | B/b (m) | Classificação | K* (N/m) | m* (Kg) |
|-----------|-------|-------|-------|---------|---------|---------------|-------------|------------|
| 1 | 100 | 100 | 10 | 1.00 | 10.00 | Espessa | 5553269234 | 6578778,24 |
| 2 | 100 | 80 | 10 | 1.25 | 8.00 | Espessa | 4144428446 | 5650160,85 |
| 3 | 100 | 60 | 12 | 1.67 | 5.00 | Espessa | 2735103372 | 5108681,73 |
| 4 | 100 | 50 | 15 | 2.00 | 3.33 | Espessa | 2019781990 | 5225080,43 |
| 5 | 100 | 40 | 16 | 2.50 | 2.50 | Espessa | 1244993818 | 4954340,87 |
| 6 | 100 | 30 | 18 | 3.33 | 1.67 | Esbelta | 624437559,6 | 4877170,44 |
| 7 | 100 | 25 | 20 | 4.00 | 1.25 | Esbelta | 404912261,1 | 5032154,35 |
| 8 | 100 | 10 | 10 | 10.00 | 1.00 | Esbelta | 30543731,4 | 2400000,00 |

Tendo em vista as diversas geometrias assumidas na Tabela 10.5, foram determinadas à primeira frequência natural fundamental através do ACPP, por meio da discretização numérica no MEF e pelo método pseudo-dinâmico.

Na Tabela 10.6 é apresentado os resultados obtidos no estudo paramétrico da frequência natural para diferentes relações entre a altura e largura da base estrutura (H/B), bem como das diferentes relações entre a largura da base e a largura da crista (B/b).

Observa-se que os resultados através do procedimento analítico do ACPP e do MEF foram próximos, demonstrando um bom acordo no procedimento analítico.

Tabela 10.6– Frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura desacoplada com inércia variável.

| Geometria | H (m) | B (m) | b (m) | H/B (m) | B/b (m) | Frequência Numérica (Hz) | Frequência Analítica ACPP (Hz) | Dif. (%) |
|-----------|-------|-------|-------|---------|---------|--------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | 100 | 100 | 10 | 1.00 | 10.00 | 4.80 | 4.62 | 3.75 |
| 2 | 100 | 80 | 10 | 1.25 | 8.00 | 4.27 | 4.31 | 0.94 |
| 3 | 100 | 60 | 12 | 1.67 | 5.00 | 3.45 | 3.68 | 6.67 |
| 4 | 100 | 50 | 15 | 2.00 | 3.33 | 2.90 | 3.13 | 7.93 |
| 5 | 100 | 40 | 16 | 2.50 | 2.50 | 2.34 | 2.52 | 7.69 |
| 6 | 100 | 30 | 18 | 3.33 | 1.67 | 1.73 | 1.80 | 4.05 |
| 7 | 100 | 25 | 20 | 4.00 | 1.25 | 1.41 | 1.46 | 3.55 |
| 8 | 100 | 10 | 10 | 10.00 | 1.00 | 0.57 | 0.57 | 0.00 |

De uma forma geral, pode-se observar que o ACPP que contempla a variação de rigidez representa adequadamente o comportamento da estrutura com variação inercial. Para relação B/b com valores maiores, as frequências aumentam devido ao maior ganho de inércia e, conseqüentemente, aumento de rigidez no sistema. Para valores maiores da relação H/B as frequências diminuem, explicitando que quanto mais esbelta a estrutura o efeito da flexão se torna preponderante e produz amplitudes de deslocamento maiores.

De maneira semelhante ao comportamento obtido da barragem com inércia constante, também foi evidenciado que as frequências obtidas para as diferentes geometrias com inércia variável pelo ACPP apresentaram, novamente, uma vantagem em relação ao método pseudo-dinâmico (que possui o valor de 4,54Hz), isto é, a obtenção das frequências levando em conta a geometria da estrutura. Isso reforça ainda mais os resultados discutidos anteriormente em relação a inércia constante. A Figura 10.6 apresenta um gráfico com os valores da Tabela 10.6.

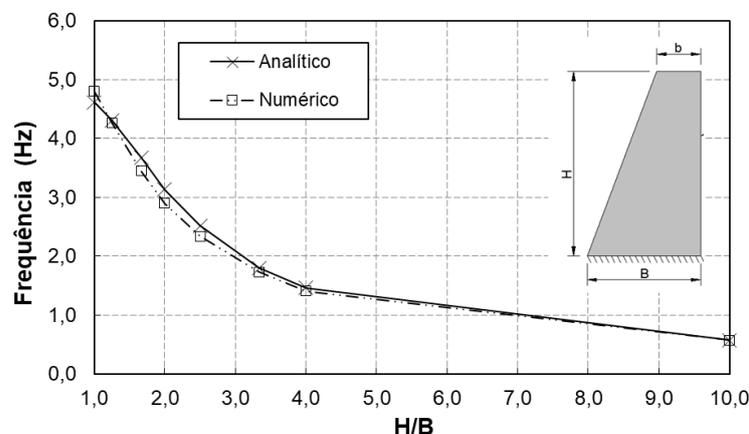


Figura 10.6: Estudo paramétrico das frequências naturais fundamentais *versus* a relação H/B para estrutura com inércia variável.

Por meio da Figura 10.6, confirma-se que os resultados foram satisfatórios. Para complementar a análise das frequências, os seus respectivos modos de vibração foram obtidos através do MEF, apresentados na Figura 10.7. A deformada modal analítica teórica utilizada para o efeito de flexão e para o efeito do cisalhamento também foram incluídas no gráfico desta figura.

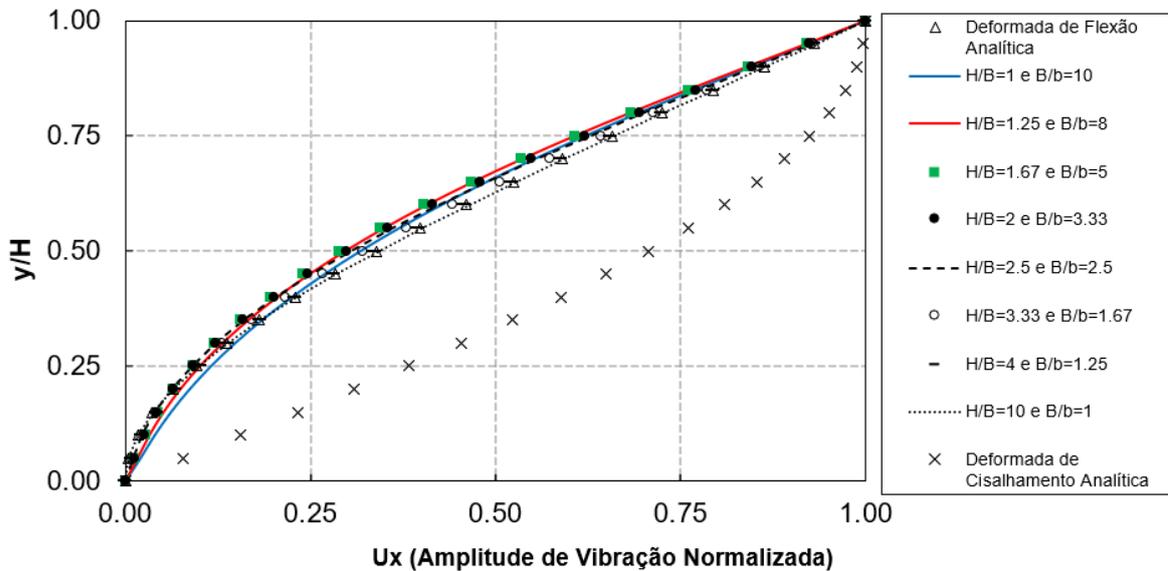


Figura 10.7: Deformadas modais analíticas e numéricas para diferentes relações geométricas da barragem com inércia variável.

A partir da Figura 10.7 pode-se inferir que a deformada modal fundamental para as diferentes configurações de barragens obtidas no modelo numérico é próxima da deformada idealizada de viga para o modelo analítico. Isso reforça o ACPD proposto neste trabalho, que por sua vez, contabiliza a variação de inércia apenas no efeito flexional da estrutura.

Apesar das diferentes geometrias de barragens possuírem características espessas, a deformada analítica isolada de cisalhamento, obtida delas, não predomina nos modelos que contemplam uma variação inercial. Assim, conclui-se que os efeitos combinados de flexão e cisalhamento nos modelos de barragens com variação inercial linear se aproximam da deformada de flexão de uma viga engastada-livre esbelta. A Figura 10.8 apresenta as deformadas modais fundamentais das estruturas também representadas pelo gráfico anterior.

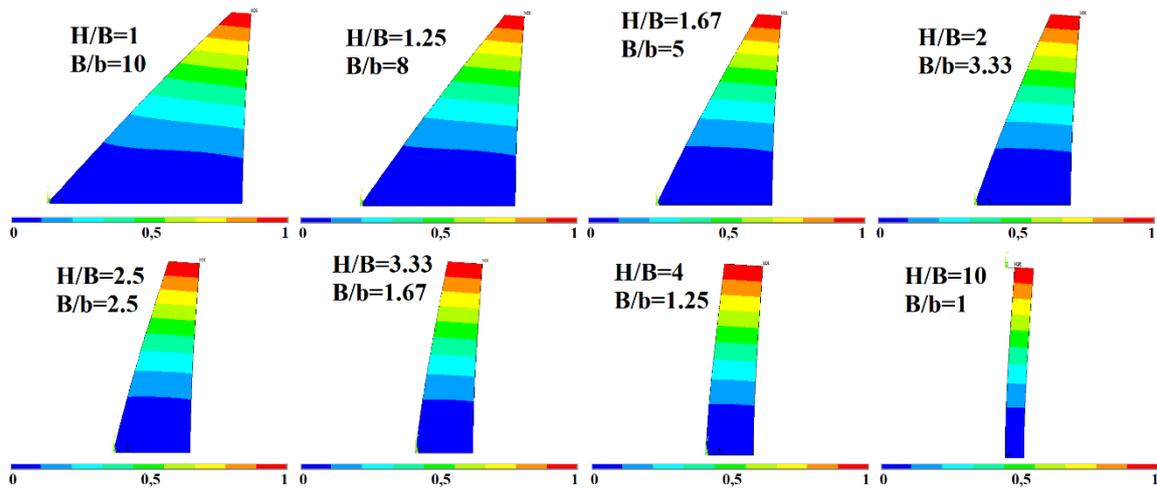


Figura 10.8: Deformadas modais numéricas para diferentes espessuras da barragem com inércia variável.

Portanto, uma vez compreendido e validado o ACPP para a análise da estrutura de barragens desacopladas (sem fluido), pode-se proceder o estudo da cavidade acústica desacoplada descrita no item a seguir.

10.3. CAVIDADE ACÚSTICA (FLUIDO DESACOPLADO)

10.3.1. Descrição e Parâmetros dos Modelos

Neste tópico são apresentados os resultados das análises das frequências e dos modos acústicos da cavidade acústica desacoplada. A formulação analítica da equação da onda acústica e a formulação expressa através dos métodos de energia foram empregadas nas análises. As modelagens numéricas foram feitas pelo MEF com uso do *software* ANSYS®.

As condições de contorno da cavidade acústica que foram estudadas nesta etapa seguiram a mesma nomenclatura apresentada no capítulo 5, sendo: fronteira rígida (denominada fechada) ou pressão nula (que é a condição de superfície livre sem movimento de ondas ou fronteira infinita do reservatório). Vale ressaltar que, nesta etapa do trabalho, o efeito *sloshing* ainda não é incorporado na análise e na obtenção dos resultados. A Figura 10.9 apresenta as condições de contorno avaliadas em uma cavidade acústica retangular.

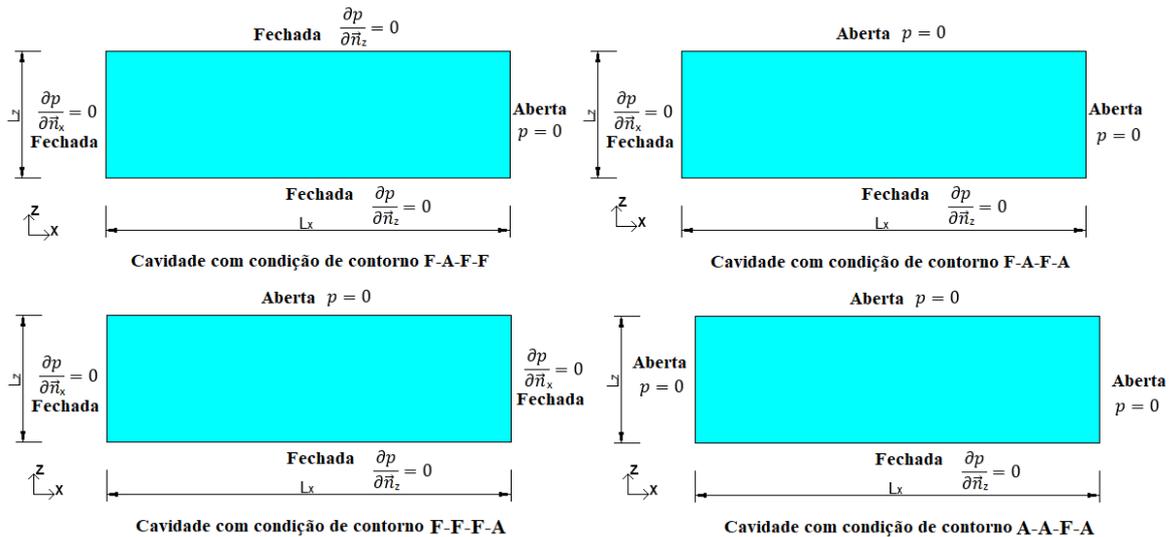


Figura 10.9: Ilustração das condições de contorno estudadas e da simbologia das dimensões da cavidade acústica.

Nas simulações realizadas o reservatório retangular foi assumido altura (L_z) de 100 m e com comprimento longitudinal (L_x) 400 m . A massa específica do fluido corresponde a 1000 kg/m^3 (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1500 m/s . A Figura 10.10 apresenta a modelagem numérica da cavidade acústica no plano feita com elemento finito FLUID29.

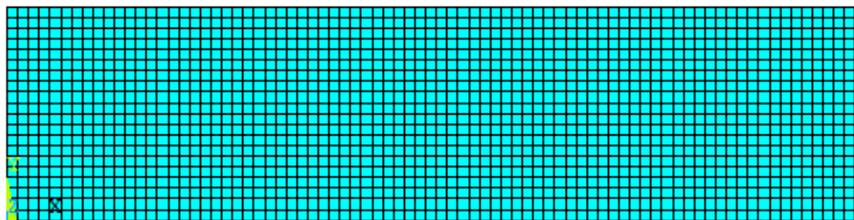


Figura 10.10: Modelo numérico da cavidade acústica no plano.

10.3.2. Frequências Naturais

Os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais associadas aos quatro primeiros modos de pressão acústica no domínio do fluido tiveram seus valores analíticos comparados com o MEF. A Tabela 10.7 apresenta esse comparativo das frequências acústicas.

Tabela 10.7– Frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes condições de contorno da cavidade acústica.

| Condição de Contorno | Lz (m) | Lx (m) | Ordem do Modo | Modo (m,n) | Frequência Numérica (Hz) | Frequência Analítica (Energia) (Hz) | Frequência Analítica (MMT) (Hz) | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] |
|----------------------|--------|--------|---------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| F-A-F-F | 100 | 400 | 1° | (1,0) | 0,937 | 0,937 | 0,937 | 0,00 | 0,00 |
| | 100 | 400 | 2° | (2,0) | 2,813 | 2,812 | 2,812 | 0,03 | 0,03 |
| | 100 | 400 | 3° | (3,0) | 4,688 | 4,687 | 4,687 | 0,02 | 0,02 |
| | 100 | 400 | 4° | (4,0) | 6,568 | 6,562 | 6,564 | 0,09 | 0,06 |
| F-A-F-A | 100 | 400 | 1° | (1,1) | 3,866 | 3,865 | 3,865 | 0,03 | 0,03 |
| | 100 | 400 | 2° | (2,1) | 4,688 | 4,687 | 4,687 | 0,02 | 0,02 |
| | 100 | 400 | 3° | (3,1) | 6,005 | 6,003 | 6,004 | 0,03 | 0,02 |
| | 100 | 400 | 4° | (4,1) | 7,563 | 7,557 | 7,559 | 0,08 | 0,05 |
| F-F-F-A | 100 | 400 | 1° | (0,1) | 3,751 | 3,750 | 3,750 | 0,03 | 0,03 |
| | 100 | 400 | 2° | (2,1) | 4,193 | 4,192 | 4,192 | 0,02 | 0,02 |
| | 100 | 400 | 3° | (3,1) | 5,305 | 5,302 | 5,303 | 0,06 | 0,04 |
| | 100 | 400 | 4° | (4,1) | 6,764 | 6,760 | 6,762 | 0,06 | 0,03 |
| A-A-F-A | 100 | 400 | 1° | (1,1) | 4,193 | 4,193 | 4,193 | 0,00 | 0,00 |
| | 100 | 400 | 2° | (2,1) | 5,305 | 5,303 | 5,304 | 0,04 | 0,02 |
| | 100 | 400 | 3° | (3,1) | 6,764 | 6,760 | 6,762 | 0,06 | 0,03 |
| | 100 | 400 | 4° | (4,1) | 8,393 | 8,385 | 8,388 | 0,09 | 0,06 |

Legenda: [1]: Diferença percentual entre MEF e Formulação Energética e [2]: Diferença percentual entre MEF e Método da Matriz de Transferência (MMT).

A partir da Tabela 10.7, nota-se que os resultados analíticos obtidos pelo método de energia e pelo método da matriz de transferência possuem, ambos, baixas diferenças percentuais em relação ao MEF. Diante dos resultados encontrados na Tabela e considerando os seus baixos erros percentuais, pode-se afirmar que a modelagem foi validada e que as diferentes frequências naturais foram condizentes. Logo, os valores demonstraram um bom acordo.

Infere-se ainda que a ordem das frequências naturais da cavidade acústica depende diretamente da condição de contorno e de sua geometria. Logo, é necessário analisar as deformadas modais de pressão acústica associadas as frequências naturais apresentadas na Tabela 10.7.

10.3.3. Deformadas Modais de Pressão (Pressão Hidrodinâmica Impulsiva)

Para tal estudo, foram obtidos os valores da pressão hidrodinâmica acústica que são discutidos e organizados para cada condição de contorno avaliada.

Deformadas Modais de Pressão Hidrodinâmica para Cavidade F-A-F-F

A Figura 10.11 apresenta os resultados obtidos dos modos de vibração de pressão acústica da cavidade com condição de contorno F-A-F-F. Os resultados no diagrama de cores no plano foram obtidos pelo MEF e os respectivos gráficos tridimensionais obtidos através da solução analítica pelo método energético. Esta que possui as mesmas funções de distribuição de pressões da equação da onda acústica.

A partir da Figura 10.11 é possível notar que, nas quatro primeiras frequências naturais, a pressão acústica possui uma característica de onda plana (OP) na direção longitudinal (L_x) e amplitude constante ao longo da direção transversal (L_z). Tal efeito é justamente pelo fato de a condição de contorno da cavidade ser fechada-fechada naquela direção transversal.

Verifica-se também que na direção longitudinal (L_x) são formadas ondas de pressão hidrodinâmica. Então, pode-se concluir que as quatro primeiras frequências acústicas estudadas são originadas de um efeito combinado entre o primeiro modo constante na direção transversal (L_z) da cavidade fechada-fechada ($n=0$) com os quatro primeiros modos acústicos de onda plana na direção longitudinal (L_x) da cavidade fechada-aberta ($m=1$ a 4).

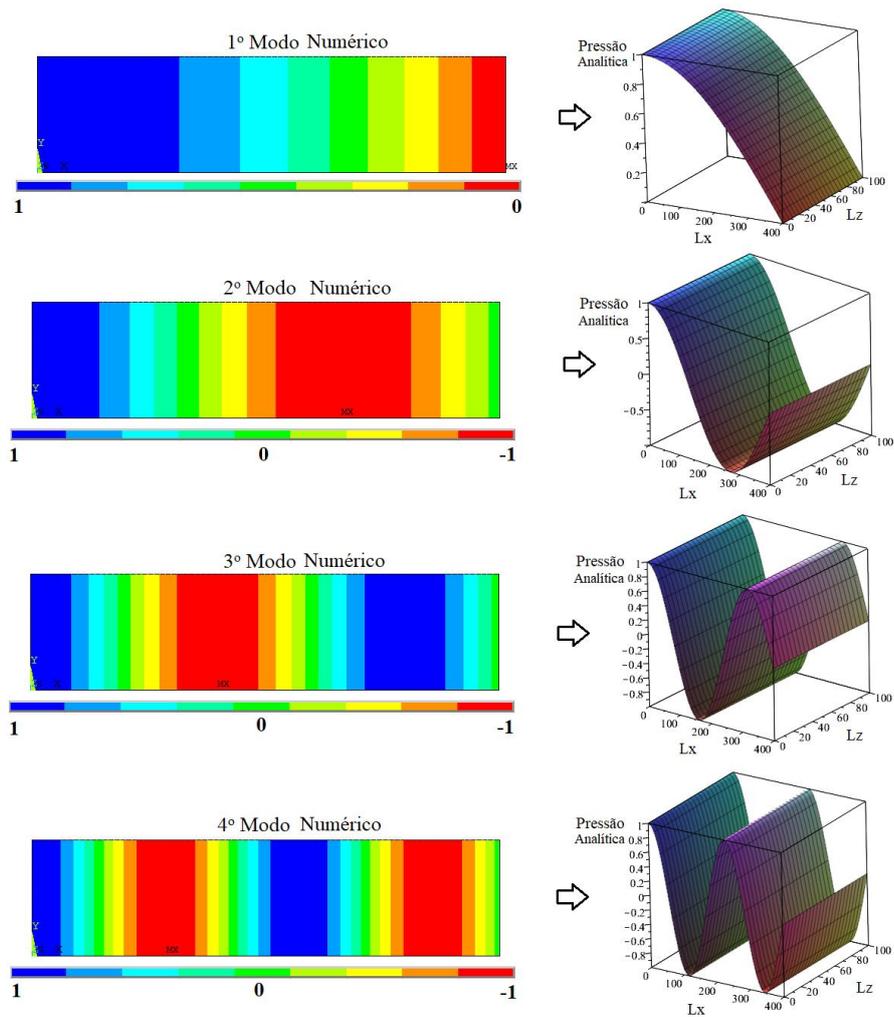


Figura 10.11: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-A-F-F.

Além dos diagramas em cores e dos gráficos tridimensionais apresentados na Figura 10.11, os valores de pressão hidrodinâmica são representados por meio de dois cortes feitos na cavidade acústica, sendo: um na direção transversal da interface esquerda da cavidade e o outro na direção longitudinal da base da cavidade. A indicação do local dos cortes (Figura 10.12) e os respectivos resultados, podem ser encontrados na Figura 10.13 e 10.14.

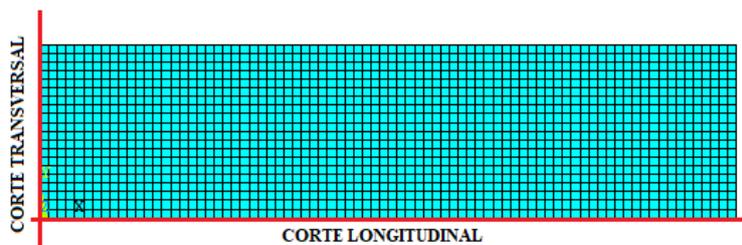


Figura 10.12: Posição do corte transversal e longitudinal na cavidade acústica.

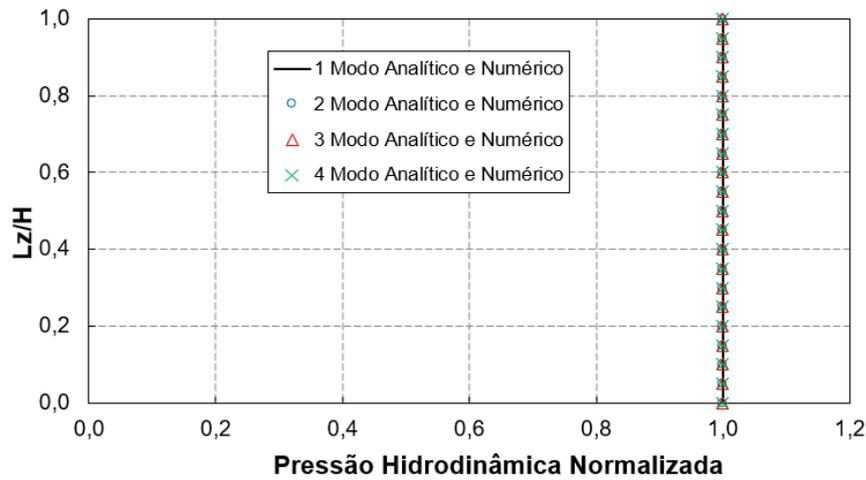


Figura 10.13: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas avaliadas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-A-F-F.

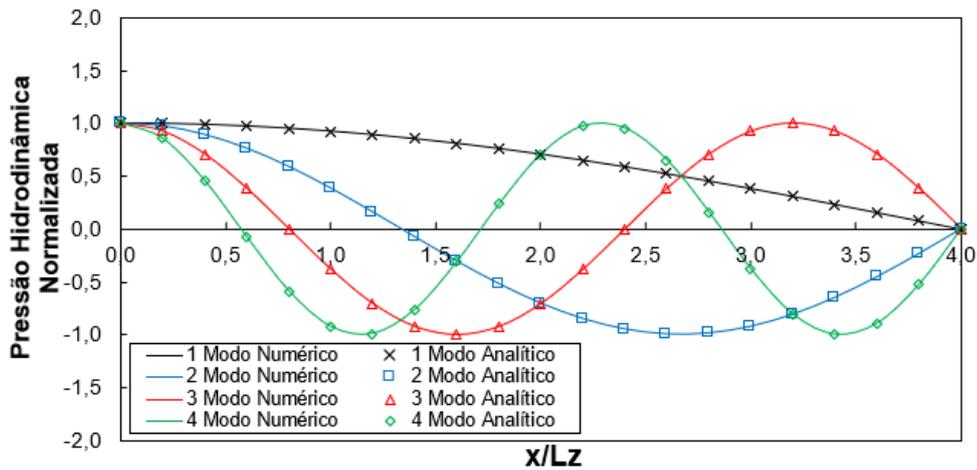


Figura 10.14: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas avaliadas no corte longitudinal da base da cavidade acústica F-A-F-F.

A partir das Figuras 10.13 e 10.14, é possível observar que, nas quatro primeiras frequências naturais, as deformadas modais de pressões hidrodinâmicas obtidas através da teoria analítica coincidem com os resultados encontrados pelo MEF.

Verifica-se também que na interface da cavidade com a fronteira rígida (direção transversal), as pressões hidrodinâmicas se distribuem constantemente ao longo da altura. Tal fato é explicado pela condição de fronteira rígida assumida neste local. Na direção longitudinal, as ondas de pressão se propagam na cavidade acústica, com modos de pressão hidrodinâmica de onda plana condizentes com as condições de contorno de fronteira rígida e pressão nula em fronteiras opostas.

Deformadas Modais de Pressão Hidrodinâmica para Cavidade F-A-F-A

Prosseguindo com a análise, a Figura 10.15 apresenta os resultados obtidos dos modos de vibração de pressão acústica da cavidade com condição de contorno F-A-F-A relacionados com as quatro primeiras frequências. Os resultados no diagrama de cores no plano foram obtidos pelo MEF e os respectivos gráficos tridimensionais obtidos através da solução analítica pelo método energético.

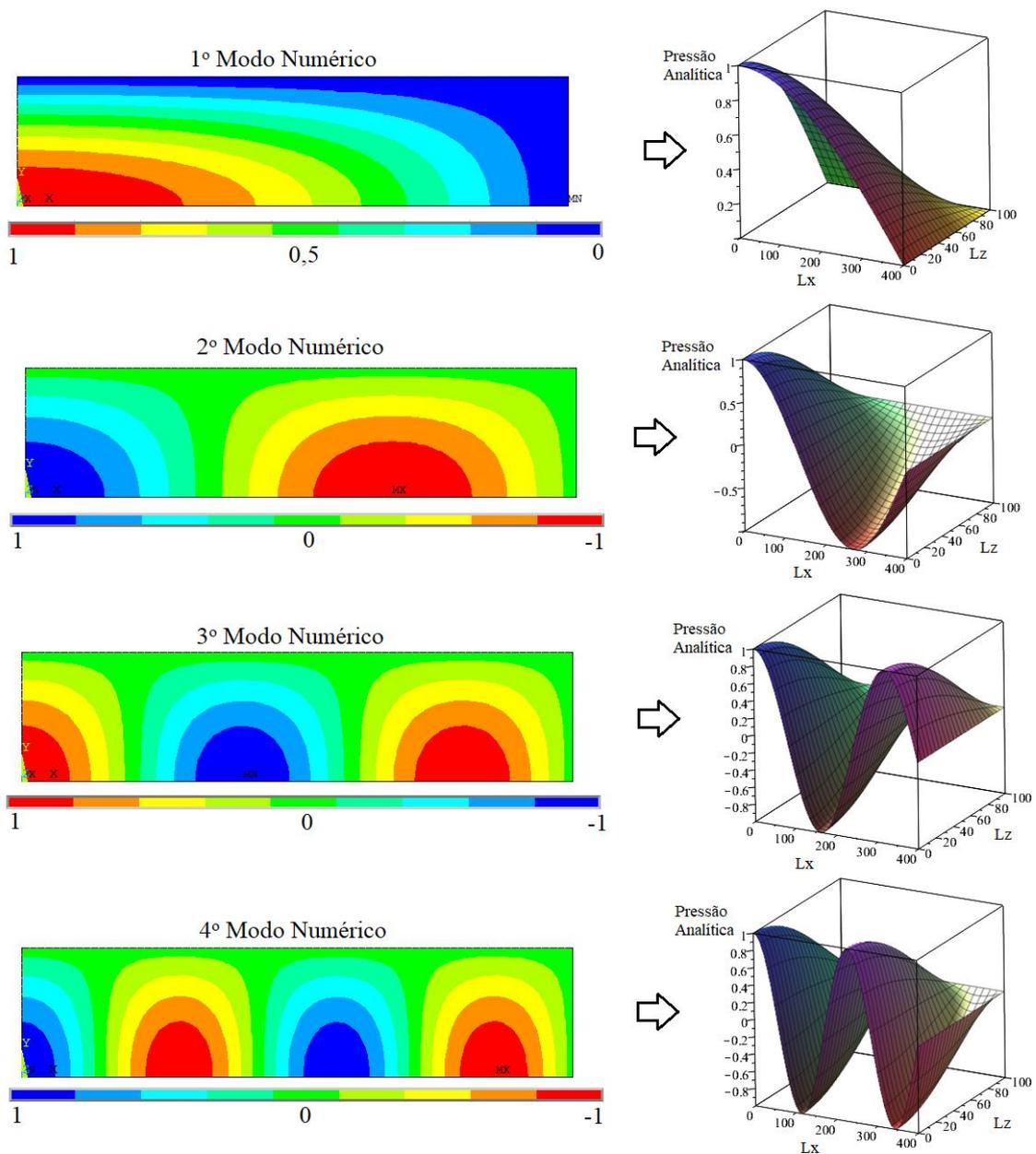


Figura 10.15: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-A-F-A.

A partir da Figura 10.15 é possível evidenciar que a condição de contorno fechada-aberta elimina a possibilidade de onda plana em ambas as direções da cavidade acústica (transversal e longitudinal). Além disso, foram encontradas ondas de pressão hidrodinâmica na direção longitudinal (L_x). Então, neste caso pode-se afirmar que, nas quatro primeiras frequências do fluido, existe uma composição entre um modo acústico transversal (L_z) da condição de contorno fechada-aberta ($n=1$) com os quatro primeiros modos longitudinais (L_x) da condição de contorno fechada-aberta ($m=1$ a 4).

Vale destacar que, na composição entre modos transversais e longitudinais, a frequência associada a direção transversal (L_z) predomina nas quatro primeiras frequências obtidas. Isso é explicado pelo fato de que a direção longitudinal possui uma maior dimensão ($L_x=400\text{m}$) quando comparada a direção transversal ($L_z=100\text{m}$), assim a amplitude transversal predomina na vibração. Logo, infere-se que a geometria da cavidade bidimensional influencia na ordem dos modos acústicos.

Neste caso também foram realizados os dois cortes na direção transversal e longitudinal da cavidade conforme Figura 10.12, sendo um na interface e o outro na base da cavidade acústica, respectivamente. Os resultados comparativos analíticos e numéricos das pressões hidrodinâmicas nestas regiões podem ser visualizados na Figura 10.16 e 10.17.

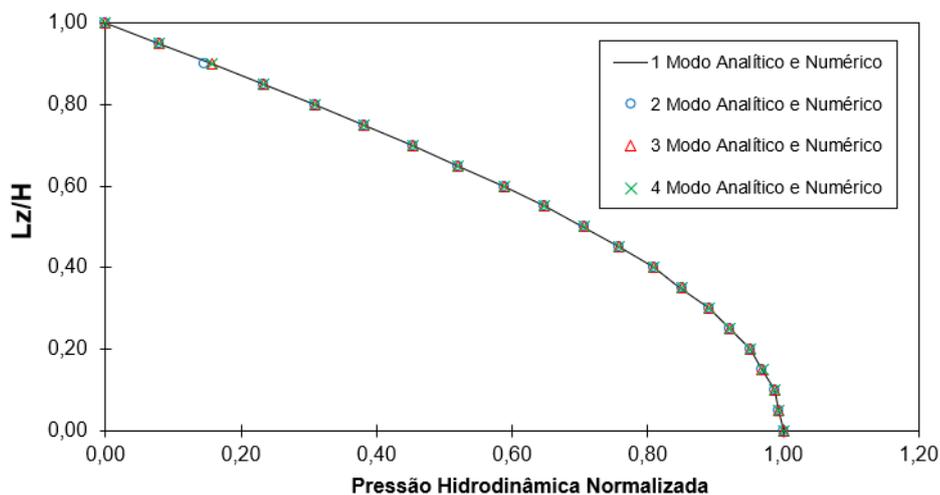


Figura 10.16: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-A-F-A.

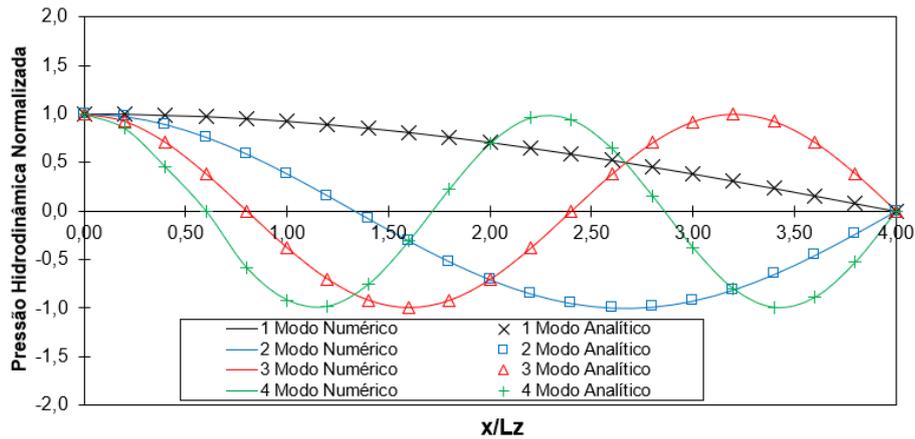


Figura 10.17: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas no corte longitudinal da base da cavidade acústica F-A-F-A.

A partir das Figuras 10.16 e 10.17, é possível notar que as pressões hidrodinâmicas obtidas através da técnica analítica coincidem com os resultados obtidos pelo MEF. O efeito da composição dos modos acústicos é confirmado na análise das curvas dos modos de pressão hidrodinâmica na direção transversal e longitudinal.

Vale destacar que, a condição de contorno F-A-F-A é um tipo de condição aplicada ao reservatório que pode ser considerada para um comparativo com o problema acoplado entre barragem-reservatório, visto que a menor frequência acústica limita o efeito da compressibilidade do fluido na análise acoplada. Em outras palavras, se a frequência acoplada for menor do que a primeira frequência acústica o regime é incompressível, caso a primeira frequência acústica seja alcançada o regime é necessariamente compressível.

Portanto, na análise da condição de contorno F-A-F-A cabe ressaltar que a menor frequência possível do reservatório bidimensional está atrelada a composição de um modo transversal acústico transversal (L_z) da condição de contorno fechada-aberta ($n=1$) com o primeiro modo acústico longitudinal (L_x) da condição de contorno fechada-aberta ($m=1$). Então, assumindo um comprimento $L_x \gg L_z$, a frequência fundamental do reservatório desacoplado é expressa por $F_w = c/4L_z$. Esta equação é bem difundida na literatura clássica e é amplamente utilizada no comparativo entre frequência acústica desacoplada e acoplada fluido-estrutura aplicada ao problema barragem-reservatório.

Deformadas Modais de Pressão Hidrodinâmica para Cavidade F-F-F-A

A Figura 10.18 apresenta os resultados obtidos dos modos de vibração de pressão acústica da cavidade com condição de contorno F-F-F-A relacionados com as quatro primeiras frequências. De maneira análoga as outras condições de contorno apresentadas, os resultados

no diagrama de cores no plano foram obtidos pelo MEF e os respectivos gráficos tridimensionais obtidos através da solução analítica pelo método energético.

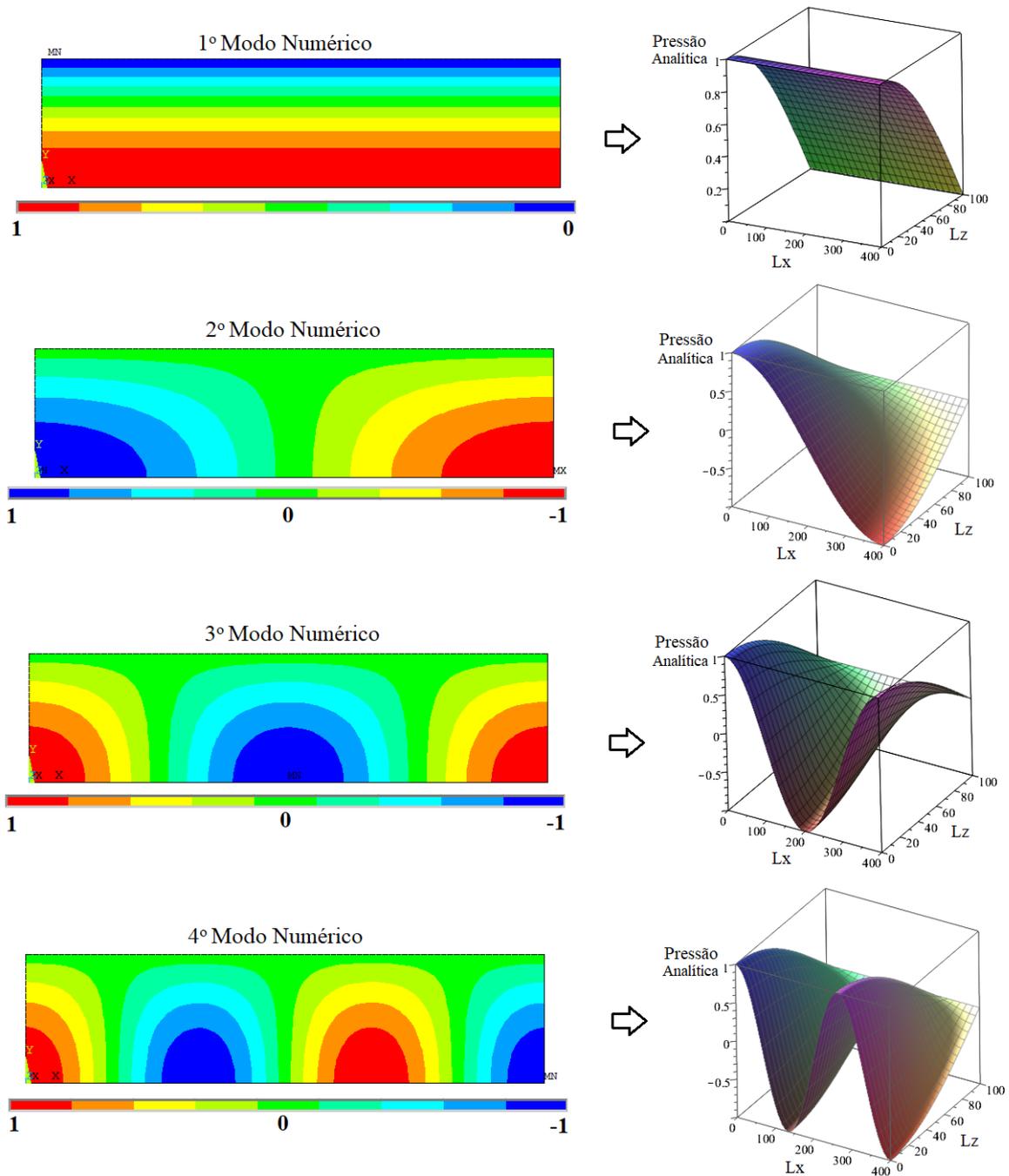


Figura 10.18: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica F-F-F-A.

Através da Figura 10.18 é possível observar que a primeira frequência da cavidade F-F-F-A é originada pela composição entre o primeiro modo acústico constante longitudinal ($m=0$) e o primeiro modo acústico de onda plana transversal fechada-aberta ($n=1$). As três próximas frequências estão atreladas pela composição entre os três primeiros modos acústicos

longitudinais (L_x) da condição fechada-fechada ($m=2$ a 4) com o primeiro modo acústico transversal (L_z) da condição fechada-aberta ($n=1$).

Semelhante ao estudo das outras condições de contorno, nesta análise também foram realizados os dois cortes na mesma posição na direção transversal e longitudinal da cavidade (conforme Figura 10.12), sendo na interface e na base da cavidade, respectivamente. Os resultados podem ser encontrados na Figura 10.19 e 10.20.

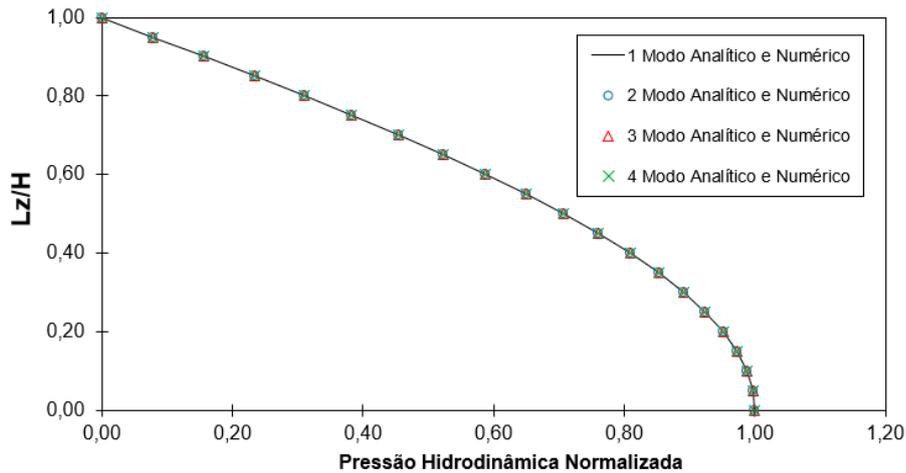


Figura 10.19: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas na interface do corte transversal da cavidade acústica F-F-F-A.

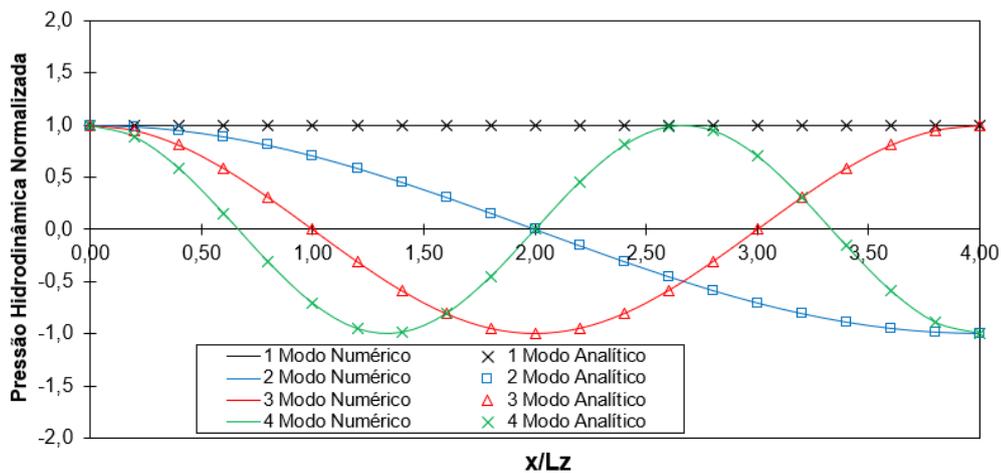


Figura 10.20: Comparativo das deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas e analíticas no corte longitudinal na base da cavidade acústica F-F-F-A.

Na análise dos resultados apresentados é possível notar que as pressões hidrodinâmicas obtidas através da técnica analítica coincidem com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos. A condição de contorno F-F-F-A é a que mais está próxima do problema de uma eclusa-reservatório para análise das pressões hidrodinâmicas impulsivas. Entretanto, a cavidade de uma câmara de uma eclusa possui, geralmente, dimensões transversais e

longitudinal da mesma ordem de grandeza. Então, modos transversais e longitudinais se combinam e as faixas de frequência de cada projeto devem ser analisada minunciosamente.

Deformadas Modais de Pressão Hidrodinâmica para Cavidade A-A-F-A

A Figura 10.21 apresenta os resultados obtidos dos modos de vibração de pressão acústica da cavidade com condição de contorno A-A-F-A relacionados com as quatro primeiras frequências. De maneira análoga as outras condições de contorno apresentadas, os resultados no diagrama de cores no plano foram obtidos pelo MEF e os respectivos gráficos tridimensionais obtidos através da solução analítica pelo método energético.

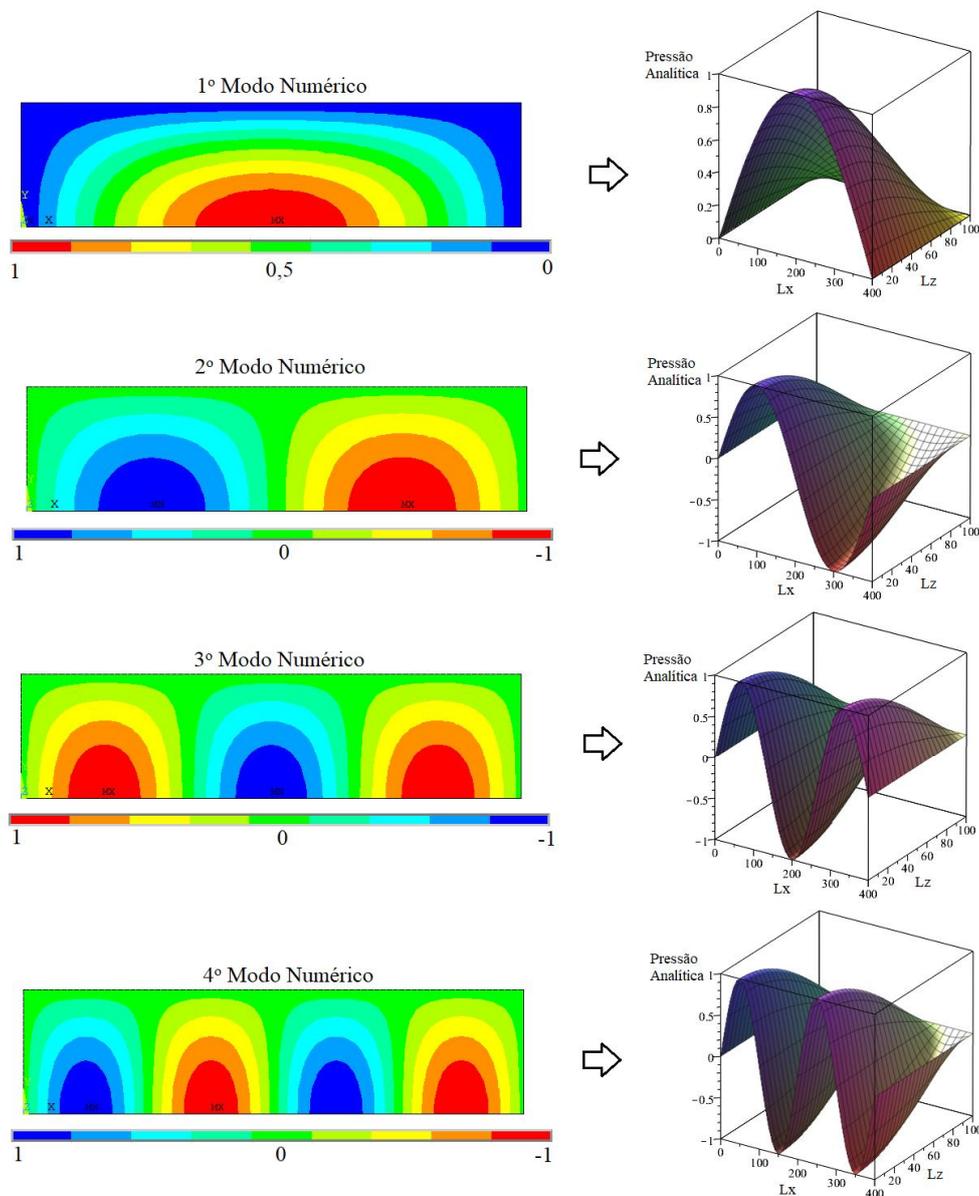


Figura 10.21: Comparativo nas deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas (bidimensionais) e analíticas (tridimensionais) para a cavidade acústica A-A-F-A.

Através da Figura 10.21 é possível observar que a primeira frequência da cavidade A-A-F-A é originada pela composição entre o primeiro modo acústico longitudinal aberta-aberta ($m=1$) e o primeiro modo acústico transversal fechada-aberta ($n=1$). As três próximas frequências estão atreladas pela composição entre os três próximos modos acústicos longitudinais (L_x) da condição aberta-aberta ($m=2$ a 4) com o primeiro modo acústico transversal (L_z) da condição fechada-aberta ($n=1$).

De maneira análoga as outras condições de contorno, no estudo das pressões hidrodinâmicas da cavidade A-A-F-A, modos transversais e longitudinais se combinam e as faixas de frequência de cada projeto devem ser analisada minuciosamente. Além disso, a condição aberta-aberta no sentido longitudinal representa uma aproximação entre uma fronteira infinita para o fluido, ou seja, sem a presença de nenhuma estrutura.

10.4. INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

10.4.1. Comparativo entre MMTM e ACPP para Estrutura Rígida-Móvel Acoplada com uma Cavidade F-A-F-F

A partir dos efeitos desacoplados da estrutura e do fluido pode-se proceder com a análise do problema de interação fluido-estrutura. Inicialmente foi realizado a análise de uma estrutura rígida-móvel acoplada com uma cavidade F-A-F-F. Então, o resumo da condição de contorno do problema é denominado IFE-A-F-F. A análise abordou um estudo comparativo entre os resultados das frequências naturais fundamentais obtidas através do ACPP com o MMTM e o MEF.

Descrição e Parâmetros dos Modelos

Nas simulações o reservatório retangular foi assumido o mesmo do fluido desacoplado, ou seja, com altura (L_z) de 100 m e com comprimento longitudinal (L_x) 400 m. A massa específica do fluido corresponde a 1000 kg/m³ (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1500 m/s. Foram admitidos diversos valores de rigidez generalizada na mola. A massa generalizada foi assumida constante com valor de 200000 kg. Assim, para um mesmo valor de massa, ao variar o valor da rigidez generalizada foi possível obter diferentes frequências. É válido ressaltar que o comprimento equivalente é de $L_{eq}=400m$. Na condição de contorno F-A-F-A não é feita nenhuma equivalência no ACPP.

No modelo numérico foram utilizados os elementos FLUID29, PLANE183 e COMBIN14 para discretizar a cavidade acústica, a estrutura e o elemento de mola, respectivamente. Na modelagem, a estrutura plana do pistão discretizada com PLANE183 possui alta rigidez para não impor nenhuma deformada na fronteira fluido-estrutura. O modelo numérico é apresentado na Figura 10.22.

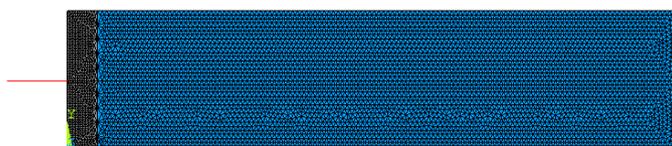


Figura 10.22: Modelo numérico de estrutura rígido-móvel acoplada com a cavidade acústica F-F-F-A.

A partir do modelo numérico e tendo por base as soluções analíticas, as frequências acopladas foram obtidas para diferentes valores de rigidez generalizada. Os resultados são apresentados abaixo.

Frequências Naturais Acopladas

Os resultados das frequências naturais relacionadas ao primeiro modo de vibração acoplada de massa adicional foram obtidos para diferentes rigidezes generalizada são apresentados na Tabela 10.8. O parâmetro de compressibilidade ($\lambda = \omega L_x / c$) do fluido classifica os resultados das frequências acopladas em termos do regime incompressível ($\lambda \ll 1$) e compressível ($\lambda \approx 1$) do fluido. Na análise do parâmetro de compressibilidade foi utilizada a frequência acoplada obtida pelo MMTM.

Tabela 10.8– Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas para estrutura rígida-móvel acoplada com cavidade F-A-F-F.

| K^* (N/m) ($\times 10^6$) | m^* (Kg) ($\times 10^5$) | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) MMTM | Freq. (Hz) ACPP | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] | Dif. (%) [3] | λ pelo MMTM | Regime |
|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------------|
| 0,1 | 2 | 0,0079 | 0,0079 | 0,0079 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,013 | Incompressível |
| 1 | 2 | 0,0250 | 0,0251 | 0,0251 | 0,00 | 0,40 | 0,40 | 0,042 | Incompressível |
| 5 | 2 | 0,0553 | 0,0560 | 0,0561 | 0,01 | 1,25 | 1,42 | 0,094 | Incompressível |
| 10 | 2 | 0,0775 | 0,0791 | 0,0794 | 0,38 | 2,02 | 2,39 | 0,133 | Incompressível |
| 100 | 2 | 0,2388 | 0,2439 | 0,2510 | 2,91 | 2,10 | 4,86 | 0,409 | Incompressível |
| 1000 | 2 | 0,5847 | 0,6208 | 0,7938 | 27,87 | 5,81 | 26,34 | 1,040 | Compressível |

Legenda: [1]: diferença percentual entre MMTM e ACPP; [2]: diferença percentual entre MMTM e MEF e [3]: diferença percentual entre ACPP e MEF.

A partir da Tabela 10.8 pode-se observar que os valores adotados de rigidez generalizada foram assumidos de forma que as frequências naturais acopladas se enquadrem em uma faixa de frequência baixa. Então, ao aumentar o parâmetro de rigidez, as frequências naturais crescem até atingir um valor próximo da primeira frequência acústica do reservatório desacoplado com condição de contorno F-A-F-F, ou seja, do valor de $F_{cav} = 0,937\text{Hz}$.

Verifica-se também que, quando as frequências acopladas se encontram em um regime incompressível os resultados analíticos e numéricos coincidem e demonstram um bom acordo entre as três teorias distintas. Quando o efeito da compressibilidade se torna significativo os resultados divergem, o que já é esperado, pois o fluido deixa de se comportar como uma massa adicional na estrutura e a cavidade passa a predominar durante o fenômeno de vibração, em que ondas acústicas na frequência do reservatório surgem no interior da cavidade. Assim, o parâmetro de compressibilidade (efeito da compressibilidade) justifica a diferença percentual quando o regime é próximo do compressível.

Outro ponto a salientar é que a formulação do MMTM produz resultados melhores do que o ACPP. A formulação do MMTM é compressível e a formulação do ACPP é incompressível, portanto, à medida que a compressibilidade do fluido se torna significativa os valores do MMTM são mais próximos dos valores numéricos.

Deformadas Modais de Pressão Acoplada

Além dos resultados das frequências naturais, as pressões hidrodinâmicas foram investigadas. Para o problema analisado, foi possível observar que, em um regime incompressível, o campo de pressão analítico pelo ACPP é o mesmo obtido pelo MEF. No regime próximo do compressível o campo de pressão acoplado reproduz o campo de pressão da primeira frequência acústica do reservatório.

A Figura 10.23 apresenta o deslocamento de corpo rígido da estrutura e o campo de pressão (“modo de rampa”) obtido pelo ACPP para a frequência natural acoplada de 0.0079 Hz, ou seja, dentro do regime incompressível. A amplitude de pressão assumida no modelo analítico é unitária, ou seja, $P=1$.

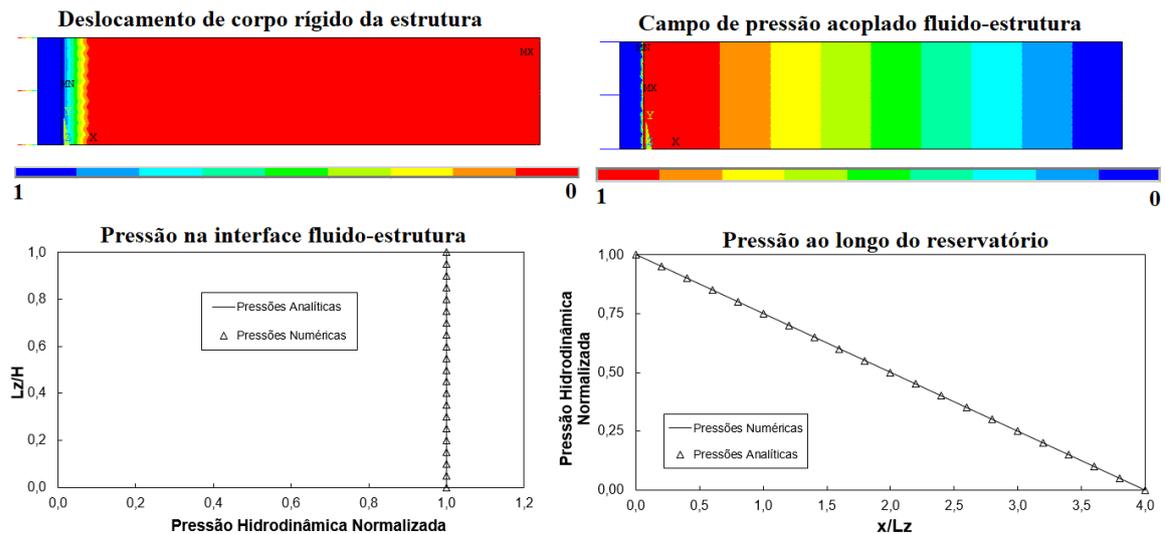


Figura 10.23: Comparativo do campo de pressão acoplado no regime incompressível para uma estrutura rígido-móvel acoplada com a cavidade acústica F-F-F-A.

Com o gráfico apresentado na Figura 10.23 é possível observar que os valores analíticos encontrados com o ACPD foram condizentes com o MEF e pode ser utilizada. O ACPD considera a energia cinética do fluido como uma massa adicional e o MMTM contempla a primeira frequência a partir de um efeito combinado entre o primeiro modo de amplitude constante na direção transversal (Lz) da cavidade fechada-fechada ($n=0$) com o primeiro modo de massa adicional na direção longitudinal (Lx) da cavidade. Neste caso, a estrutura movimentava toda a massa de fluido na cavidade acústica.

10.4.2. Aplicação do ACPD para Estrutura Flexível e Esbelta (Engastada-Livre) Acoplada com uma Cavidade Acústica

Neste tópico foi realizada a análise de uma estrutura flexível, com condição de contorno engastada-livre, acoplada com uma cavidade acústica. Então, o resumo da condição de contorno do problema é denominado IFE-A-F-A. O estudo abordou um comparativo do ACPD com o MEF.

Descrição e Parâmetros do Modelo

Os parâmetros do reservatório retangular discretizado no modelo numérico foram assumidos os mesmos dos casos anteriores, sendo com altura (Lz) de 100 m e com comprimento longitudinal (Lx) 400 m. A massa específica do fluido corresponde a 1000 kg/m^3 (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1500 m/s . É válido ressaltar que o

comprimento equivalente no ACPD depende do modo de vibração analisado e foi apresentado na Figura 6.12.

A estrutura discretizada foi de uma viga esbelta (efeito flexão preponderante), com condição de contorno engastada na base e livre no topo e de dimensões $b=B=1m$, ou seja, de inércia constante. A altura (H) da estrutura é igual a $100m$. A estrutura da viga possui massa específica de 2400 kg/m^3 , coeficiente de Poisson de $\nu=0,2$ e módulo de elasticidade $E=30\text{GPa}$.

No modelo numérico foram utilizados os elementos FLUID29 e PLANE183 para discretizar a cavidade acústica e a estrutura, respectivamente. O modelo numérico é apresentado na Figura 10.24.

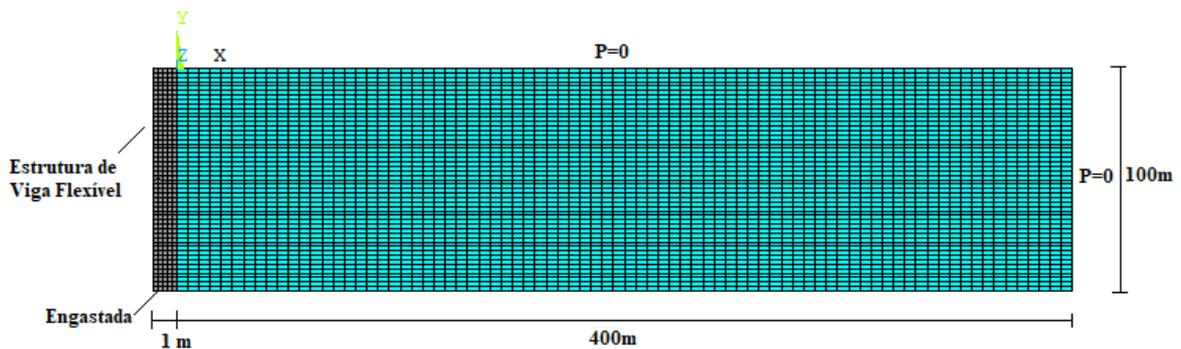


Figura 10.24: Modelo numérico de estrutura flexível engastada-livre acoplada com a cavidade acústica (IFE-A-F-A).

No ACPD, o comprimento equivalente da cavidade que representa a massa adicional de fluido movimentada, conforme visto no capítulo 6, depende do modo de vibração. Assim, a partir do modelo numérico e tendo por base o ACPD, as frequências e modos de vibração da estrutura desacoplada e acoplada com fluido são apresentados.

Análise da Condição de Contorno Engastada-Livre

Frequências Naturais

Os resultados das frequências naturais, desacoplada e acoplada fluido-estrutura, referente aos oito primeiros modos de vibração são apresentadas na Tabela 10.9. O valor do parâmetro de compressibilidade ($\lambda=\omega L_z/c$) em relação ao modelo numérico é apresentado. Vale ressaltar que, o regime incompressível e compressível do fluido indicado na Tabela é apresentado com base no parâmetro de compressibilidade igual a $\lambda=\pi/2$. O valor de $\lambda=\pi/2$

expressa a singularidade analisada nas soluções analíticas do problema de IBR obtidas a partir da Equação de Laplace (fluido incompressível) e da Equação da Onda Acústica (fluido compressível) analisada nos trabalhos de Pedroso (1997), Silva (2007) e Ribeiro (2010). O parâmetro $\lambda=\pi/2$ expressa uma proximidade da ressonância no problema acoplado em relação a frequência do modo fundamental acústico alcançada.

Tabela 10.9– Frequências naturais analíticas e numéricas para estrutura flexível engastada-livre desacoplada e acoplada com cavidade (IFE-A-F-A).

| Parâmetros Generalizados | | | Estrutura Desacoplada | | | | Estrutura Flexível Acoplada com Cavidade (IFE-A-F-A) | | | | |
|--------------------------|------------------------------|------|-----------------------|----------------|--------------------------|----------|--|----------------|----------|--------------------|----------------|
| K^* (N/m) | m^* (Kg) ($\times 10^5$) | Modo | $L_{eq.}$ (m) ACP | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica ACP | Dif. (%) | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) ACP | Dif. (%) | λ pelo MEF | Regime |
| 30905.91 | 2,4 | 1° | 25,24 | 0.057 | 0.057 | 0.00 | 0.017 | 0.017 | 2.0 | 0.01 | Incompressível |
| 1213797.05 | 2,4 | 2° | 16,67 | 0.358 | 0.358 | 0.03 | 0.125 | 0.127 | 1.6 | 0.05 | Incompressível |
| 9516364.80 | 2,4 | 3° | 9,35 | 1.001 | 1.002 | 0.11 | 0.440 | 0.453 | 3.0 | 0.18 | Incompressível |
| 36543140.24 | 2,4 | 4° | 6,79 | 1.960 | 1.964 | 0.21 | 0.890 | 1.004 | 12.8 | 0.37 | Incompressível |
| 99860198.53 | 2,4 | 5° | 5,24 | 3.235 | 3.246 | 0.35 | 1.601 | 1.820 | 13.7 | 0.67 | Incompressível |
| 216390178.30 | 2,33 | 6° | 5,57 | 4.825 | 4.850 | 0.51 | 2.572 | 2.634 | 2.4 | 1.08 | Incompressível |
| 424059415.70 | 2,34 | 7° | 2,57 | 6.725 | 6.774 | 0.72 | 3.798 | 4.674 | 23.0 | 1.59 | Compressível |
| 754170163.90 | 2,35 | 8° | 4,06 | 8.935 | 9.018 | 0.93 | 4.189 | 5.460 | 30.3 | 1.75 | Compressível |

A partir da Tabela 10.9 é possível observar que, no geral, tanto os valores da frequência natural desacoplada quanto da frequência acoplada tiveram pequenas diferenças percentuais para os três primeiros modos. Para a estrutura desacoplada os resultados foram satisfatórios em todos os oito modos analisados. A Figura 10.25 apresenta os modos de vibração da estrutura desacoplada obtida pelo MEF.

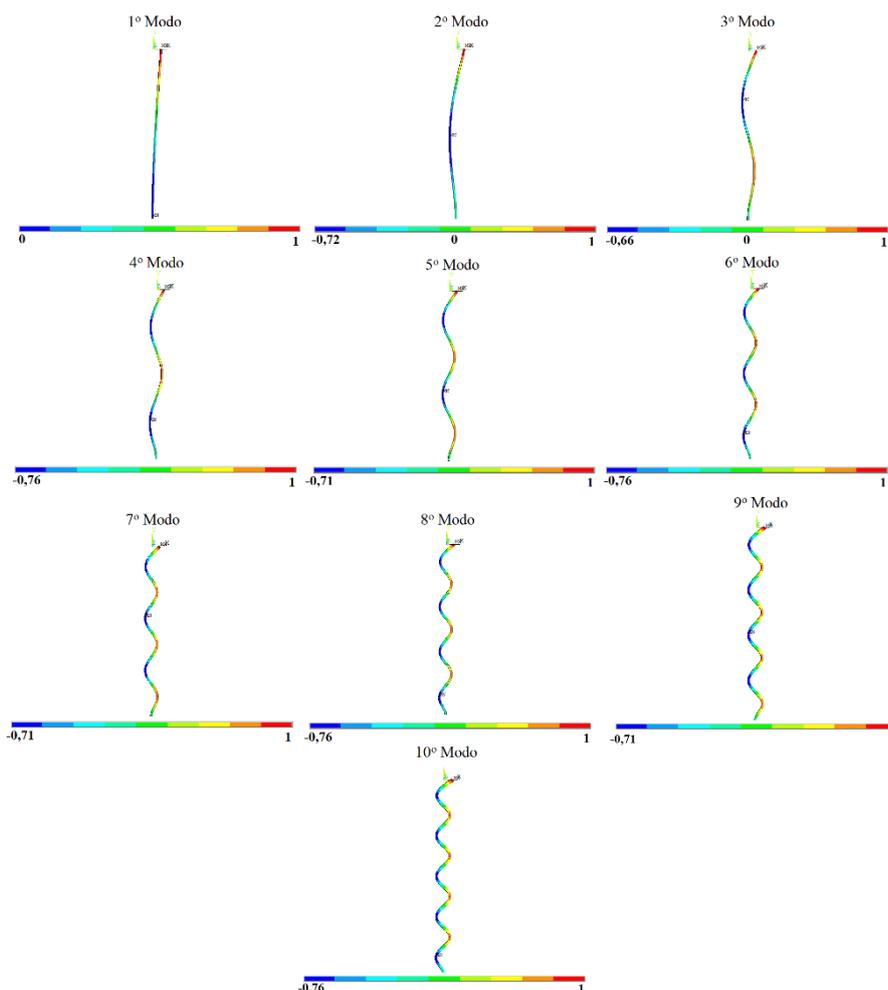


Figura 10.25: Modo de vibração numérico da estrutura de viga flexível desacoplada para os dez primeiros modos.

Reafirma-se ainda que, na Tabela 10.9, nos resultados da estrutura acoplada com fluido, à medida que as frequências aumentam as diferenças percentuais aumentam. Isso está associado ao efeito da compressibilidade do fluido que se torna significativo. Através do parâmetro de compressibilidade ($\lambda = \omega L_z / c$) do fluido pode-se notar que os resultados das frequências acopladas para os seis primeiros diferentes modos foram no regime incompressível.

Vale ressaltar ainda que, as frequências naturais dos sete primeiros modos da estrutura acoplada com fluido tiveram valores inferiores a frequência fundamental do reservatório desacoplado com condição de contorno A-A-F-A (4,193 Hz). Isso além de reforçar o regime de incompressibilidade do fluido, demonstra que a estrutura é muito flexível em relação a rigidez de pressão do fluido acústico tanto para frequência acústica da cavidade F-A-F-A quanto para cavidade A-A-F-A.

Nesse sentido, uma vez que as frequências acopladas são menores que a frequência fundamental da cavidade acústica, ou seja, em um regime incompressível, os sete primeiros diferentes modos de vibração acoplados apresentados na Tabela 10.9 são todos caracterizados por modos de massa adicional. O sétimo modo, apesar de ser caracterizado como modos de massa adicional, possui a sua frequência próxima da frequência acústica. A partir do oitavo modo, os resultados das frequências apresentam diferenças maiores devido ao efeito da compressibilidade do fluido e a ressonância acústica da cavidade A-A-F-A.

Deformadas Modais Acoplada Fluido-Estrutura

As pressões hidrodinâmicas associadas as dez primeiras frequências naturais foram investigadas. Para isto, é válido ressaltar que a metodologia do ACPP não reproduz os campos de pressão acoplados para problemas de estrutura flexível acoplada com cavidade acústica, pois a ideia da equivalência equipara apenas o efeito da massa adicional de um modelo bidimensional analisado pela equação de Laplace com um modelo analítico unidimensional simplificado. Portanto, os campos de pressões avaliados são exclusivamente obtidos pelo MEF.

Nesse sentido, foi feito inicialmente o estudo mais detalhado da deformada estrutural e das pressões hidrodinâmicas para o primeiro modo de vibração acoplado fluido-estrutura, ou seja, para a frequência natural de 0,017Hz da Tabela 10.9. A deformada da estrutura, desacoplada e acoplada, é apresentada na Figura 10.26.

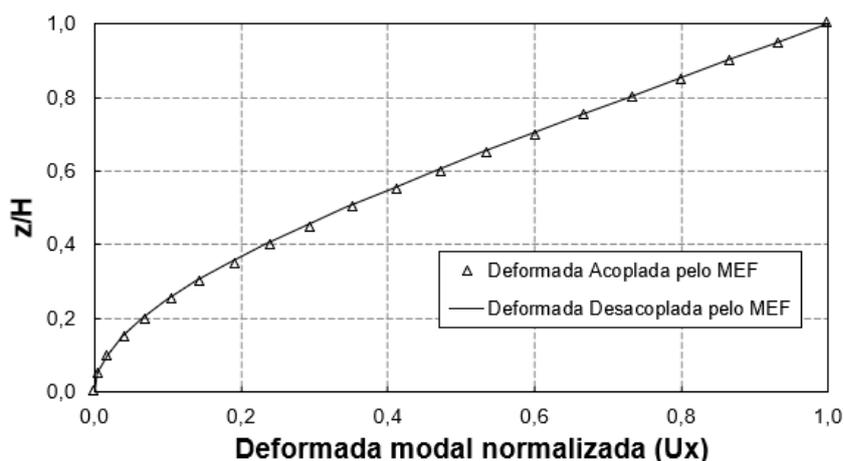


Figura 10.26: Modo de vibração numérico da estrutura de viga flexível desacoplada e acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$).

Através da Figura 10.26 é possível observar que o modo de vibração da estrutura acoplada com fluido é o mesmo da estrutura desacoplada. Tal fato é válido, uma vez que o modo

acoplado dominante de massa adicional (MA) é evidenciado na análise, ou seja, a deformada da estrutura predomina no fenômeno de vibração e a cavidade acompanha a deformada da estrutura.

Para avaliar o campo de pressão hidrodinâmica, foram realizados quatro cortes transversais (I-I na interface, A-A afastado 25m da interface, B-B afastado 60m da interface e C-C afastado 100m da interface) e cortes longitudinais (na base do reservatório, D-D em 33,33m de altura em relação a base, E-E em 50m de altura em relação a base e F-F em 66,67m de altura em relação a base). A Figura 10.27 apresenta o campo de pressão no sentido transversal do reservatório.

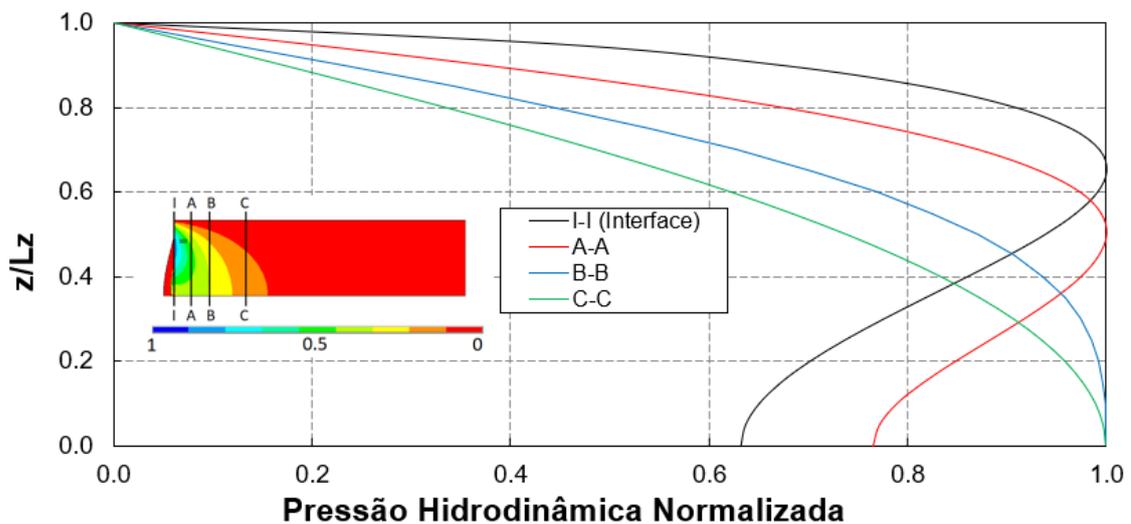


Figura 10.27: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura flexível acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$).

Nos cortes transversais apresentados na Figura 10.27 é possível notar que as pressões hidrodinâmicas são condizentes com os efeitos na cavidade. A amplitude de pressão hidrodinâmica na interface fluido-estrutura é originada devido ao movimento estrutura, ou seja, nula na superfície livre (devido a condição de contorno) e máxima na região de maior deformada da estrutura (maior perturbação no fluido). A Figura 10.28 apresenta o campo de pressão no sentido longitudinal do reservatório.

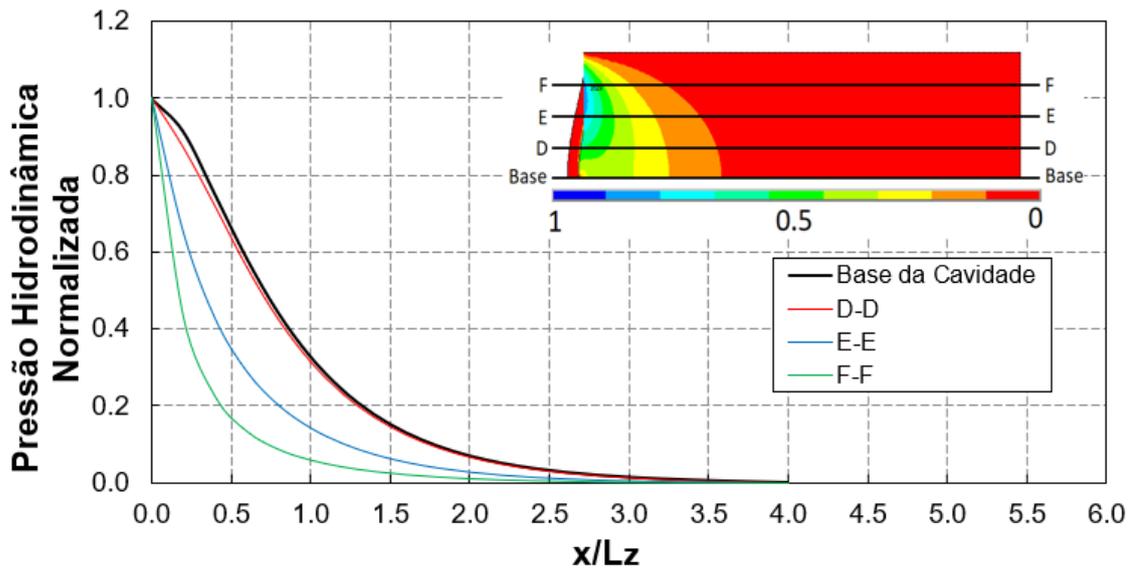


Figura 10.28: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura de viga flexível acoplada com fluido para 1º modo ($F_{IFE}=0,017\text{Hz}$).

Através da Figura 10.28 é possível notar que os cortes longitudinais mostram que as pressões hidrodinâmicas são maiores na base do reservatório. Além disso, à medida que a análise é feita mais afastada da estrutura, nota-se que as pressões vão diminuindo e se comportam matematicamente conforme uma função de decaimento exponencial. Isso condiz com o comportamento assumido na teoria de Westergard (1933) e é evidenciado nos estudos de Chopra (1974), nos trabalhos de Silva (2005) e de Ribeiro (2010).

Além do primeiro modo fundamental analisado, foram estudadas as pressões hidrodinâmicas associadas as dez primeiras frequências naturais acopladas. A Figura 10.29 apresenta as pressões hidrodinâmicas acopladas fluido-estrutura.

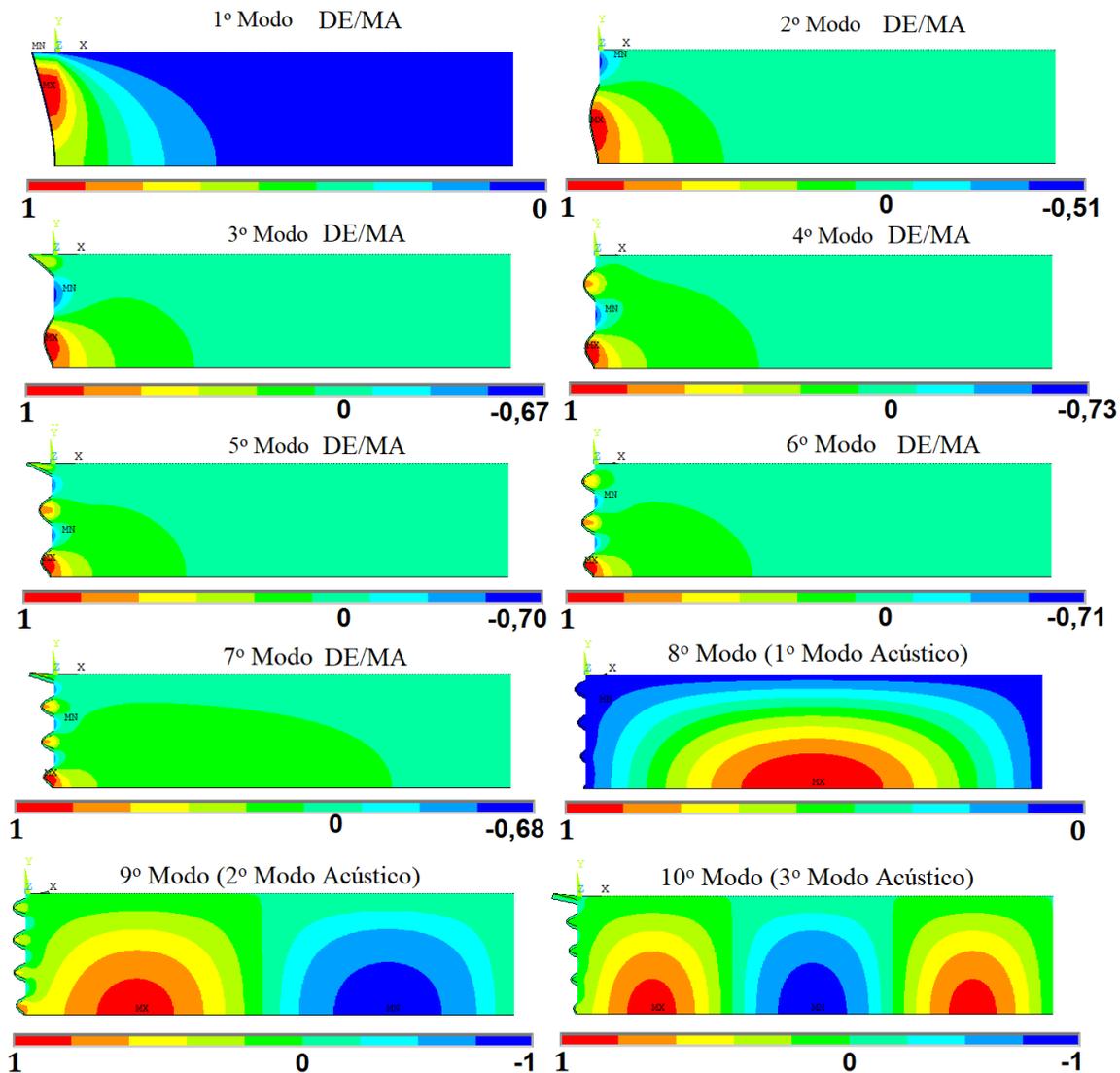


Figura 10.29: Pressões hidrodinâmicas numéricas da estrutura de viga flexível acoplada com fluido associadas as dez primeiras frequências.

A partir da Figura 10.29 é possível observar que as seis primeiras frequências naturais estão associadas a modos dominante estrutura de massa adicional (DE/MA). A sétima frequência (7° modo) apresenta características dominante estrutura de massa adicional, mas está próxima da ressonância acústica, caracterizado pelo parâmetro de compressibilidade por um regime compressível. As dez primeiras frequências foram comparadas na Tabela 10.9.

A primeira frequência acústica do reservatório com condição de contorno A-A-F-A possui valor de $F_{cav} = 4,193\text{Hz}$ (apresentada no item 10.3). Assim, verifica-se também que, com o aumento da faixa de frequência da estrutura, bem como os seus modos de vibração, a ressonância acústica é alcançada. Isso pode ser observado com a análise do 8°, 9° e 10° modo acoplado, que corresponde, respectivamente, ao 1°, 2° e 3° modo acústico desacoplado.

Em resumo, a análise das faixas de frequências feitas pode ter o efeito explicado e entendido da seguinte forma: a estrutura muito flexível ao vibrar em uma baixa frequência movimenta uma região de fluido que adere na estrutura como uma espécie de massa adicional no regime incompressível. Ao aumentar a faixa de frequência, a estrutura muito flexível perturba o fluido e os modos acústicos são evidenciados (regime compressível). Nestas altas frequências da estrutura, é como se ela estivesse atuando como uma fonte externa de energia dinâmica que excita o reservatório. Assim, ao analisar o caso de uma viga flexível esbelta com condição de contorno engastada-livre pode-se afirmar que os efeitos foram condizentes.

Uma vez que foi analisado o efeito nas estruturas flexíveis esbeltas de viga com condição de contorno engastada-livre, para demonstrar validade do ACPP na análise de barragens, um estudo paramétrico foi realizado com a estrutura flexível e espessa com condição de contorno engastada-livre, contemplando a variação inercial. O estudo é apresentado no tópico a seguir.

10.4.3. Aplicação do ACPP para Estrutura Flexível e Espessa (Engastada-livre) Acoplada com Cavidade Acústica (Caso da Barragem)

Neste tópico foram realizadas análises de estruturas flexíveis e espessas acopladas com uma cavidade. Então, o resumo da condição de contorno do problema é denominado IFE-A-F-A. O estudo abordou um comparativo do ACPP com o MEF e com o método pseudo-dinâmico.

Estudo Paramétrico para Barragem com Inércia Constante Acoplada com Cavidade Acústica (IFE-A-F-A)

Nesta análise, foram obtidos os resultados analíticos e numéricos referentes à primeira frequência natural fundamental e deformada modal para diferentes configurações geométricas de barragens flexíveis de inércia constante (com condição de contorno engastada-livre), desde estruturas esbeltas à espessas, ambas acopladas com uma cavidade acústica.

Os casos estudados aqui formam uma junção das análises da estrutura desacoplada (item 10.2 - Estruturas Desacopladas) com a cavidade acústica desacoplada (item 10.3 – Fluido Desacoplado). Então, os parâmetros geométricos e físicos tanto das estruturas desacopladas quanto para a cavidade desacoplada foram mantidos os mesmos já apresentados anteriormente. É válido ressaltar que o comprimento equivalente no ACPP para o modo fundamental (1º modo) é de $L_{x,eq}=25,243m$.

Assim, na Tabela 10.10 são apresentados os resultados comparativos das frequências naturais analíticas e numéricas obtidas no estudo paramétrico da barragem flexível de inércia constante acoplada com cavidade. O parâmetro de compressibilidade neste caso é expresso por $\lambda = \omega L_z / c$ calculado em relação a frequência numérica. Vale ressaltar que, o regime incompressível e compressível do fluido indicado na Tabela também é apresentado neste caso com base na singularidade do parâmetro de compressibilidade igual a $\lambda = \pi/2$.

Tabela 10.10– Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas do modo fundamental (1º modo) da estrutura com inércia constante acoplada com fluido.

| Geometria | H (m) | B (m) | H/B | Frequência MEF (Hz) | Frequência Analítica ACPP (Hz) | Dif. (%) | λ pelo MEF | Modo | Regime |
|-----------|-------|-------|-------|---------------------|--------------------------------|----------|--------------------|-------|----------------|
| 1 | 100 | 10 | 10,00 | 0,400 | 0,400 | 0,00 | 0,168 | DE/MA | Incompressível |
| 2 | 100 | 25 | 4,00 | 1,165 | 1,156 | 0,77 | 0,488 | DE/MA | Incompressível |
| 3 | 100 | 40 | 2,50 | 1,840 | 1,864 | 1,30 | 0,771 | DE/MA | Incompressível |
| 4 | 100 | 55 | 1,82 | 2,410 | 2,469 | 2,45 | 1,009 | DE/MA | Incompressível |
| 5 | 100 | 70 | 1,43 | 2,860 | 2,965 | 3,67 | 1,198 | DE/MA | Incompressível |
| 6 | 100 | 85 | 1,18 | 3,220 | 3,361 | 4,38 | 1,349 | DE/MA | Incompressível |
| 7 | 100 | 100 | 1,00 | 3,490 | 3,675 | 5,30 | 1,462 | DE/MA | Incompressível |
| 8 | 100 | 115 | 0,87 | 3,690 | 3,922 | 6,29 | 1,546 | DE/MA | Incompressível |
| 9 | 100 | 130 | 0,77 | 3,830 | 4,120 | 7,57 | 1,604 | DC | Compressível |
| 10 | 100 | 145 | 0,69 | 3,910 | 4,278 | 9,41 | 1,638 | DC | Compressível |
| 11 | 100 | 160 | 0,63 | 3,940 | 4,405 | 11,80 | 1,650 | DC | Compressível |

Observa-se na Tabela 10.10 que os resultados através do procedimento analítico do ACPP e do MEF foram próximos dentro do regime incompressível, demonstrando pequena diferença e um bom acordo. Outro aspecto importante é que à medida que a estrutura vai se tornando mais rígida, as frequências acopladas aumentam e o erro percentual também aumenta. Tal diferença percentual pode ser explicada pelo fato do efeito da compressibilidade se tornar significativo, na qual o fluido não se comporta como massa adicional.

Através do parâmetro de compressibilidade ($\lambda = \omega L_z / c$) do fluido pode-se notar que o resultado das frequências acopladas associadas da primeira à oitava geometria (1 a 8) foram no regime incompressível ($\lambda < \pi/2$), ou seja, tiveram valor menor do que a primeira frequência acústica fundamental do reservatório com condição de contorno F-A-F-A (que possui valor de $F_{cav} = 3,866 \text{ Hz}$). Com isso, os oito primeiros modos fundamentais acoplados que foram obtidos são dominantes estrutura de massa adicional, o que já se era esperado.

As frequências naturais acopladas que estão associadas as geometrias 9, 10 e 11 atingiram uma faixa de frequência entre a primeira e a segunda frequência acústica do reservatório, ou seja, entre 3,866Hz e 4,688Hz, respectivamente. Então, os modos acoplados associadas as geometrias 9, 10 e 11 estão contidos em um regime compressível, com características dominante cavidade, reproduzindo as características do primeiro modo acústico. Estes modos apresentaram leves alterações, que pode ser explicada pelo fato de a estrutura ser muito espessa e as suas deformadas tenderem a deformada de cisalhamento pura (isso pode ser constatado na Figura 10.30).

Nesse sentido, é possível notar que no problema acoplado a primeira frequência fundamental acoplada é sempre dominada pela estrutura, desde que ela seja inferior da frequência fundamental da cavidade. Quando a frequência acústica é alcançada ocorre uma transição entre um modo dominante estrutura de massa adicional e um modo puramente acústico. A Figura 10.30 apresenta um gráfico com os valores das frequências naturais acoplada *versus* as relações geométricas estudadas, ambas já apresentadas na Tabela 10.10.

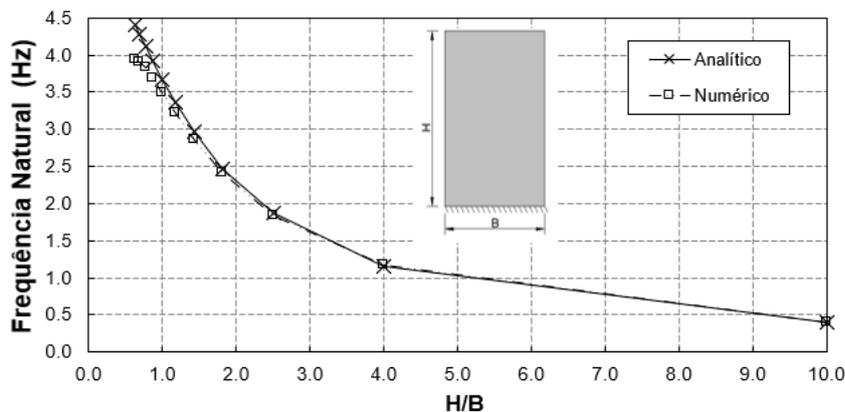


Figura 10.30: Comparativo das frequências naturais analíticas e numéricas para diferentes espessuras da barragem flexível com inércia constante acoplada com fluido.

Através da Figura 10.30 é possível entender que o ACPP aplicado na determinação da frequência fundamental acoplada fluido-estrutura é eficiente. Outro aspecto a salientar é que a frequência fundamental acoplada que foi avaliada pelo método pseudo-dinâmico possui o valor de 3,24Hz. Ao comparar este valor com as frequências obtidas para as diferentes geometrias, pode-se observar que fica evidente uma vantagem no ACPP em relação ao método pseudo-dinâmico, pois a variação de rigidez influencia nas frequências fundamentais da estrutura.

Para complementar a análise, a Figura 10.31 apresenta as deformadas da estrutura acoplada com o fluido. A Figura 10.32 apresenta o campo de pressão hidrodinâmico do reservatório acoplado com a estrutura. Ambas as figuras abordam as deformadas estruturais e de pressão para as diferentes relações geométricas estudadas na Tabela 10.10.

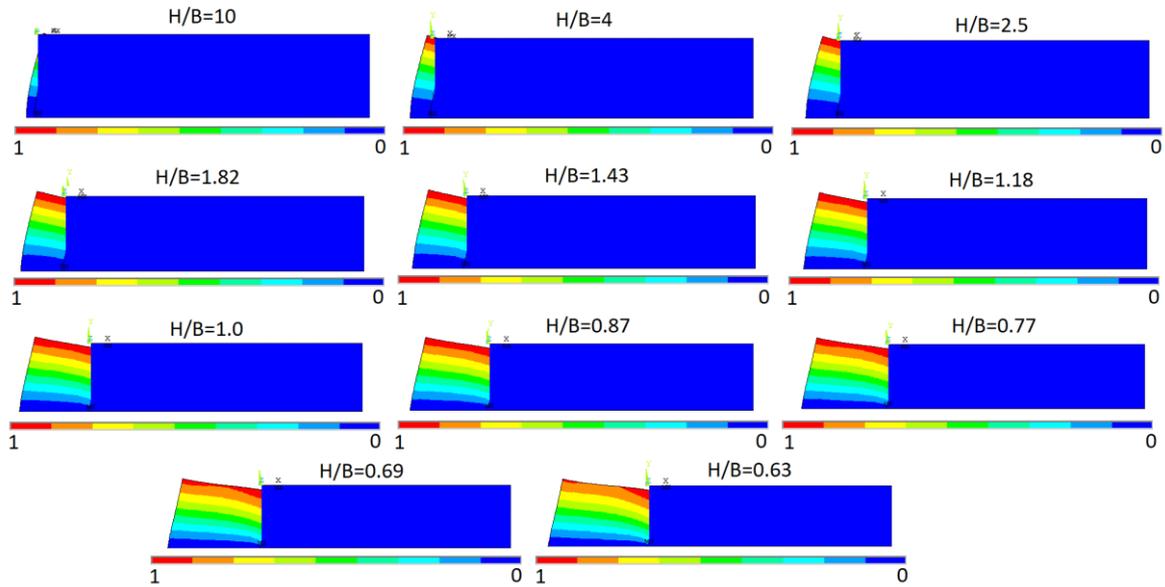


Figura 10.31: Deformadas modais numéricas U_x da estrutura para diferentes relações (H/B) da barragem flexível com inércia constante e acoplada com fluido.

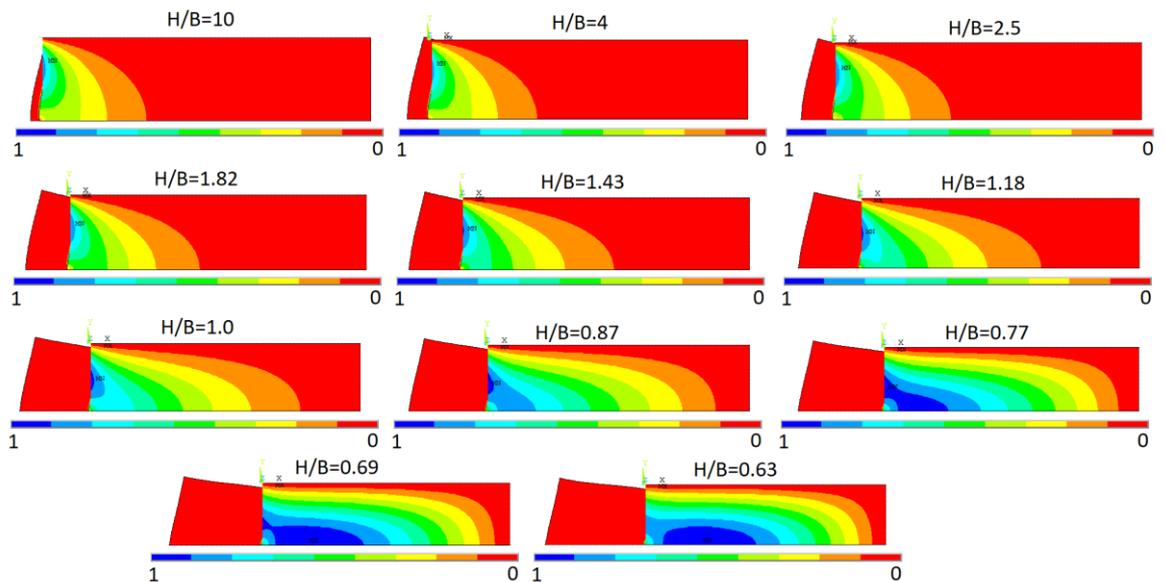


Figura 10.32: Pressões hidrodinâmicas numéricas para diferentes relações (H/B) da barragem flexível com inércia constante acoplada com fluido.

Ao avaliar os modos de vibração, todos normalizados, é possível notar que os efeitos das deformadas da estrutura acoplada se aproximaram das deformadas da estrutura no vácuo (apresentadas no capítulo 10.2). No que se diz respeito às pressões hidrodinâmicas, é nítido

que em baixas frequências o fluido faz um efeito de massa adicional na estrutura, onde uma região de fluido próximo da estrutura é movimentada. Porém, à medida que as frequências aumentam, as frequências tendem ao primeiro modo de pressões acústicas fundamental da cavidade acústica F-A-F-A.

Estudo Paramétrico da Barragem com Inércia Variável Acoplada com Cavidade (IFE-A-F-A)

Nesta análise, foram obtidos os resultados analíticos e numéricos referentes à primeira frequência natural fundamental e deformada modal para diferentes configurações geométricas de barragens flexíveis de inércia variável (com condição de contorno engastada-livre), desde estruturas esbeltas à espessas, ambas acopladas com uma cavidade acústica.

Estes casos aqui analisados também formam uma junção das análises da estrutura desacoplada (item 10.2 - Estruturas Desacopladas) com a cavidade acústica desacoplada (item 10.3 – Fluido Desacoplado). Então, os parâmetros geométricos e físicos tanto das estruturas desacopladas quanto para a cavidade desacoplada foram mantidos os mesmos já apresentados anteriormente. Observa-se que os resultados através do procedimento analítico do ACPP e do MEF foram próximos, demonstrando pequena diferença e um bom acordo no procedimento analítico.

Tabela 10.11– Comparativo das frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas da estrutura com inércia variável e acoplada com fluido.

| Geometria | H (m) | B (m) | b (m) | H/B | B/b | Frequência MEF (Hz) | Frequência Analítica ACPP (Hz) | Dif. (%) | λ pelo MEF | Modo | Regime |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------------------------------|----------|--------------------|-------|---------|
| 1 | 100 | 10 | 10 | 10.00 | 1.00 | 0,400 | 0,400 | 0,00 | 0,168 | DE/MA | Incomp. |
| 2 | 100 | 25 | 20 | 4.00 | 1.25 | 1,160 | 1,165 | 0,43 | 0,486 | DE/MA | Incomp. |
| 3 | 100 | 30 | 18 | 3.33 | 1.67 | 1,435 | 1,462 | 1,88 | 0,601 | DE/MA | Incomp. |
| 4 | 100 | 40 | 16 | 2.50 | 2.50 | 1,940 | 2,053 | 5,82 | 0,813 | DE/MA | Incomp. |
| 5 | 100 | 50 | 15 | 2.00 | 3.33 | 2,410 | 2,570 | 6,64 | 1,009 | DE/MA | Incomp. |
| 6 | 100 | 60 | 12 | 1.67 | 5.00 | 2,840 | 3,010 | 5,99 | 1,190 | DE/MA | Incomp. |
| 7 | 100 | 80 | 10 | 1.25 | 8.00 | 3,470 | 3,584 | 3,29 | 1,454 | DE/MA | Incomp. |
| 8 | 100 | 100 | 10 | 1.00 | 10.00 | 3,790 | 3,931 | 3,72 | 1,588 | DC | Comp. |

A partir da Tabela 10.11 é possível observar que o procedimento analítico do ACPP, que contempla a variação de rigidez e massa, representa adequadamente o comportamento da estrutura. Para valores mais altos de relações H/B as frequências diminuem, explicitando que quanto mais esbelta a estrutura o efeito da flexão se torna preponderante e produz amplitudes

de deslocamento maiores. Quanto mais espessa, maior rigidez no sistema e frequências mais altas são evidenciadas. Em ambas as situações (esbelta e espessa) os valores das frequências acopladas foram satisfatórios.

Outro aspecto que deve ser ressaltado é que a frequência fundamental acoplada que foi obtida pelo método pseudo-dinâmico possui o valor de 3,24Hz. Ao comparar este valor obtido com as frequências naturais, apresentados na Tabela 10.10, que foram encontradas para as diferentes geometrias pelo ACPP e pelo MEF, fica evidente uma vantagem no ACPP em relação ao método pseudo-dinâmico. Isso pode ser explicado pelo fato de o ACPP incorporar a variação de inércia que tem influência nas frequências fundamentais acopladas. A Figura 10.33 apresenta um gráfico com o comparativo das frequências apresentadas na Tabela 10.11.

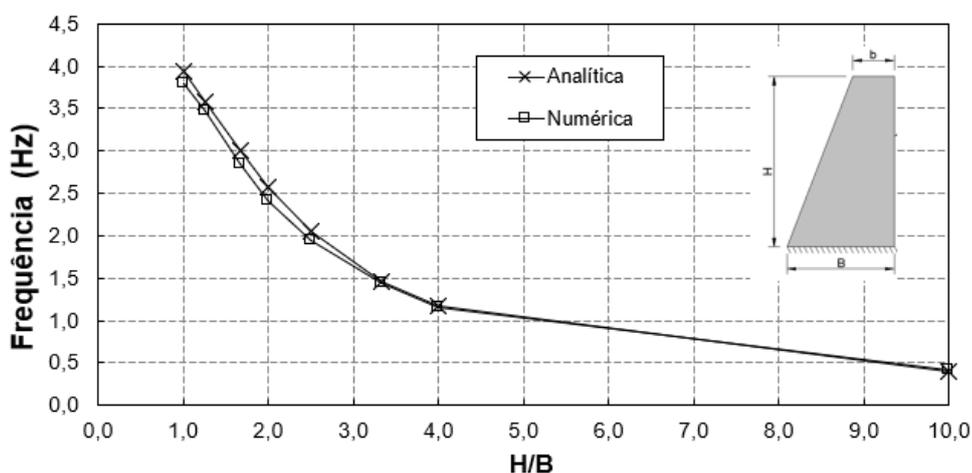


Figura 10.33: Comparativo das frequências naturais fundamentais com diferentes relações H/B para a estrutura com inércia variável e acoplada com fluido.

Através da Figura 10.33 e da Tabela 10.11 é possível visualizar que o ACPP aplicado na determinação da frequência fundamental acoplada fluido-estrutura é eficiente. Com exceção da geometria 8, as demais geometrias estudadas tiveram o parâmetro de compressibilidade no regime incompressível ($\lambda < \pi/2$). Todas as frequências acopladas numéricas não ultrapassaram a frequência fundamental da cavidade acústica (3,866Hz). Então, a geometria 8 apresenta uma frequência próxima da ressonância acústica da cavidade F-A-F-A com um modo dominante cavidade e as demais geometrias apresentam frequências acopladas caracterizadas por um modo dominante estrutura de massa adicional.

O comportamento dos modos de vibração da estrutura e dos campos de pressão hidrodinâmica que foram obtidos pelo MEF são apresentados na Figura 10.34 e Figura

10.35. Ambas as Figuras abordam as deformadas para as diferentes relações geométricas (H/B e B/b).

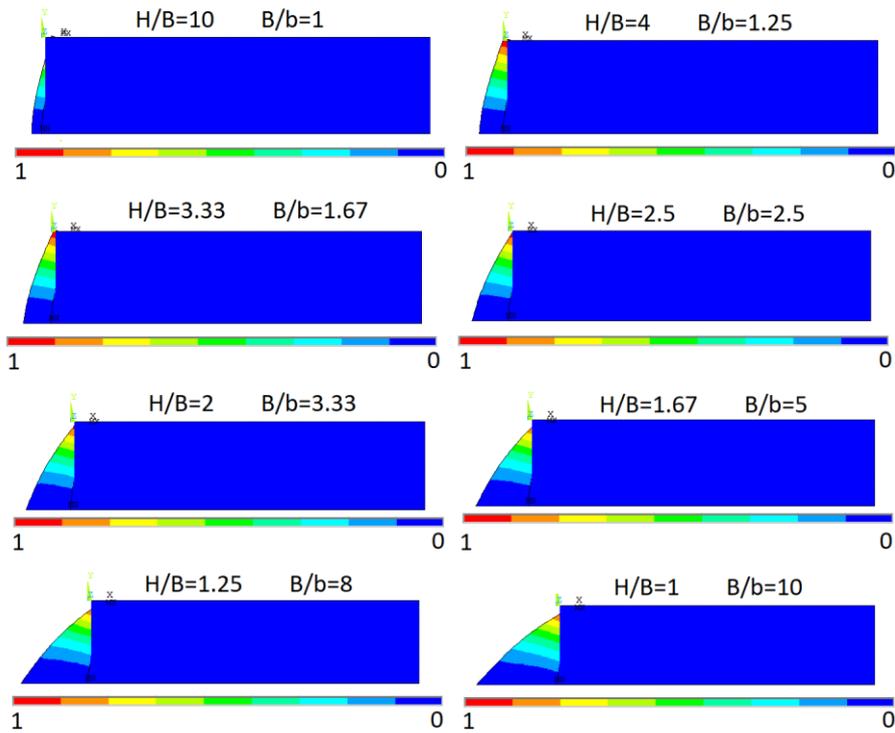


Figura 10.34: Deformadas modais numéricas U_x da barragem flexível com inércia variável e acoplada com fluido.

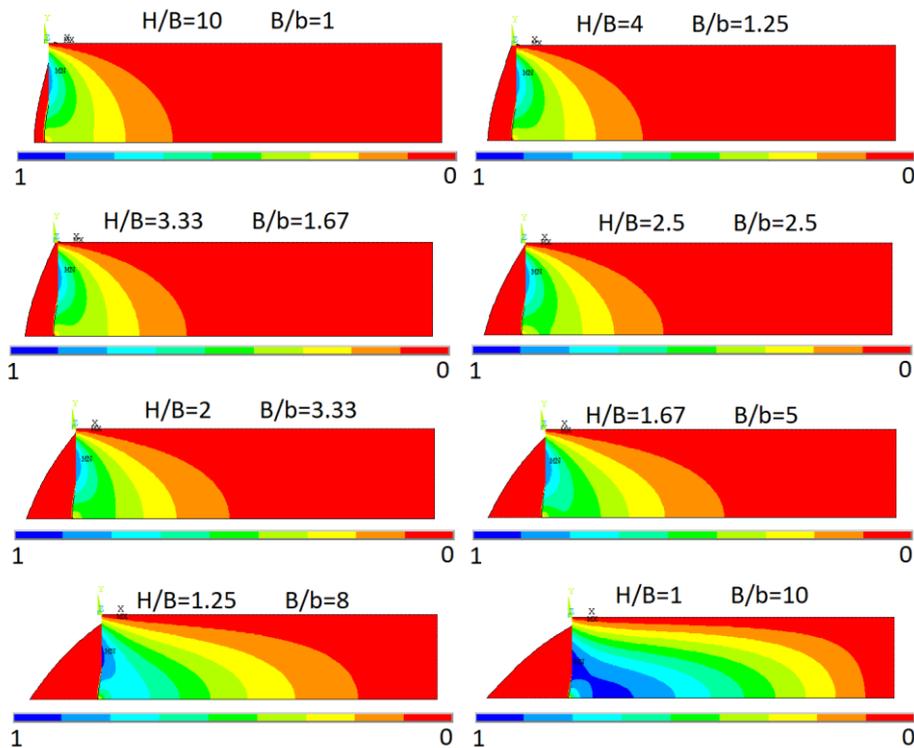


Figura 10.35: Pressões hidrodinâmicas numéricas da barragem flexível com inércia variável e acoplada com fluido.

A partir das Figura 10.34 e Figura 10.35, é evidenciado que a deformada modal fundamental para as diferentes configurações de barragens acoplada com fluido é semelhante da deformada modal da estrutura no vácuo (apresentada no capítulo 10.2). No ACPP, a idealização do comportamento de uma viga flexível incorporando a variação de inércia da estrutura por funções lineares foi pertinente.

Quanto as pressões hidrodinâmicas, é nítido que nas geometrias 1 a 7 o fluido possui um efeito de massa adicional e uma região de fluido próximo da estrutura é movimentada. Porém, à medida que a rigidez aumenta e, conseqüentemente, as frequências aumentam, estas pressões hidrodinâmicas tendem as pressões acústicas do primeiro modo acústico da cavidade acústica, que é o caso da geometria 8.

De uma forma geral, com as análises apresentadas é possível afirmar que os valores analíticos encontrados com a metodologia proposta do ACPP foram condizentes em um regime incompressível e pode ser utilizada. No próximo item essa metodologia é estendida a casos de barragens reais, como por exemplo, o estudo da Barragem de Pina Flat, da Barragem de Tsuruda e da Barragem de Koyna.

10.5. ESTUDOS DE CASOS EM BARRAGENS REAIS

Neste tópico, a metodologia do ACPP, proposta neste trabalho, é utilizada para analisar a frequência fundamental (1º modo) acoplada fluido-estrutura de três barragens e de uma eclusa. Em seguida, um estudo paramétrico sob vibrações forçada (carga harmônica) na barragem de Koyna foi realizado.

10.5.1. Aplicação do ACPP na Análise da Barragens Reais

O ACPP foi empregado para determinar a frequência fundamental (1º modo) acoplada fluido-estrutura da barragem Pina Flat, localizada na Califórnia nos Estados Unidos da América, da barragem de Tsuruda, localizada no Japão e, por fim, da Barragem de Koyna, localizada na Índia.

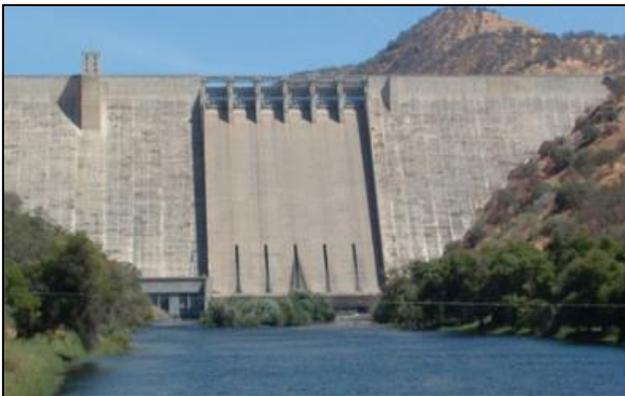
No modelo analítico, o ACPP considera uma estrutura flexível com deformada engastada-livre, de inércia constante ou variável, e acoplada com fluido. Das três barragens citadas, as barragens de Pina Flat e de Tsuruda possuem uma inércia variável mais próxima de uma

forma linear da base a crista, então a metodologia do ACPP pode ser aplicada na análise destas estruturas. Por outro lado, a barragem de Koyna possui uma inércia variável com uma descontinuidade, ou seja, não varia linearmente da base até a crista, o que já impõe uma certa diferença com o ACPP.

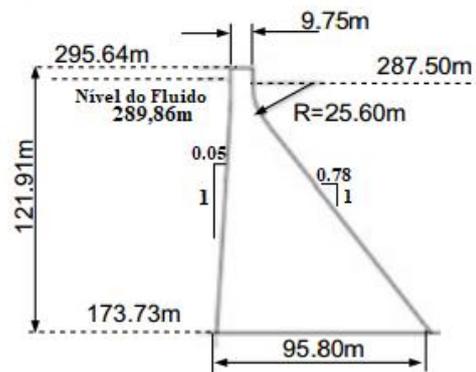
Vale ressaltar que as modelagens numéricas das barragens foram o mais aproximado possível da sua geometria real (conforme dimensões encontradas na literatura), uma vez que cada uma destas estruturas possui sua particularidade, como por exemplo, a pequena inclinação do seu talude de montante ou a pequena curvatura na geometria da seção transversal.

Descrição e Parâmetros das Barragens

Na Figura 10.36 é apresentado as geometrias e dimensões da barragem Pina Flat, da barragem de Tsuruda e da barragem de Koyna. As características de cada barragem foram obtidas no trabalho de Chopra (2020).



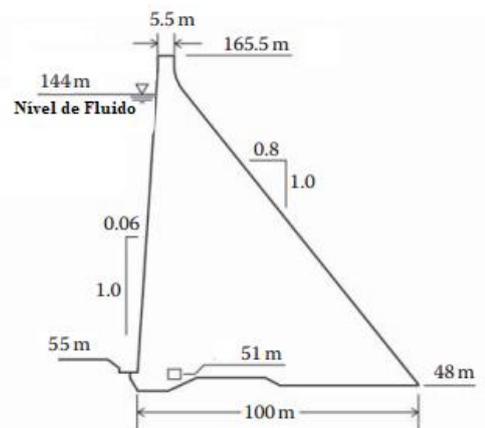
(a) Barragem Pina Flat



(b) Dimensões da Seção Transversal



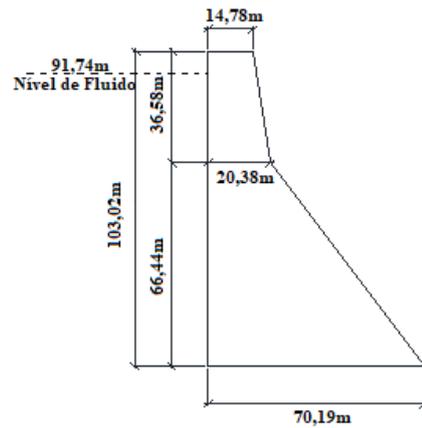
(c) Barragem Tsuruda



(d) Dimensões da Seção Transversal



(e) Barragem de Koyna



(f) Dimensões da Seção Transversal

Figura 10.36: Barragens reais estudadas e suas respectivas dimensões (Adaptado de Chopra, 2020).

Para a análise das barragens apresentadas na Figura 10.36, as propriedades físicas e mecânicas assumidas para cada estrutura são apresentadas na Tabela 10.12, bem como as dimensões e as propriedades do fluido do reservatório retangular acoplado às barragens. Para o modelo analítico equivalente pelo ACPP, o comprimento equivalente da cavidade no ACPP que representa a massa adicional de fluido movimentada, conforme visto no capítulo 6, é de $L_x=0,25243L_z$.

Tabela 10.12– Propriedades físicas, mecânicas do sistema barragem-reservatório (CHOPRA, 2020).

| Características | Barragem Pina Flat | Barragem de Tsuruda | Barragem de Koyna |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|
| Massa Específica do Concreto | 2483 kg/m ³ | 2400 kg/m ³ | 2643 kg/m ³ |
| Módulo de Elasticidade | 22408 MPa | 47000 MPa | 31027 MPa |
| Razão de Poisson | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Massa Específica do Fluido | 1000 kg/m ³ | 1000 kg/m ³ | 1000 kg/m ³ |
| Velocidade do som no meio fluido | 1439 m/s | 1440 m/s | 1440 m/s |
| Comprimento do Reservatório Assumido | 385 m | 385 m | 385 m |
| Nível de Fluido | 116,13 m | 89,00 m | 91,74 m |
| Comprimento Equivalente L _x do ACPP | 29,31 m | 22,47 m | 23,16 m |

Os parâmetros adotados na Tabela 10.12 foram utilizados na formulação numérica e na solução analítica através do ACPP. Com uso dos parâmetros mostrados, a rigidez e massa generalizada de cada barragem, bem como as funções de massa e inércia, em acordo com metodologia analítica do ACPP, são apresentadas na Tabela 10.13.

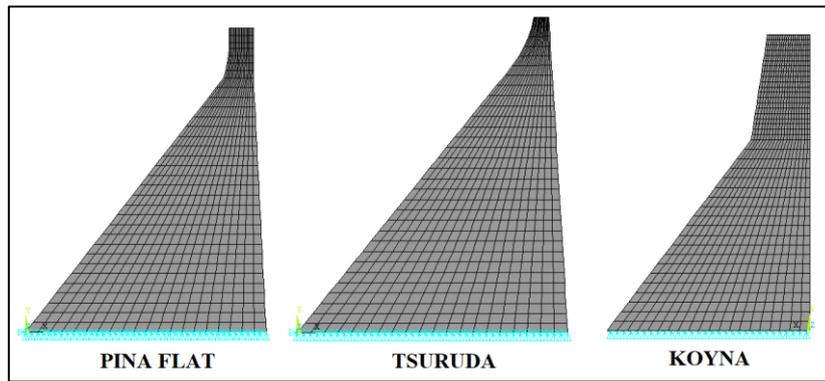
Tabela 10.13– Parâmetros geométricos e generalizados obtidos pelo ACPP.

| Barragem | b (m) | B (m) | H (m) | K* (N/m) | m* (Kg) | Função Massa m(z) (Kg/m) | Função Inércia I(z) (m⁴) |
|-----------------|------------------|------------------|--------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|--|
| Pina Flat | 9,75 | 95,80 | 121,91 | 2874601164 | 7990560,15 | -1752,62z+237871 | -600,368z+73268,16 |
| Tsuruda | 5,5 | 100 | 117,50 | 6152569113 | 6706567,65 | -1930,213z+240000 | -709,102z+83333,33 |
| Koyna | 14,78 | 70,19 | 103,02 | 3673153956 | 6943113,09 | -1421,55z + 185512 | -277,11z + 28816,72 |

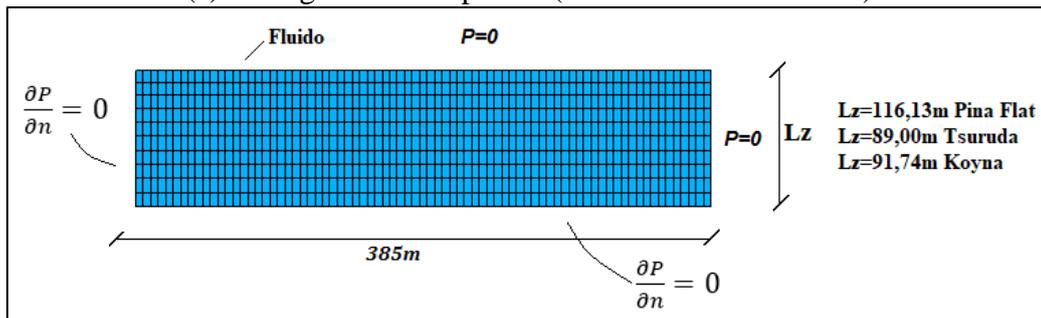
Modelos Numéricos

A barragem possui condição de contorno engastada na base (tanto na análise desacoplada e acoplada fluido-estrutura), o reservatório do fluido acústico quando desacoplado possui condição de contorno F-A-F-A e quando acoplado com fluido possui a condição fluido-estrutura aplicada na interface estrutura-cavidade.

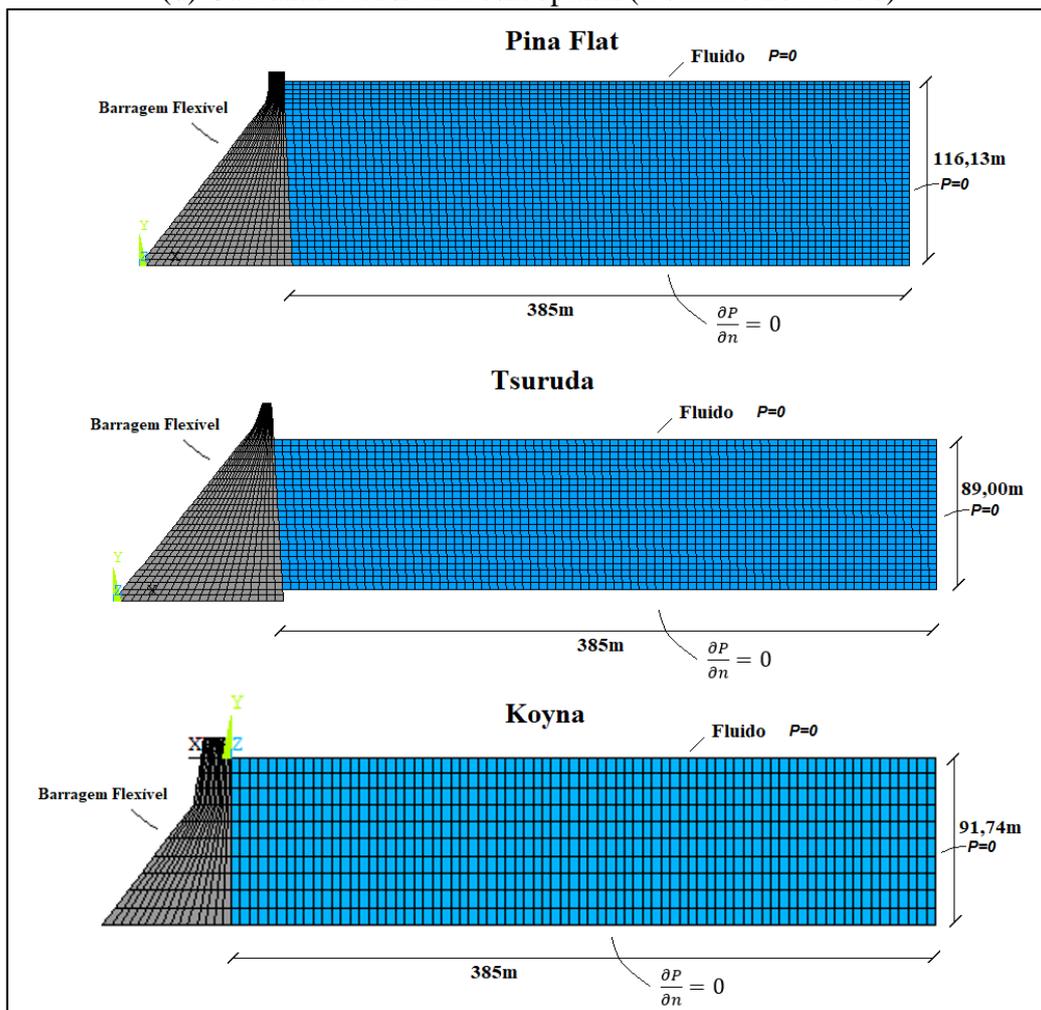
Nos modelos numéricos foram utilizados os elementos FLUID29 e PLANE183 para discretizar a cavidade acústica e a estrutura, respectivamente. Nesta modelagem, a estrutura e cavidade acústica são considerados modelos contínuos discretizados no estado plano. Os modelos numéricos da estrutura, do fluido e da interação fluido-estrutura das três barragens estudadas são apresentados na Figura 10.37.



(a) Barragens Desacopladas (Domínio das Estrutural)



(b) Cavidade Acústica Desacoplada (Domínio do Fluido)



(c) Interação Barragem-Reservatório

Figura 10.37: Modelos numéricos das barragens reais analisadas neste trabalho.

A partir do trabalho de Chopra (2020), do método pseudo-dinâmico, dos modelos numéricos e tendo por base o ACP, a frequência fundamental das estruturas, desacopladas e acopladas com fluido, foram investigadas e são apresentadas.

Resultados para Estruturas Desacopladas

Na Tabela 10.14 são apresentados os resultados obtidos referentes às frequências naturais fundamentais das três barragens sem a presença do fluido. Os resultados são expressos em termos do comparativo dos valores das frequências encontrados pelo ACP, MEF e pelo método pseudo-dinâmico.

Tabela 10.14– Frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas das barragens desacopladas (vácuo).

| Barragem | Frequência MEF (Hz) | Frequência (Chopra, 2020) (Hz) | Frequência ACP (Hz) | Frequência (Pseudo-Dinâmico) (Hz) | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] | Dif. (%) [3] |
|-----------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Pina Flat | 3,17 | 3,14 | 3,02 | 3,22 | 4,73 | 3,82 | 1,58 |
| Tsuruda | 5,10 | 4,95 | 4,83 | 4,84 | 5,30 | 2,42 | 5,10 |
| Koyna | 3,08 | 3,07 | 3,66 | 4,48 | 18,83 | 19,22 | 45,45 |

Legenda: [1]: Diferença percentual entre MEF e ACP; [2] é a diferença percentual entre Chopra (2020) e ACP; [3] é a diferença entre MEF e Pseudo-Dinâmico.

A partir da Tabela 10.14, é possível afirmar que os valores obtidos pelo ACP são eficazes e reproduzem adequadamente a primeira frequência natural de barragens vazias sem fluido, quando estas possuem geometria próximas de inércia variável de forma linear da base até a crista, que é o caso da barragem Pina Flat e Tsuruda. Assim, para estas duas estruturas, nota-se que os resultados das frequências entre os métodos foram condizentes e refletem uma boa aproximação.

Entretanto, os valores encontrados para a barragem de Koyna foram divergentes tanto no ACP quanto no método pseudo-dinâmico, o que já se era esperado, uma vez que a geometria da estrutura possui uma descontinuidade na inércia da seção da barragem, fugindo da metodologia proposta do ACP e do método pseudo-dinâmico. Contudo, as modelagens numéricas foram validadas, uma vez que a diferença percentual entre o MEF e os valores obtidos por Chopra (2020) foram pequenas para as três barragens.

Na Figura 10.38 o 1º modo de vibração numérico de cada barragem desacopladas é apresentado.

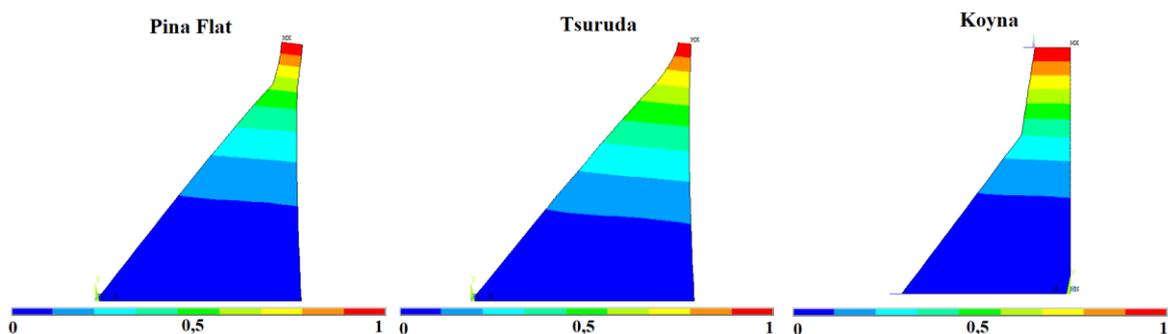


Figura 10.38: Modos de vibração fundamental (1º modo) obtido nas análises numéricas das barragens reais desacopladas.

Resultados das Cavidades Acústicas Desacopladas

Os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais relacionadas aos quatro primeiros modos de vibração do domínio do fluido foram estudados através da solução analítica pelo método da energia e através do método dos elementos finitos. Assim, os valores obtidos das frequências acústicas são apresentados na Tabela 10.15.

Tabela 10.15 - Frequências naturais (F) em Hz da cavidade acústica desacoplada.

| Cavidade da Barragem de Pina Flat | | | | Cavidade da Barragem de Tsuruda | | | | Cavidade da Barragem de Koyna | | | |
|-----------------------------------|------------------|------------|----------|---------------------------------|------------------|------------|----------|-------------------------------|------------------|------------|----------|
| Mode (i, j) | F (Hz) Analítica | F (Hz) MEF | Dif. (%) | Mode (i, j) | F (Hz) Analítica | F (Hz) MEF | Dif. (%) | Mode (i, j) | F (Hz) Analítica | F (Hz) MEF | Dif. (%) |
| 1º (1,1) | 3,24 | 3,66 | 11,47 | 1º (1,1) | 4,15 | 4,17 | 0,48 | 1º (1,1) | 4,03 | 4,04 | 0,25 |
| 2º (1,2) | 4,18 | 4,51 | 7,32 | 2º (1,2) | 4,92 | 4,93 | 0,20 | 2º (3,1) | 4,82 | 4,83 | 0,21 |
| 3º (1,3) | 5,60 | 5,85 | 4,27 | 3º (1,3) | 6,17 | 6,18 | 0,16 | 3º (5,1) | 6,10 | 6,11 | 0,16 |
| 4º (1,4) | 7,24 | 7,42 | 2,43 | 4º (1,4) | 7,69 | 7,68 | 0,13 | 4º (7,1) | 7,63 | 7,65 | 0,26 |

A partir da Tabela 10.15 foi encontrado que para a barragem de Tsuruda e de Koyna ocorreram pequenas diferenças percentuais entre os valores das frequências naturais acústicas do modelo numérico em relação as soluções analíticas.

Por outro lado, nos resultados das frequências associadas ao primeiro e segundo modo acústico da cavidade da barragem de Pina Flat, as diferenças percentuais entre estes valores numéricos e analíticos foram maiores. Isso ocorre pelo fato de que o domínio do fluido, discretizado para esta barragem, possui uma inclinação maior no talude de montante quando comparada as outras barragens. Assim, a cavidade acústica tem uma maior inclinação na fronteira rígida do fluido desacoplado. A solução analítica implementada não contabiliza este efeito, pois assume uma fronteira rígida vertical naquela região. Então, isso explica a maior diferença percentual encontrada para a barragem de Pina Flat.

As deformadas modais de pressão hidrodinâmica associadas aos quatro modos de vibração acústicos são apresentadas na Figura 10.39.

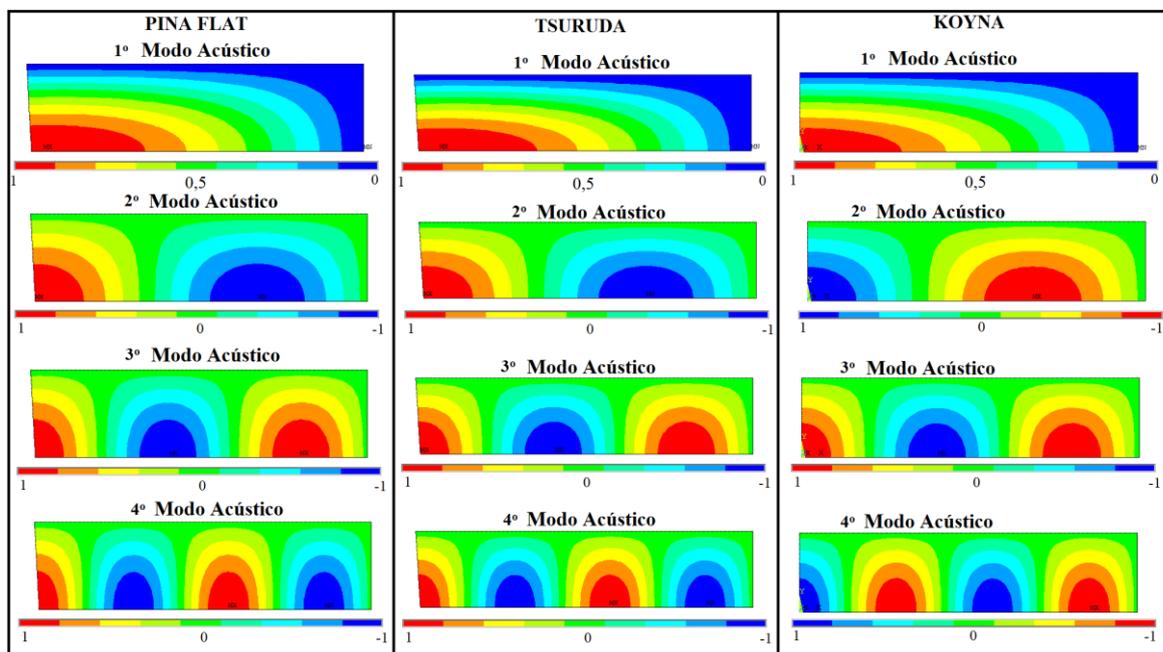


Figura 10.39: Quatro primeiros modos de vibração numéricos de pressão hidrodinâmica da cavidade acústica desacoplada de condição de contorno F-A-F-A.

Os modos acústicos foram condizentes com os modos longitudinais das outras cavidades já avaliadas neste trabalho, em que devido ao fato de a cavidade ser mais extensa na direção longitudinal (L_x) a frequência que predomina é a frequência associada ao modo transversal. Uma vez obtido os efeitos desacoplados, pode-se avaliar a interação fluido-estrutura para as barragens reais.

Resultados da Interação Barragem-Reservatório

Na Tabela 10.16 são apresentados os resultados obtidos referentes às frequências naturais acopladas fluido-estrutura que são associadas ao modo fundamental de vibração da estrutura (1º modo), obtidas pelo ACPP, pelo MEF e por meio do método pseudo-dinâmico. Os valores apresentados por Chopra (2020) são incluídos no estudo comparativo.

Tabela 10.16– Frequências naturais fundamentais (1º modo) analíticas e numéricas das barragens acopladas com fluido.

| Barragem | Frequência MEF (Hz) | Frequência (Chopra, 2020) (Hz) | Frequência ACPP (Hz) | Frequência (Pseudo-Dinâmico) (Hz) | Dif. (%) | Dif. (%) | Dif. (%) | λ pelo MEF | Regime |
|-----------|---------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|--------------------|---------|
| Pina Flat | 2,56 | 2,52 | 2,53 | 2,55 | 1,17 | 0,40 | 1,19 | 1,30 | Incomp. |
| Tsuruda | 4,05 | 4,20 | 4,23 | 4,03 | 4,44 | 0,71 | 4,05 | 0,99 | Incomp. |
| Koyna | 2,78 | 2,79 | 3,20 | 3,62 | 15,10 | 15,05 | 30,1 | 1,02 | Incomp. |

Legenda: [1]: Diferença percentual entre MEF e ACPP; [2] é a diferença percentual entre Chopra (2020) e ACPP; [3] é a diferença entre Chopra (2020) e Pseudo-dinâmico.

A partir da Tabela 10.16, observa-se que para a barragem de Pina Flat e Tsuruda os valores das frequências naturais fundamentais obtidas pelo ACPP foram próximas quando comparadas com os valores estudados por Chopra (2020), com os resultados obtidos pelo MEF e pelo método pseudo-dinâmico, validando a metodologia do ACPP.

Na análise da barragem de Koyna, os resultados das frequências obtidas pelo ACPP e pelo método pseudo-dinâmico foram divergentes dos resultados obtidos pelos outros métodos (MEF e Chopra (2020)), o que já era esperado. Assim, semelhante a situação desacoplada, a barragem de Koyna possui uma descontinuidade na inércia, ou seja, não varia linearmente da base à crista. O ACPP e o método pseudo-dinâmico não contemplam essa descontinuidade inercial. Entretanto, mesmo assim o ACPP teve seus valores de frequências que mais se aproximaram, demonstrando uma vantagem em relação ao pseudo-dinâmico.

Outro aspecto a ser ressaltado é que a pequena inclinação nos taludes de montante das barragens reais não influenciou de forma significativa nos resultados das frequências acopladas fluido-estrutura, uma vez que se sabe que quanto maior a inclinação da fronteira maior é a influência no comportamento das frequências acopladas.

Com a análise do parâmetro de compressibilidade ($\lambda = \omega L_z / c$) do fluido pode-se notar que o resultado da frequência acoplada foi no regime incompressível ($\lambda < \pi/2$). Assim, os modos fundamentais das estruturas reais são caracterizados por modos dominante estrutura de massa adicional, em que a frequência acoplada é menor que a frequência acústica da cavidade. Para entendimento dos modos fundamentais, as deformadas da estrutura e os modos de pressões hidrodinâmicas de massa adicional, obtidos no modelo numérico, foram investigados e são apresentados na Figura 10.40.

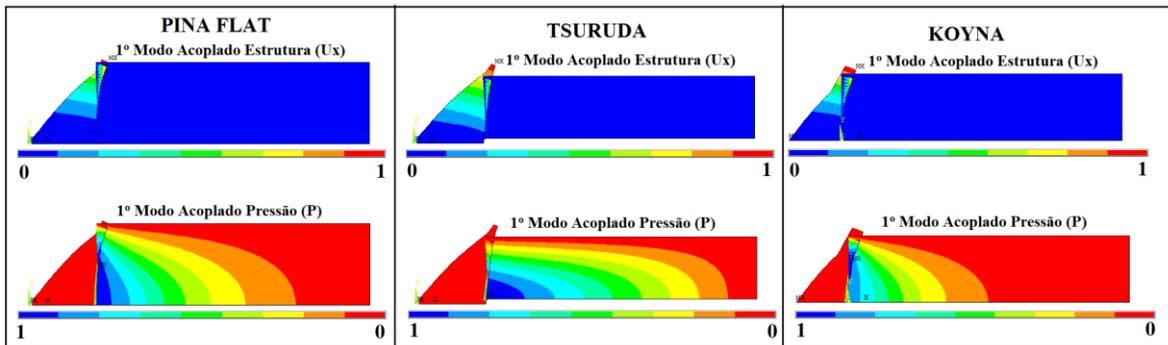


Figura 10.40: Deformada modal da estrutura e das pressões hidrodinâmicas acoplada obtidas da análise numérica das barragens reais.

Na Figura 10.40 é visualizado que o modo fundamental acoplado é um modo dominante estrutura de massa adicional. Tanto da barragem Pina Flat quanto da barragem de Koyna, o campo de pressão está próximo da estrutura, demonstrando o efeito da massa adicional próximo da estrutura.

Verifica-se ainda que, na barragem de Tsuruda o campo de pressão do primeiro modo acoplado é também um modo de massa adicional, mas está com distribuição de pressões próximas do campo de pressão do primeiro modo acústico. Tal fato é justificado pelo motivo da frequência acoplada do primeiro modo de Tsuruda (4,05Hz) estar muito próxima da frequência ressonante do meio acústico do fluido (4,17Hz), uma vez que a rigidez da estrutura é bem maior, resultando em um comportamento próxima de parede rígida para aquelas dimensões de seu reservatório acoplado.

Portanto, pode-se observar que a resposta dinâmica acoplada fluido-estrutura de uma barragem depende de inúmeras variáveis e, principalmente, da resposta desacopladas do domínio da estrutura e do fluido.

Uma vez que as barragens tiveram a modelagem numérica validada com os resultados de Chopra (2020), foi possível realizar um estudo paramétrico com o intuito de entender o efeito de diferentes comprimentos de reservatório acoplados na análise fluido-estrutura. Para isto, a barragem de Koyna foi escolhida, sendo os resultados do estudo apresentados no próximo tópico.

10.5.2. Estudo Paramétrico com Análise da Barragem de Koyna

Descrição dos Modelos e Parâmetros Estudados

As propriedades e dimensões da barragem de Koyna foram mantidas as apresentadas no tópico anterior (10.5.1), bem como os parâmetros de massa específica e velocidade do som no meio fluido para o reservatório. Entretanto, uma análise paramétrica no domínio do fluido foi realizada. O reservatório retangular acoplado à barragem foi, neste caso, com três comprimentos longitudinais distintos, sendo de 91,74 m, 385 m (já apresentado) e 642,18m. Os comprimentos distintos refletem em três diferentes relações comprimento/altura (Lx/Lz) do reservatório.

Nesta análise, os quatro primeiros modos da estrutura, da cavidade acústica e do problema barragem-reservatório são discutidos. A Figura 10.41 apresenta os casos analisados nesta etapa.

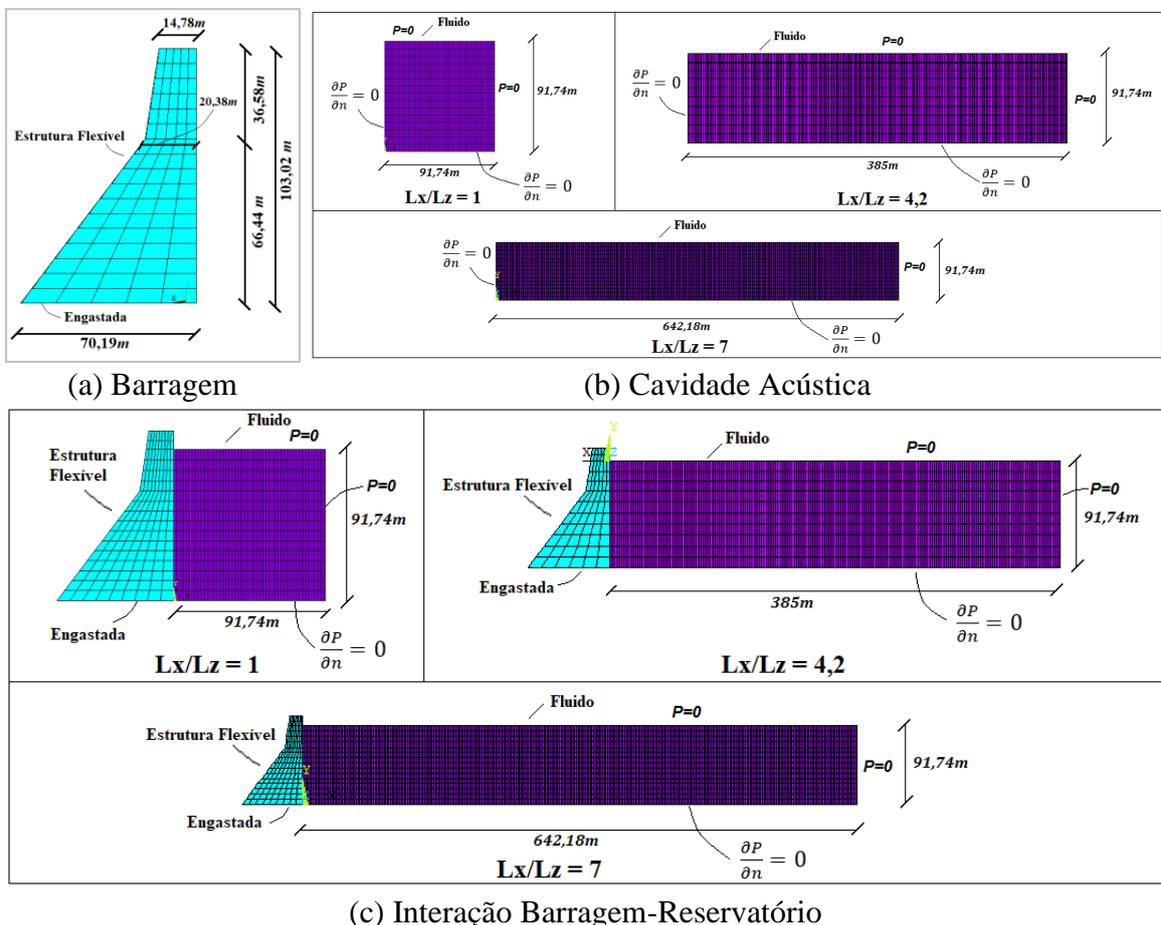


Figura 10.41: Modelos numéricos da barragem de Koyna para diferentes relações (Lx/Lz).

Resultados da Estrutura Desacoplada

Os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais relacionadas aos quatro primeiros modos de vibração da estrutura da barragem estudados por Chopra (2012),

considerando-a como meio único atuante no sistema. As frequências naturais encontram-se dispostas na Tabela 10.17 abaixo.

Tabela 10.17– Frequências naturais da barragem de Koyna desacoplada (vácuo).

| Chopra (2012) | | | MEF | | | Dif. (%) |
|---------------|--------|------------|------|--------|------------|----------|
| Modo | Tipo | Frequência | Modo | Tipo | Frequência | |
| 1º | Flexão | 3,07 | 1º | Flexão | 3,07 | 0,01 |
| 2º | Flexão | 8,20 | 2º | Flexão | 8,16 | 0,49 |
| 3º | Axial | 10,75 | 3º | Axial | 10,81 | 0,53 |
| 4º | Flexão | 15,87 | 4º | Flexão | 15,93 | 0,38 |

Diante dos resultados encontrados, tendo em vista os baixos erros percentuais, em relação aos dados disponíveis na literatura, pode-se afirmar que a modelagem foi validada. Os modos de vibração de flexão são preponderantes na análise. Com relação às deformadas modais de cada modo de vibração, também foram comparadas com Chopra (2012), sendo estas apresentadas na Figura 10.42.

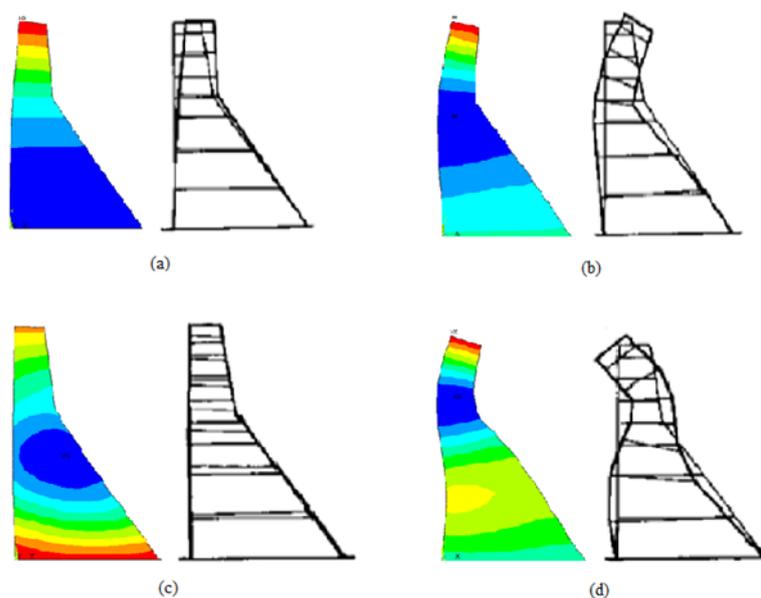


Figura 10.42: Comparação das deformadas modais numéricas com os modos apresentados por Chopra (2012): (a) primeiro modo, (b) segundo modo, (c) terceiro modo e (d) quarto modo.

Para melhor entendimento dos modos de vibração apresentados, na Figura 10.43 são apresentados cortes na seção transversal da barragem, a fim de identificar a predominância nos tipos dos modos. Os resultados são mostrados no gráfico abaixo.

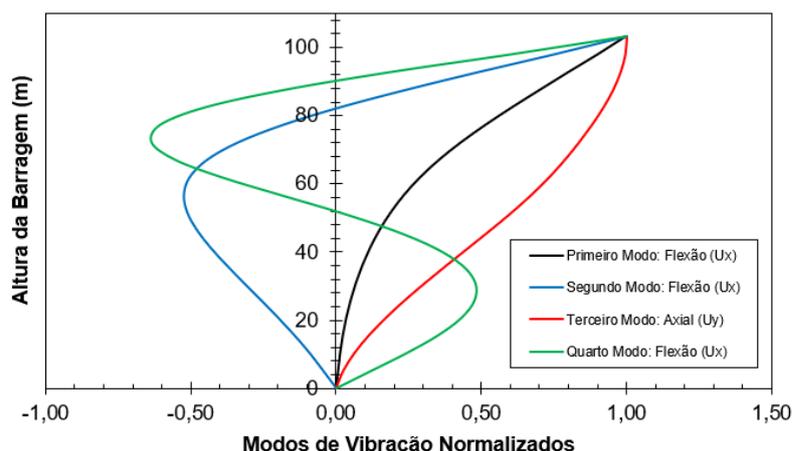


Figura 10.43 : Deformadas modais da barragem na sequência dos quatro modos de vibração para barragem desacoplada.

É evidenciado pelo gráfico que os quatro primeiros modos de vibração da barragem desacoplada são predominantemente de flexão, com exceção do terceiro modo de vibração que é um modo axial, ou seja, o deslocamento normalizado apresentado no gráfico é na direção vertical da barragem (U_y).

Resultados da Cavidade Acústica (Fluido Desacoplado)

Os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais relacionadas aos quatro primeiros modos de vibração do domínio do fluido foram estudados através das soluções analíticas e pelo método dos elementos finitos. As frequências naturais encontram-se dispostas na Tabela 10.18.

Tabela 10.18– Frequências naturais da cavidade acústica desacoplada para diferentes relações (L_x/L_z).

| L_x/L_z | Analítica | | MEF | | |
|-----------|-------------|-----------------|---------|-----------------|----------|
| | Modo (i, j) | Frequência (Hz) | Modo | Frequência (Hz) | Dif. (%) |
| 1 | 1°(1,1) | 5,57 | 1°(1,1) | 5,55 | 0,36 |
| | 2°(2,1) | 12,40 | 2°(2,1) | 12,41 | 0,08 |
| | 3°(1,2) | 12,41 | 3°(1,2) | 12,42 | 0,08 |
| | 4°(2,2) | 16,65 | 4°(2,2) | 16,66 | 0,06 |
| 4.2 | 1°(1,1) | 4,03 | 1°(1,1) | 4,04 | 0,25 |
| | 2°(2,1) | 4,82 | 2°(2,1) | 4,83 | 0,21 |
| | 3°(3,1) | 6,10 | 3°(3,1) | 6,11 | 0,16 |
| | 4°(4,1) | 7,63 | 4°(4,1) | 7,65 | 0,26 |
| 7 | 1°(1,1) | 3,96 | 1°(1,1) | 3,97 | 0,25 |
| | 2°(2,1) | 4,27 | 2°(2,1) | 4,27 | 0,00 |
| | 3°(3,1) | 4,82 | 3°(3,1) | 4,82 | 0,00 |
| | 4°(4,1) | 5,55 | 4°(4,1) | 5,55 | 0,00 |

A partir da Tabela 10.18, no domínio do fluido os baixos erros percentuais do modelo numérico em relação as soluções analíticas deixam claro que as modelagens foram validadas para a cavidade acústica.

As deformadas modais de pressão para cada modo de vibração foram comparadas e são apresentadas na Figura 10.43 para relação $L_x/L_z=4,2$ e na Figura 10.44 para as relações $L_x/L_z=1$ e $L_x/L_z=7,0$. Os resultados são de um corte na fronteira rígida na direção vertical e na base do reservatório na direção longitudinal. A posição dos cortes é apresentada na Figura 10.45 abaixo.

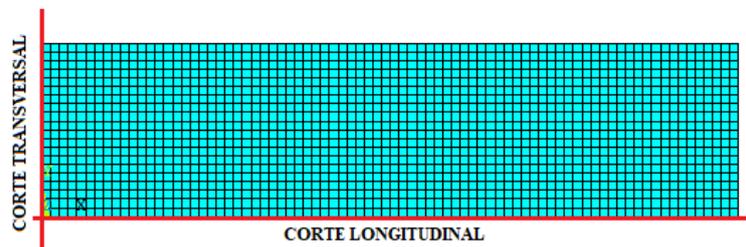
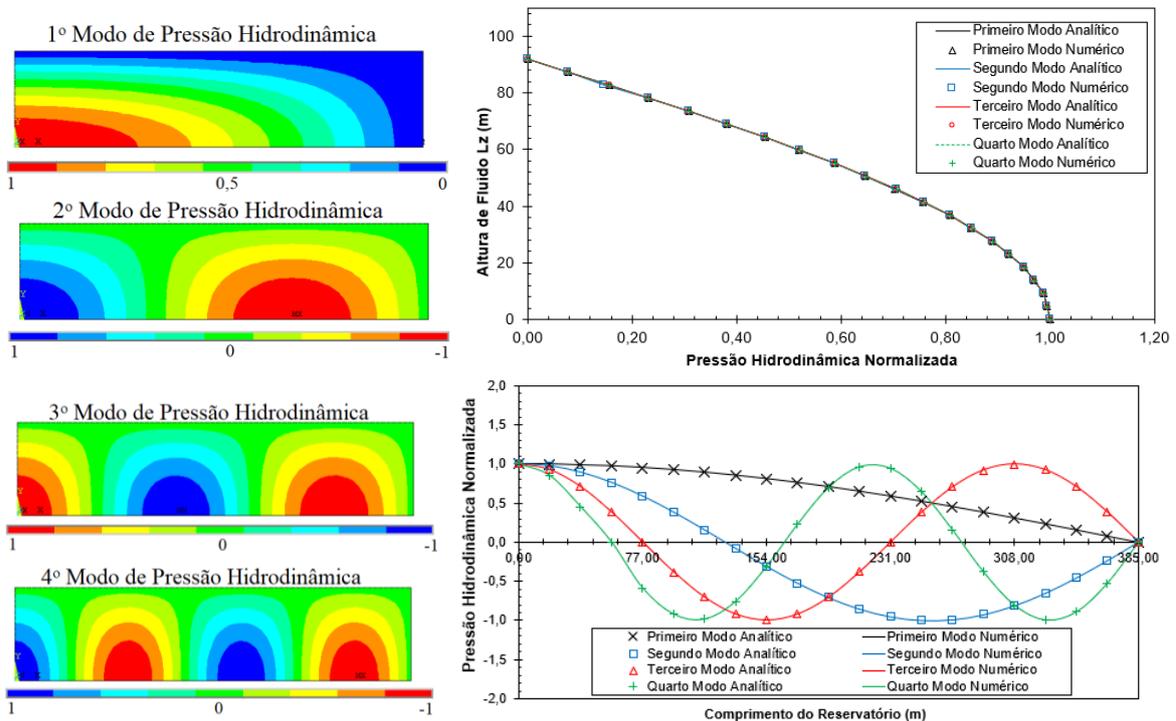


Figura 10.44: Posição do corte transversal e longitudinal na cavidade acústica.



(a) Modos de Pressão (b) Corte na Interface e ao Longo da Cavidade Acústica

Figura 10.45: Modos de pressão do fluido desacoplado para uma relação $L_x/L_z=4,2$.

Assim, nos gráficos da Figura 10.45 é possível notar que as pressões hidrodinâmicas obtidas através da técnica analítica coincidem com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos. Na interface da fronteira rígida vertical, as pressões hidrodinâmicas se distribuem ao

longo da altura de forma igualitária para os quatro modos de pressão, ou seja, a pressão na interface da cavidade independe do modo, sendo tal fato explicado pela condição de fronteira rígida assumida neste local. Por outro lado, ondas de pressão são visualizadas no sentido longitudinal do reservatório, ou seja, ondas de pressão se propagam na cavidade acústica com modos acústicos condizentes com as condições de contorno fronteira rígida e pressão nula em direções opostas.

Na Figura 10.46 os modos de pressão hidrodinâmica para as relações $L_x/L_z = 1$ e $L_x/L_z = 7$ são apresentados. Pode-se observar que para a cavidade com relação $L_x/L_z = 1$ surgem modos transversais e, em acordo com Tabela 10.18, a faixa de frequência aumenta.

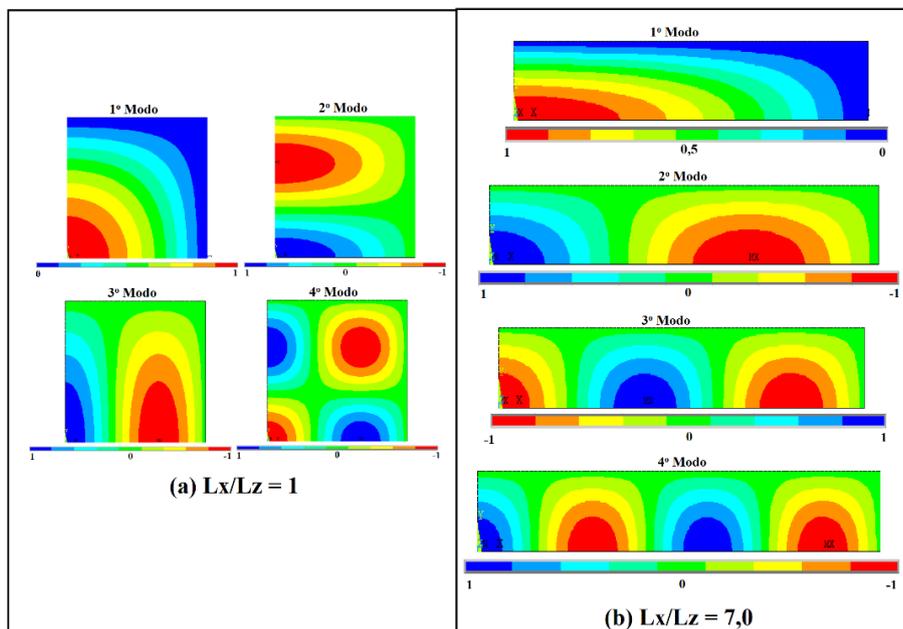


Figura 10.46: Modos de pressão do fluido desacoplado para uma relação $L_x/L_z=4,2$ e $L_x/L_z=7,0$.

Com base na Figura 10.46, verifica-se também que na direção longitudinal (L_x) são formadas ondas de pressão hidrodinâmica longitudinais no reservatório longo ($L_x/L_z=7,0$) e ondas longitudinais e transversais no reservatório curto ($L_x/L_z=1,0$). Então, pode-se concluir que as quatro primeiras frequências acústicas estudadas para cada caso são originadas de um efeito combinado entre modos longitudinais e transversais, semelhante ao apresentado no capítulo 10.3.

Resultados da Interação Barragem-Reservatório

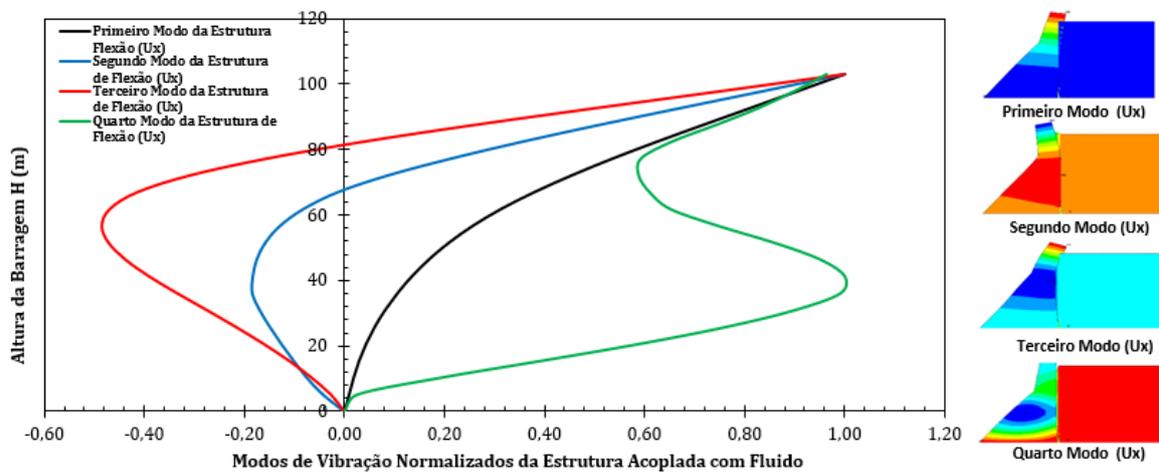
Na análise acoplada fluido-estrutura foram obtidos os resultados referentes às frequências naturais e deformadas modais relacionadas aos quatro primeiros modos de vibração da

estrutura da barragem de Koyna com as diferentes relações Lx/Lz . Para validar os modelos, os resultados estudados por Chopra (2020) para uma relação $L/H=4,2$ foram comparados. As frequências naturais encontram-se dispostas na Tabela 10.19.

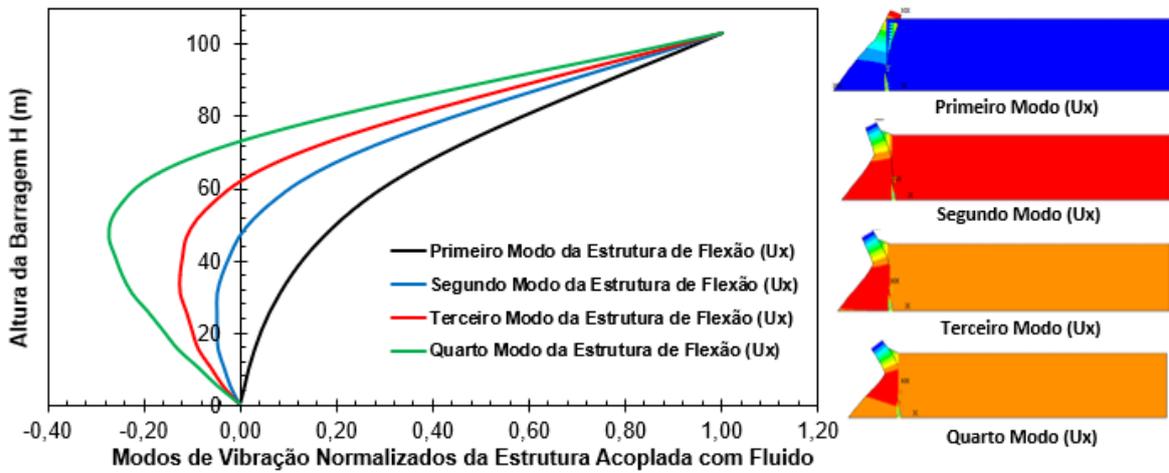
Tabela 10.19 - Frequências naturais (F) acopladas barragem-reservatório (Hz).

| $Lx/Lz=1,0$ | | | $Lx/Lz=4,2$ | | | | | $Lx/Lz=7,0$ | | |
|-------------|---------------------|--------------|-------------|--------------------------|---------------------|----------|--------------|-------------|---------------------|--------------|
| Modo | Freq. Numérica (Hz) | Tipo do Modo | Modo | Freq. (Hz) Chopra (2020) | Freq. (Hz) Numérica | Dif. (%) | Tipo do Modo | Modo | Freq. Numérica (Hz) | Tipo do Modo |
| 1º | 2,80 | DE/MA | 1º | 2,79 | 2,78 | 0,36 | DE/MA | 1º | 2,78 | DE/MA |
| 2º | 5,27 | DC | 2º | 4,05 | 4,05 | 0,00 | DC | 2º | 3,98 | DC |
| 3º | 8,01 | DC | 3º | 4,79 | 4,79 | 0,00 | DC | 3º | 4,27 | DC |
| 4º | 10,71 | DC | 4º | 5,98 | 5,99 | 0,17 | DC | 4º | 4,80 | DC |

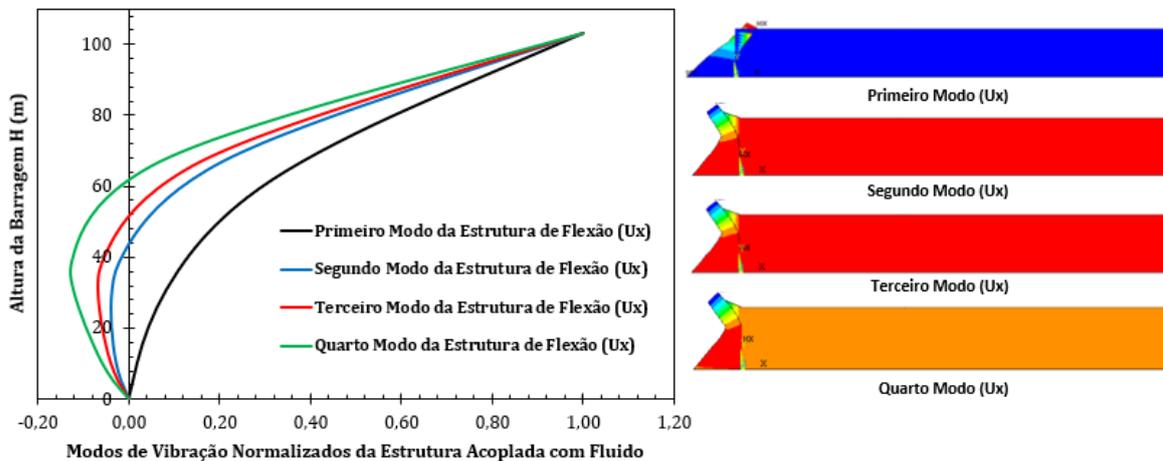
Com base na Tabela 10.19 pode-se afirmar que a modelagem foi validada. Ao analisar a tabela é nítido que o modo dominante estrutura de massa adicional (DE/MA) é o modo fundamental da estrutura, ou seja, para diferentes relações Lx/Lz a primeira frequência se mantém de mesmo valor e comportamento durante a vibração, em que a estrutura predomina e o fluido acompanha a deformada estrutural da barragem. O efeito da massa adicional de fluido ocorre próxima da interface da barragem. As análises dos modos da estrutura da barragem, na IBR para diferentes relações Lx/Lz estudadas, é apresentado na Figura 10.47.



(a) Modo de Vibração da Estrutura para $Lx/Lz = 1,0$.



(b) Modo de Vibração da Estrutura para $L_x/L_z = 4,2$.



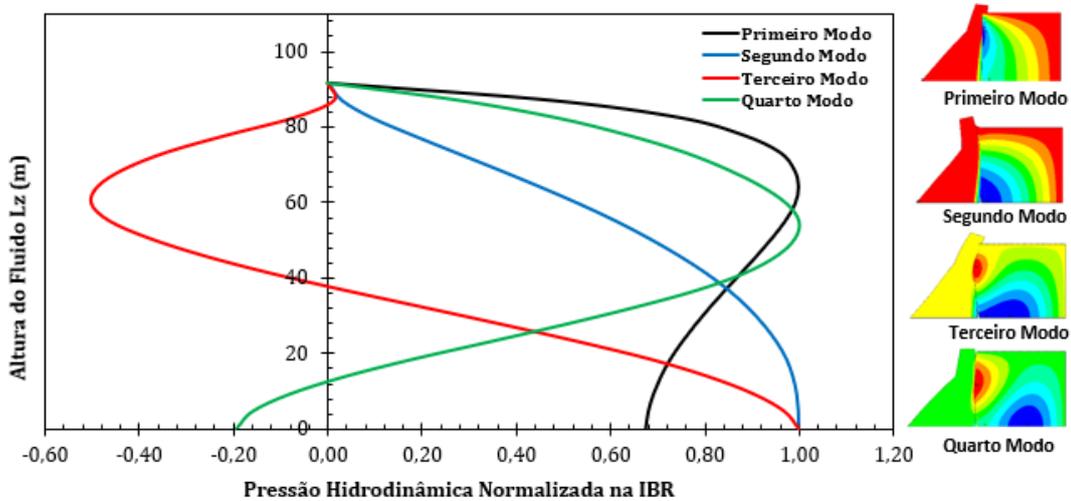
(c) Modo de Vibração da Estrutura para $L_x/L_z = 7,0$.

Figura 10.47: Deformadas modais da estrutura para os quatro primeiros modos de vibração e relações: (a) $L_x/L_z=1$, (b) $L_x/L_z=4,2$ e (c) $L_x/L_z=7$.

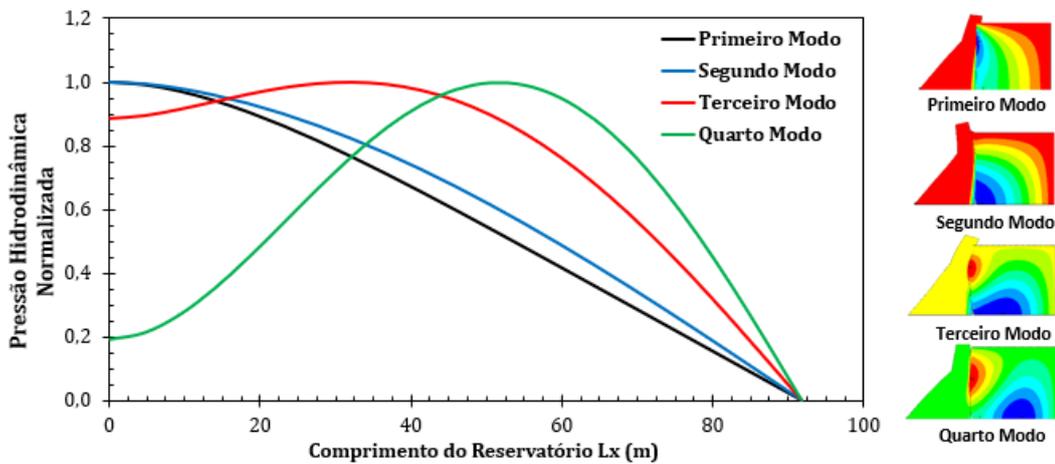
Nos gráficos da Figura 10.47 é possível observar que o primeiro modo fundamental de vibração da barragem acoplada com fluido é de massa adicional e não é alterado com o comprimento longitudinal da cavidade acústica para as três relações L_x/L_z . Além disso, para as relações $L_x/L_z=4,2$ e $L_x/L_z=7,0$ (reservatórios longos), o primeiro modo da estrutura acopla com o fluido em um modo dominante estrutura. No segundo, terceiro e quarto modo acoplado a estrutura vibra com o seu segundo modo de vibração desacoplada e acompanha os modos acústicos. Isso é um indicativo que a faixa da segunda frequência desacoplada da estrutura no vácuo acopla com frequências acústicas da cavidade em frequências maiores do que a fundamental da massa adicional.

Na cavidade mais curta acoplada com a barragem (relação $L_x/L_z=1,0$), o primeiro modo de massa adicional se mantém semelhante as outras dimensões de reservatório, bem como o segundo e terceiro modos acoplados, que também expressam, respectivamente, ambos o

segundo modo da estrutura desacoplada. Entretanto, o quarto modo de vibração da estrutura acoplada reproduz um terceiro modo de vibração da estrutura no vácuo, indicando que a cavidade está predominando na vibração e elevando a faixa de frequência na IBR. Assim, para complementar estas análises da IBR, a visualização em cortes nos campos de pressão acoplados, tanto na interface fluido-estrutura, quanto na base ao longo do reservatório foi realizada, apresentadas nas Figuras a seguir, para as relações $L_x/L_z = 1,0$; $L_x/L_z = 4,2$ e $L_x/L_z = 7,0$; respectivamente.

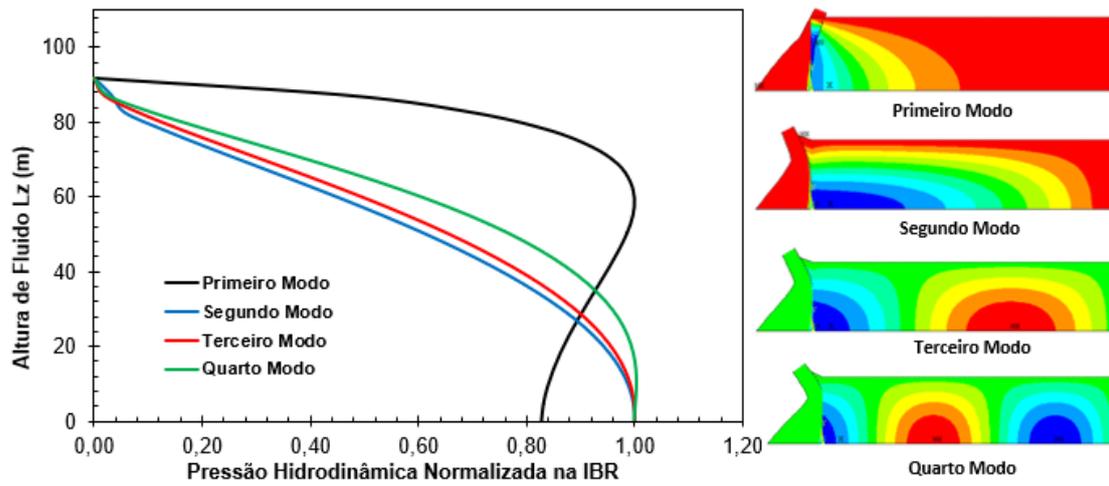


(a) Modo de vibração do fluido (na interface) para $L_x/L_z = 1,0$.

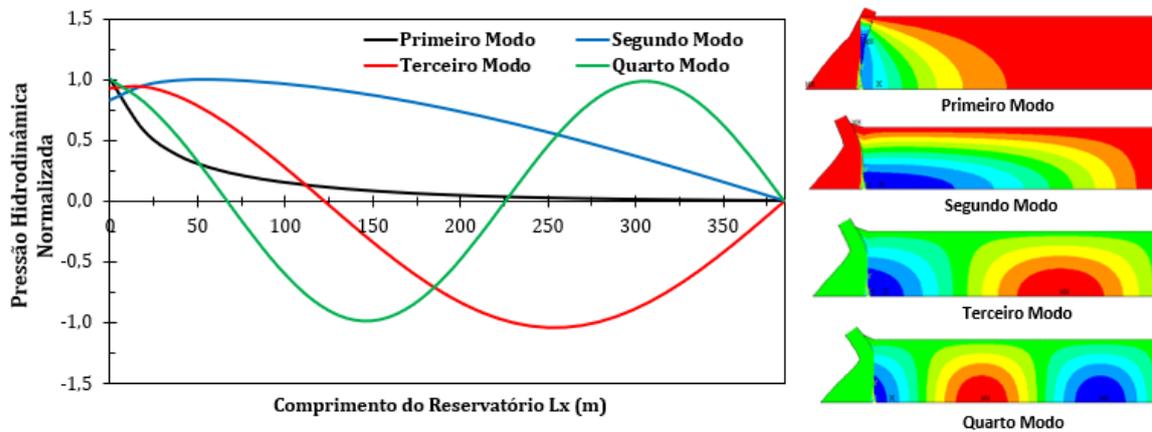


(b) Modo de vibração longitudinal do fluido (na base) para $L_x/L_z = 1,0$.

Figura 10.48: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação $L_x/L_z=1,0$.

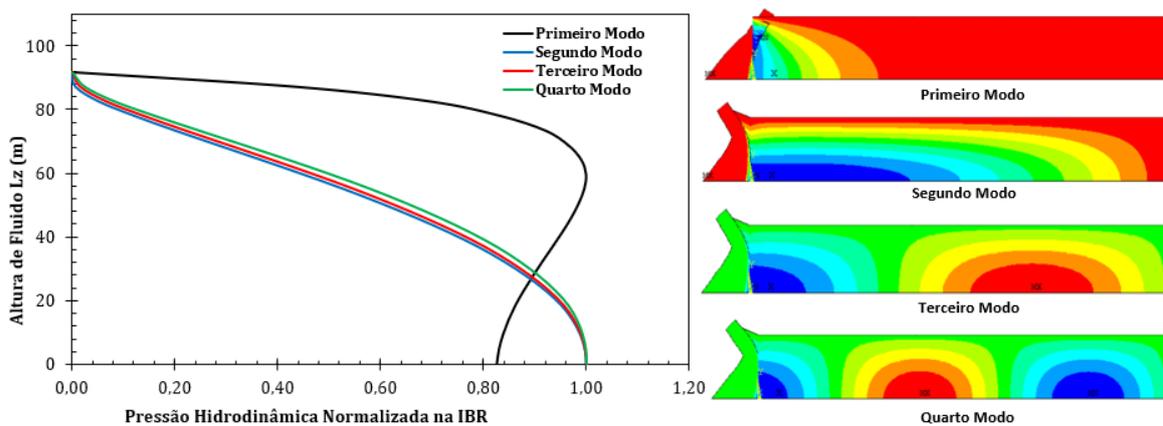


(a) Modo de vibração do fluido (Na Interface) para $L_x/L_z = 4,2$.

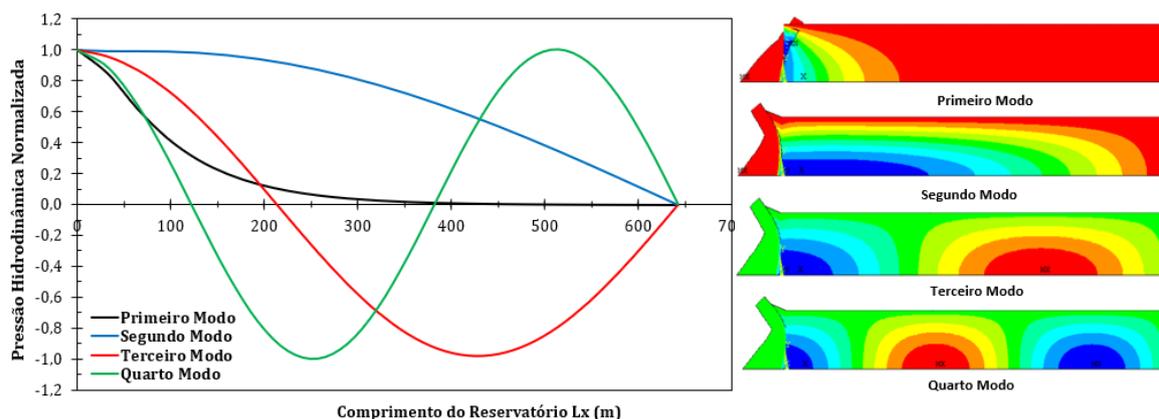


(b) Modo de vibração longitudinal do fluido (Na base) para $L_x/L_z = 4,2$.

Figura 10.49: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação $L_x/L_z=4,2$.



(a) Modo de vibração do fluido (na interface) para $L_x/L_z = 7,0$.



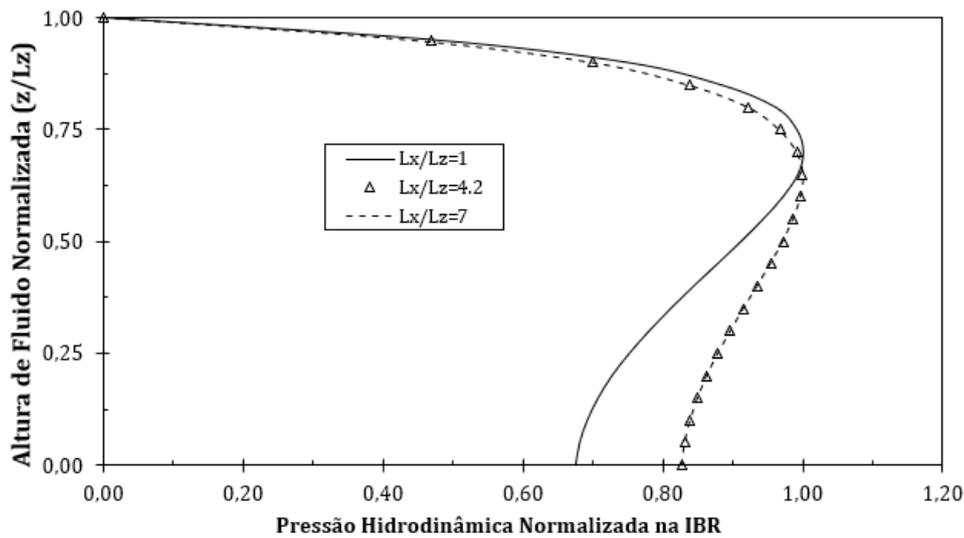
(b) Modo de vibração longitudinal do fluido (Na base) para $Lx/Lz = 7,0$.

Figura 10.50: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para os quatro primeiros modos e relação $Lx/Lz=4,2$.

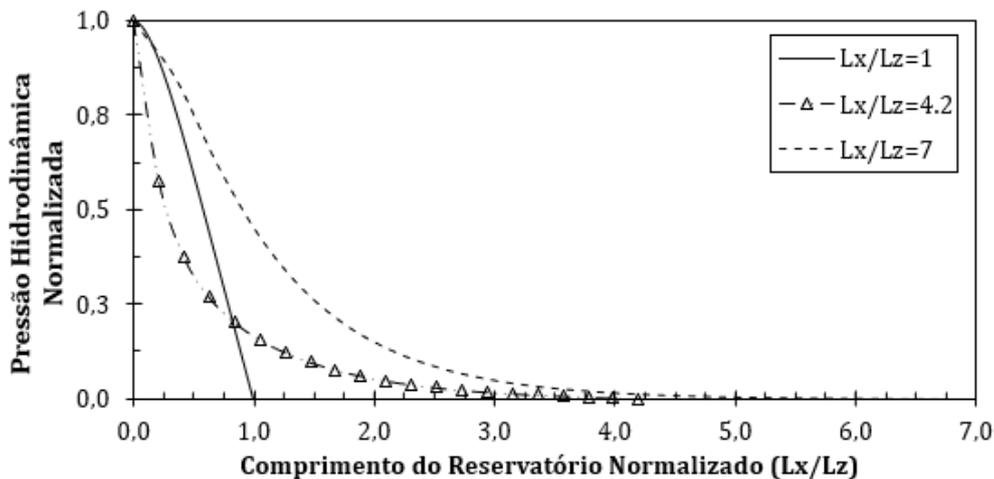
Ao analisar os gráficos das pressões hidrodinâmicas acopladas, do segundo ao quarto modo acoplado as frequências se alteram para todas diferentes discretizações do reservatório (Lx/Lz), ou seja, a cavidade predomina sobre o sistema e altera os modos acoplados para modos dominante cavidade (DC) e, conseqüentemente, as frequências.

Nos modos acoplados dominante cavidade o conjunto vibra com modos de fluido desacoplado, ou seja, a barragem é perturbada e acompanha os efeitos da cavidade acústica. Nota-se que o quarto modo da deformada da barragem acoplada para a relação $Lx/Lz=1$ é alterado devido ao modo transversal DC. Tal fato é explicado pelos modos transversais e longitudinais da cavidade se alternam em uma faixa de frequência próxima, devido as dimensões da cavidade ser de geometria quadrada. Com exceção do primeiro modo de massa adicional, todos os modos acoplados são modos dominantes cavidade na IBR, sendo semelhantes aos modos do fluido desacoplado.

Para um entendimento da abrangência da massa adicional próxima a estrutura da barragem, os gráficos da Figura 10.51 apresentam um comparativo do primeiro modo de pressão acoplada na interface e na base do reservatório para as diferentes relações Lx/Lz . A altura da barragem e o comprimento do reservatório foram normalizados.



(a) Primeiro modo de vibração do fluido (na interface).



(b) Primeiro modo de vibração do fluido (na base longitudinal).

Figura 10.51: Deformadas modais da pressão hidrodinâmica do fluido para o primeiro modo acoplado e diferentes relações Lx/Lz .

Com base nos gráficos mostrados é possível observar que o comportamento das pressões no modo de massa adicional é próximo da barragem. Além disso, o decaimento de forma exponencial é evidenciado para as cavidades mais longas, em acordo com as expressões de massa adicional obtidas pela equação de Laplace. O reservatório curto tem sua distribuição de pressões hidrodinâmicas atuando em praticamente todo comprimento de sua cavidade, uma vez que o efeito das pressões age próximas a estrutura e o pequeno comprimento do meio acústico influi nessa distribuição.

Uma vez compreendida a análise em vibrações livres foi aplicada uma carga harmônica pontual na estrutura da barragem, com intuito de avaliar as propagações de ondas de pressão do fluido e parâmetros fundamentais para entendimento da compressibilidade do fluido.

Análise Harmônica no Problema de Interação Barragem-Reservatório

Partindo da modelagem numérica validada na análise em vibrações livres do problema acoplado fluido-estrutura, foi imposta na crista da barragem uma carga harmônica pontual na mesma direção flexional (ponto A) da forma $P = P_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$. A carga P_0 é de 10000N. Agora, neste caso, a frequência de excitação (ω) da carga foi variada de 0 a 12 Hz e a razão de amortecimento adotada igual à zero ($\xi = 2\%$), com intuito de obter as frequências da análise modal na forma da varredura de frequência para diferentes relações L_x/L_z . O efeito do amortecimento é pequeno (amortecimento subcrítico). O ponto de aplicação da carga (ponto A) e de obtenção dos resultados (ponto B e C) nos modelos numéricos são apresentados na Figura 10.52.

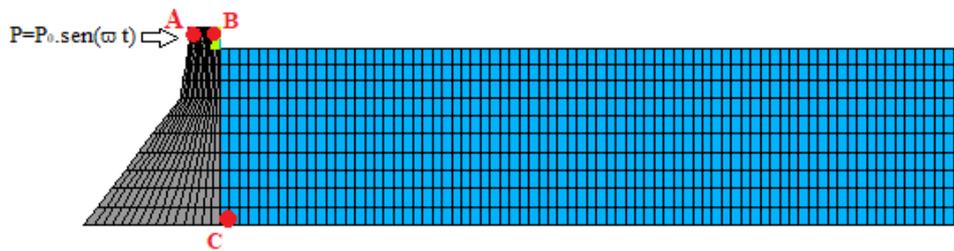
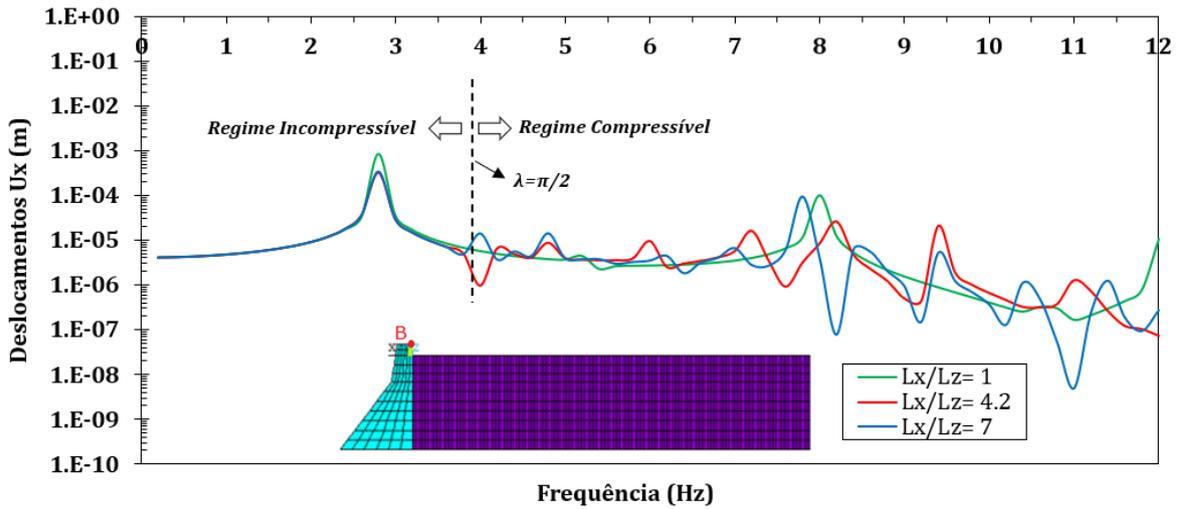
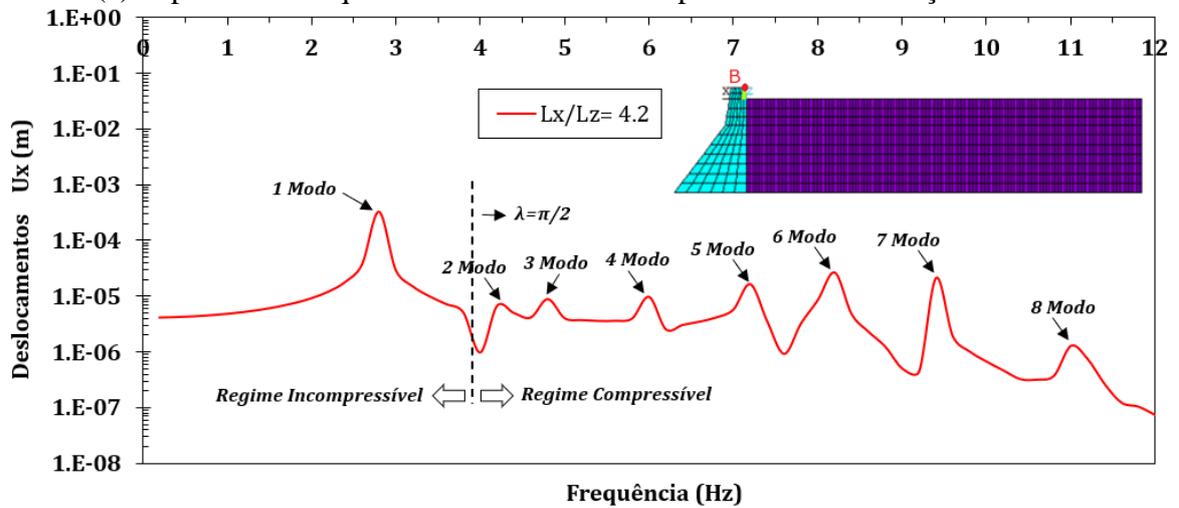


Figura 10.52: Ponto de aplicação da carga harmônica e de obtenção dos resultados no modelo numérico para diferentes relações L_x/L_z .

Assim, foi possível obter as curvas das amplitudes dos deslocamentos (ponto B) e de pressão hidrodinâmica (ponto C) para diferentes relações L_x/L_z em função desta frequência de excitação aplicada. Os resultados são apresentados na Figura 10.53. Vale ressaltar que, o regime incompressível e compressível do fluido indicado na Figura 10.53 é apresentado com base no parâmetro de compressibilidade igual a $\lambda = \pi/2$. O valor de $\lambda = \pi/2$ expressa a singularidade analisada nas soluções analíticas do problema de IBR obtidas a partir da Equação de Laplace (fluido incompressível) e da Equação da Onda Acústica (fluido compressível) analisada nos trabalhos de Silva (2007), Ribeiro (2010) e tantos outros. O parâmetro $\lambda = \pi/2$ expressa uma proximidade da ressonância no problema acoplado em relação a frequência do modo fundamental acústico alcançada.



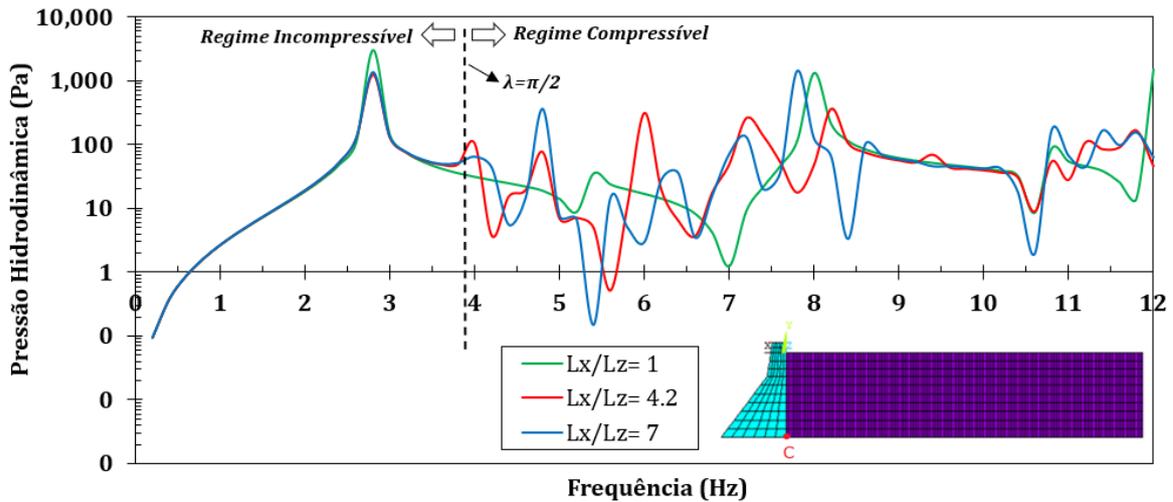
(a) Espectro de frequência de deslocamentos para diferentes relações L_x/L_z .



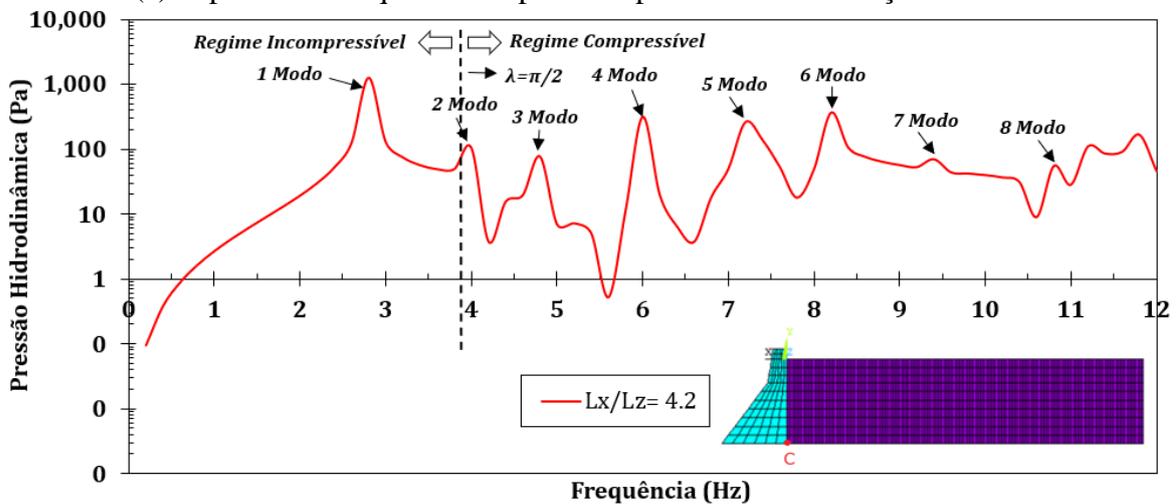
(b) Espectro de frequência e identificação dos modos de vibração para a relação $L_x/L_z=4,2$

Figura 10.53: Espectro de frequência com os deslocamentos da estrutura (U_x) obtido na crista da barragem (ponto B).

Com a análise da Figura 10.53 é possível notar que o primeiro modo de vibração fundamental é um modo bem definido para as diferentes relações L_x/L_z de reservatório, ou seja, o modo de massa adicional independe do comprimento da cavidade acústica discretizada no modelo numérico. O campo de pressão devido ao carregamento harmônico pode ser visualizado na Figura 10.54.



(a) Espectro de frequência de pressões para diferentes relações L_x/L_z .



(b) Espectro de frequência e identificação dos modos de pressão para a relação $L_x/L_z=4,2$.

Figura 10.54: Espectro de frequência com as pressões hidrodinâmicas (P) obtido no fundo do reservatório (ponto C).

Com base nos espectros de frequência mostrados através das figuras acima se pode concluir que, os picos das curvas com as amplitudes de deslocamento ocorrem para frequências aplicadas iguais as frequências naturais em que o sistema acoplado vai sendo excitado. Com isso, fica nítido o comportamento do fenômeno acoplado após o primeiro modo de massa adicional, em que o fluido funciona como incompressível. Após tal frequência, as ondas de pressão propagam na cavidade e o efeito da compressibilidade do fluido torna-se preponderante sob fenômeno de vibração. Para uma análise visual dos efeitos, são apresentadas as pressões hidrodinâmicas na sequência das frequências de excitação obtidas no presente trabalho. Foram obtidas as frequências até o terceiro modo acoplado para o reservatório com relação $L_x/L_z = 4,2$.

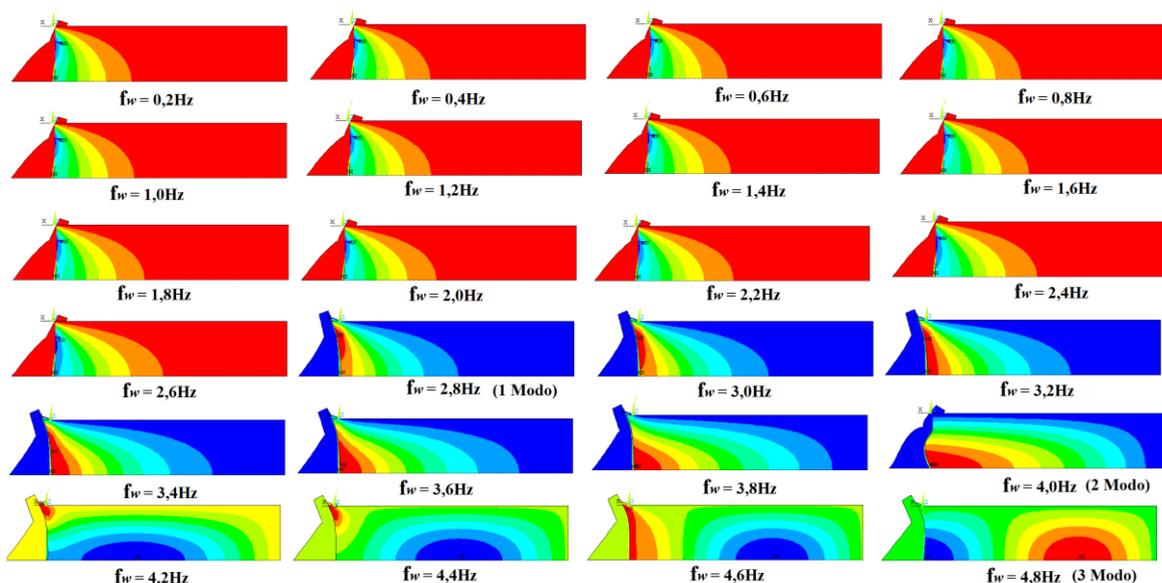


Figura 10.55: Propagação das pressões hidrodinâmicas no reservatório devido a varredura da frequência de excitação para relação $L_x/L_z=4,2$.

As análises dos modos dominantes tendo por base tanto a análise em vibração livre quanto forçada harmônica é válida para melhor entendimento do acoplamento fluido-estrutura e as faixas dominantes de frequências.

10.6. ESTUDOS DE CASOS EM ECLUSAS

Neste tópico, a metodologia do ACPP, proposta neste trabalho, é utilizada para analisar as frequências acopladas de massa adicional fluido-estrutura em eclusas. Além disso, um estudo paramétrico com a influência das dimensões da cavidade acústica no problema da eclusa foi realizado.

10.6.1. Aplicação do ACPP na Análise de Eclusas Flexíveis, Esbeltas e com Inércia Constante

A análise de eclusas foi feita partindo do estudo de duas estruturas flexíveis (vigas esbeltas), ambas com condição de contorno engastada-livre e acopladas com uma cavidade acústica. Então, o resumo da condição de contorno do problema é denominado IFE-IFE-F-A. O estudo abordou um comparativo do ACPP com o MEF.

Descrição e Parâmetros dos Modelos

A estrutura discretizada foi de uma viga esbelta (efeito flexão preponderante), com condição de contorno engastada na base e livre no topo e de dimensões $b=B=10m$, ou seja, de inércia constante. A altura (H) da estrutura é igual a $100m$. A estrutura da viga possui massa específica de 2400 kg/m^3 , coeficiente de Poisson de $\nu=0,2$ e módulo de elasticidade $E=30GPa$.

Os parâmetros do reservatório retangular discretizado no modelo numérico foram de altura (L_z) de 100 m e com comprimento longitudinal (L_x) variável, sendo: $25m$, $50m$, $100m$, $200m$ e $400m$. Os comprimentos distintos refletem em cinco diferentes relações comprimento/altura (L_x/L_z) do reservatório, sendo: $L_x/L_z = 0,25$; $L_x/L_z = 0,50$; $L_x/L_z = 1,0$; $L_x/L_z = 2,0$ e $L_x/L_z = 4,0$. A massa específica do fluido corresponde a 1000 kg/m^3 (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1500 m/s .

A condição de contorno apropriada para o fluido desacoplado é fechada-fechada no sentido longitudinal (L_x) e fechada-aberta no sentido transversal (L_z), denominada de F-F-F-A. No estudo da interação eclusa-reservatório as duas estruturas são acopladas no sentido longitudinal (L_x), denominada de IFE-IFE-F-A. Nos modelos numéricos foram utilizados os elementos FLUID29 e PLANE183 para discretizar a cavidade acústica e a estrutura, respectivamente. Os modelos numéricos acoplados são apresentados na Figura 10.56.

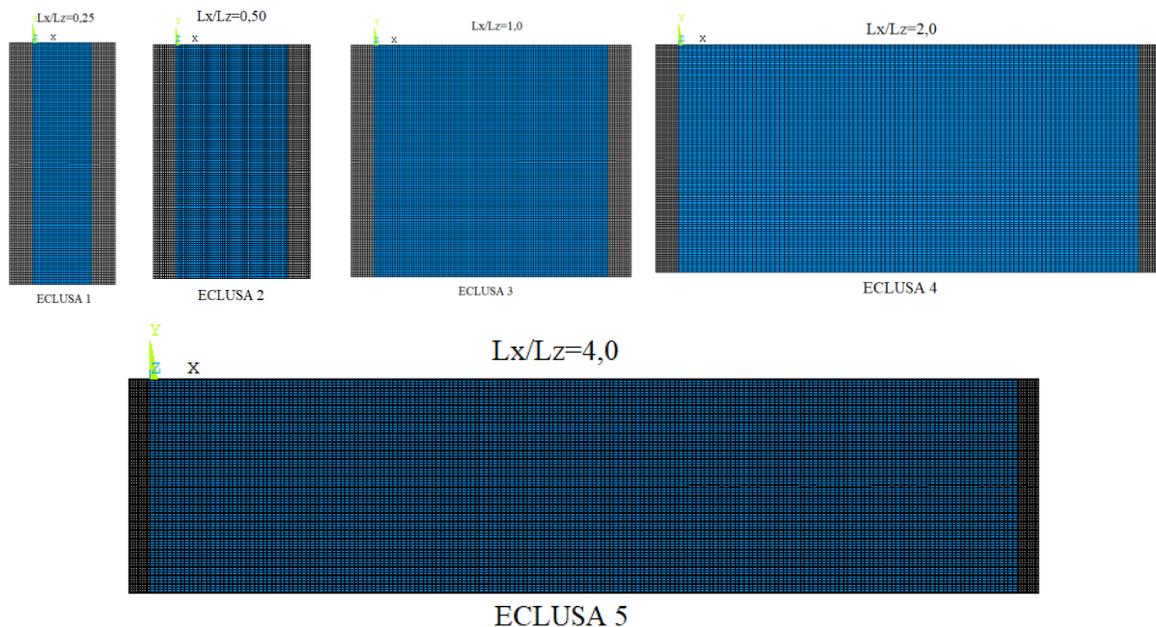


Figura 10.56: Modelos numéricos de estruturas flexíveis engastada-livre (eclusas) acoplada com a cavidade acústica (IFE-IFE-F-A).

Com as estruturas discretizadas foram realizados os estudos comparativos analíticos e numéricos.

Resultados das Estruturas de Eclusa Desacopladas

As eclusas 1, 2, 3, 4 e 5 analisadas possuem as mesmas dimensões e propriedades físicas. Então, os parâmetros generalizados e as frequências naturais associadas aos três primeiros modos de vibração da estrutura das eclusas desacopladas são apresentados na Tabela 10.20.

Tabela 10.20– Parâmetros generalizados, frequências naturais analíticas e numéricas das estruturas de eclusas desacopladas.

| Casos Analisados | Modo da Estrutura | Parâmetros Generalizados da Estrutura | | Frequências Naturais Desacopladas | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------|
| | | K^* (N/m) | m^* (Kg) ($\times 10^5$) | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica ACPP | Dif. (%) |
| Eclusa 1, 2, 3, 4 e 5 | 1º | 30543731,40 | 24 | 0,57 | 0,57 | 0,00 |
| | 2º | 1213797045 | 24 | 3,41 | 3,58 | 4,98 |
| | 3º | 9516364795 | 24 | 9,50 | 10,02 | 5,47 |

A partir da Tabela 10.20 é possível observar que, no geral, os valores das frequências naturais das eclusas desacopladas associadas aos três primeiros modos de vibração tiveram os resultados comparativos analíticos e numéricos com pequenas diferenças percentuais. O modelo numérico da estrutura desacoplada e seus três primeiros modos de vibração são apresentados na Figura 10.57.

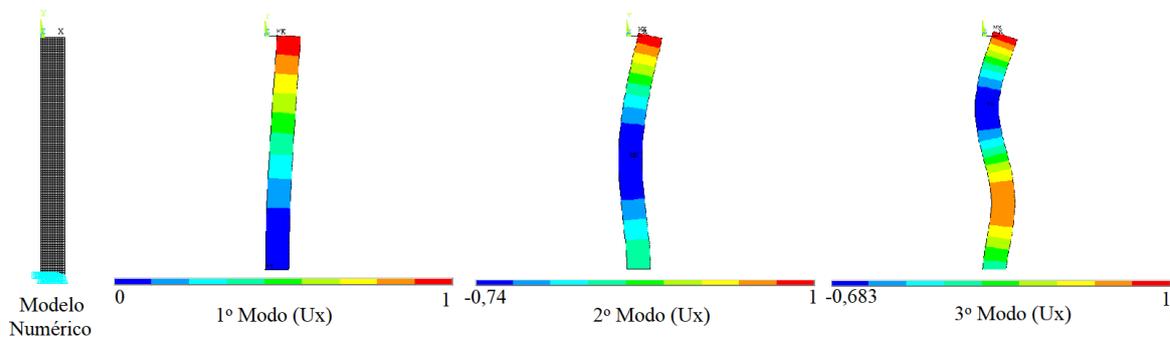


Figura 10.57: Três primeiros modos de vibração obtidos nas análises numéricas das eclusas desacopladas.

Uma vez realizado a análise desacoplada da estrutura, foi possível realizar a análise do fluido desacoplado.

Resultados do Fluido Desacoplado

As cavidades das eclusas 1, 2, 3, 4 e 5 possuem cinco diferentes relações comprimento/altura (L_x/L_z) do reservatório, sendo: $L_x/L_z = 0,25$; $L_x/L_z = 0,50$; $L_x/L_z = 1,0$; $L_x/L_z = 2,0$ e $L_x/L_z = 4,0$.

Para todas as relações geométricas, as frequências naturais de modos de vibração do fluido desacoplado foram investigadas. Os resultados das frequências naturais associadas aos quatro primeiros modos de vibração de pressão do fluido desacoplado para cada relação (L_x/L_z) são apresentados na Tabela 10.21.

Tabela 10.21– Frequências naturais analíticas e numéricas das cavidades acústicas desacopladas com condição de contorno F-F-F-A.

| Casos Analisados | Relação L_x/L_z | Ordem do Modo | Tipo do Modo (m,n) | Descrição da Composição do Modo | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica | Dif. (%) |
|----------------------|-------------------|---------------|------------------------|--|----------------|----------------------|----------|
| Cavidade da Eclusa 1 | 0,25 | 1º | (0,1) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 1º modo de onda plana em L_z | 3,75 | 3,75 | 0,00 |
| | | 2º | (0,2) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 2º modo de onda plana em L_z | 11,27 | 11,25 | 0,18 |
| | | 3º | (0,3) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 3º modo de onda plana em L_z | 18,87 | 18,75 | 0,64 |
| | | 4º | (0,4) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 4º modo de onda plana em L_z | 26,58 | 26,25 | 1,24 |
| Cavidade da Eclusa 2 | 0,5 | 1º | (0,1) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 1º modo de onda plana em L_z | 3,75 | 3,75 | 0,00 |
| | | 2º | (0,2) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 2º modo de onda plana em L_z | 11,27 | 11,25 | 0,18 |
| | | 3º | (1,1) | 1º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 15,52 | 15,46 | 0,39 |
| | | 4º | (1,2) | 1º Modo fechado-fechado em L_x combinado com o 2º modo fechado-aberto em L_z | 18,81 | 18,75 | 0,32 |
| Cavidade da Eclusa 3 | 1,0 | 1º | (0,1) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 1º modo de onda plana em L_z | 3,75 | 3,75 | 0,00 |
| | | 2º | (1,1) | 1º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 8,39 | 8,38 | 0,12 |
| | | 3º | (0,2) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 2º modo de onda plana em L_z | 11,27 | 11,25 | 0,18 |
| | | 4º | (1,2) | 1º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 2º modo fechado-aberto em L_z | 13,55 | 13,52 | 0,22 |
| Cavidade da Eclusa 4 | 2,0 | 1º | (0,1) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 1º modo de onda plana em L_z | 3,75 | 3,75 | 0,00 |
| | | 2º | (1,1) | 1º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 5,31 | 5,30 | 0,19 |
| | | 3º | (2,1) | 2º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º Modo fechado-aberto em L_z | 8,39 | 8,38 | 0,12 |
| | | 4º | (0,2) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 2º modo de onda plana em L_z | 11,27 | 11,25 | 0,18 |
| Cavidade da Eclusa 5 | 4,0 | 1º | (0,1) | Modo fechado-fechado ($m=0$) em L_x combinado com o 1º modo de onda plana em L_z | 3,75 | 3,75 | 0,00 |
| | | 2º | (1,1) | 1º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 4,19 | 4,19 | 0,00 |
| | | 3º | (2,1) | 2º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 5,31 | 5,30 | 0,19 |
| | | 4º | (3,1) | 3º modo fechado-fechado em L_x combinado com o 1º modo fechado-aberto em L_z | 6,76 | 6,75 | 0,15 |

A partir da Tabela 10.21, nota-se que os resultados obtidos pelo método de energia possuem baixas diferenças percentuais em relação ao MEF. Diante dos resultados encontrados na tabela e considerando os seus baixos erros percentuais, pode-se afirmar que a modelagem foi validada e que as diferentes frequências naturais foram condizentes.

Além disso, observa-se ainda que, para as diversas relações geométricas, a primeira frequência fundamental de ressonância acústica é de 3,75Hz. Isso é explicado pelo fato de a

condição de contorno no sentido longitudinal fechada-fechada impor o primeiro modo constante ($m=0$). Assim, conseqüentemente, a menor frequência possui uma predominância em relação ao primeiro modo acústico transversal ($n=1$) fechado-aberto que é necessariamente de onda plana.

Infere-se ainda que, a ordem das demais frequências naturais da cavidade acústica depende diretamente da condição de contorno e de sua geometria. Logo, é necessário analisar as deformadas modais de pressão acústica associadas as frequências naturais apresentadas na Tabela 10.21. A Figura 10.58 apresenta os quatro primeiros modos de pressão hidrodinâmica do fluido desacoplado para as cinco eclusas.

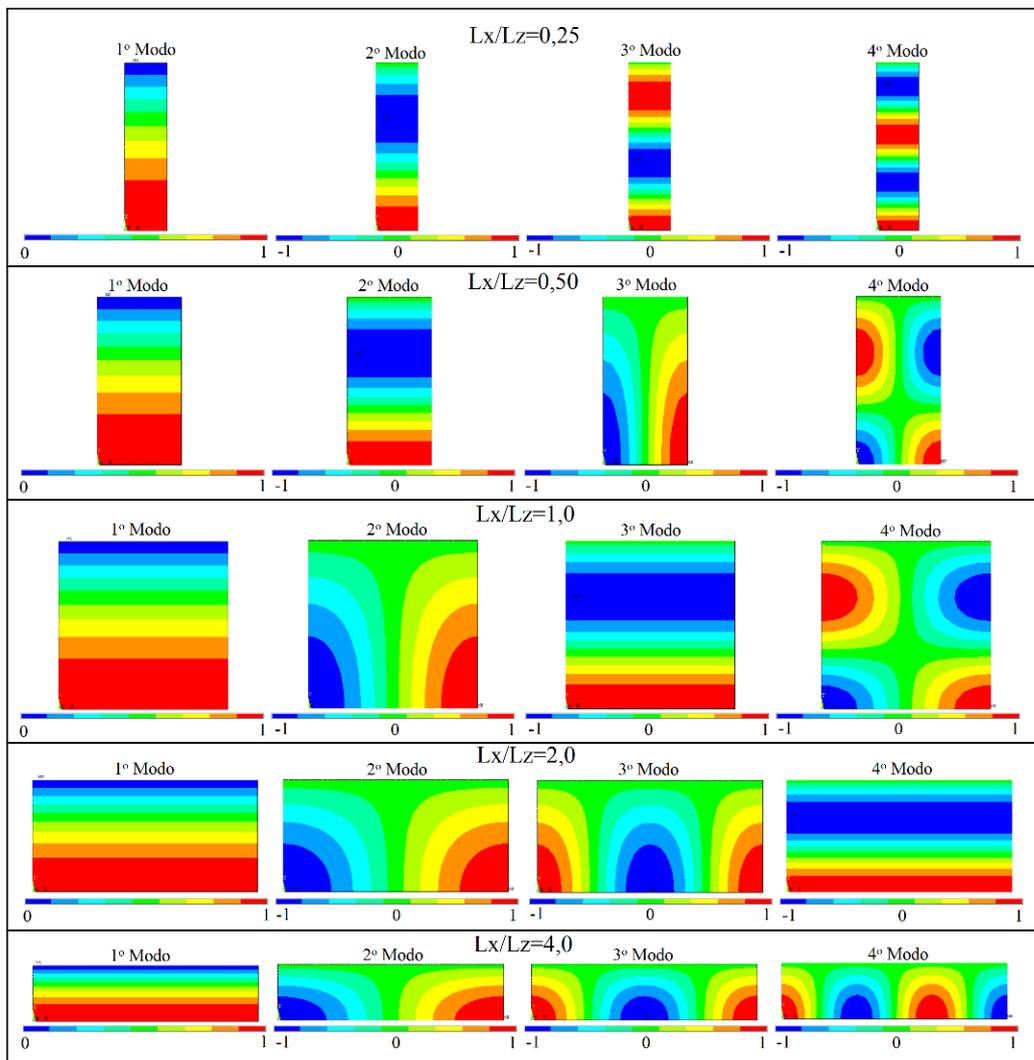


Figura 10.58: Deformadas modais de pressão hidrodinâmica numéricas das cavidades acústicas desacopladas de condição de contorno F-F-F-A e com diferentes relações geométricas Lx/Lz .

Os modos acústicos apresentados foram condizentes com as condições de contorno associadas aos modos longitudinais e transversais das cavidades acústicas das diferentes eclusas. Uma vez obtido os efeitos desacoplados, pode-se avaliar a interação fluido-estrutura para as eclusas.

Resultados da Interação Eclusa-Reservatório

Na análise acoplada fluido-estrutura das cinco eclusas, foram comparados os resultados analíticos pelo ACPP e pelo MEF das quatro primeiras frequências naturais associadas aos quatro primeiros modos de vibração. Essas frequências e modos analisados são todos dominantes estrutura de massa adicional no regime incompressível, uma vez que a primeira frequência ressonante da cavidade acústica desacoplada é de 3,75Hz para todos as relações L_x/L_z . Os resultados das frequências naturais são apresentados no gráfico da Figura 10.59.

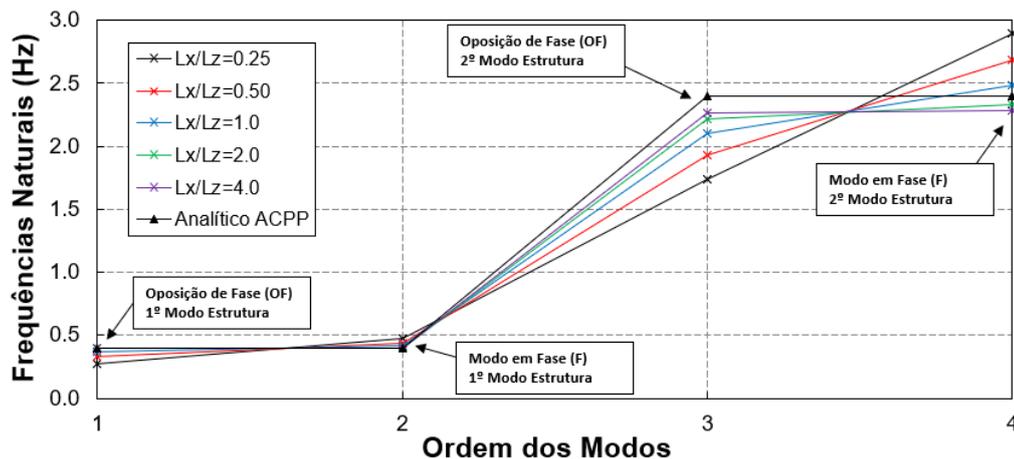


Figura 10.59: Comparativo entre as quatro primeiras frequências naturais analíticas e numéricas das cinco eclusas acopladas com fluido.

A partir da Figura 10.59 é possível observar que a primeira frequência acoplada é associada a um modo de oposição de fase e a segunda frequência acoplada é associada a um modo em fase. Tanto na primeira quanto na segunda frequência acoplada, a estrutura vibra com o primeiro modo desacoplado. O ACPP fornece apenas uma frequência para ambos os modos citados, pois não diferencia o efeito vibracional entre fase e oposição de fase. O modelo numérico capta a influência do modo em fase e oposição de fase. Entretanto, nota-se que para as diferentes relações L_x/L_z os valores analíticos e numéricos foram próximos.

Observa-se ainda que, a terceira frequência acoplada é associada a um modo de oposição de fase e a quarta frequência acoplada é associada a um modo em fase. Em ambas as frequências a estrutura vibra com o segundo modo desacoplado. O ACPP também fornece apenas uma

frequência para os modos citados (terceiro e quarto), pelo mesmo motivo de não diferenciar o efeito vibracional entre fase e oposição de fase quando comparado com o MEF. Para essas frequências (terceira e quarta), o efeito da proximidade das estruturas aumenta a divergência entre os resultados analíticos e numéricos, porém os valores obtidos pelo ACPP ficam próximos aos obtidos pelo MEF para a relação $L_x/L_z = 4,0$; que é o caso das estruturas mais afastadas (caso da barragem). Isso confirma o uso do ACPP na análise de barragens e na frequência fundamental em eclusas.

Além disso, de uma forma geral, nota-se que os modos acoplados na eclusa-reservatório se alternam entre modos em oposição de fase e em fase. À medida que as frequências naturais e os modos aumentam a faixa de frequência para as diferentes relações L_x/L_z também aumentam. Para uma melhor compreensão das frequências e dos efeitos de vibração citados, a Figura 10.60 apresenta as deformadas das estruturas da eclusa e de pressão hidrodinâmica do fluido para o primeiro modo acoplado (1º modo em oposição de fase) e diferentes relações L_x/L_z estudadas.

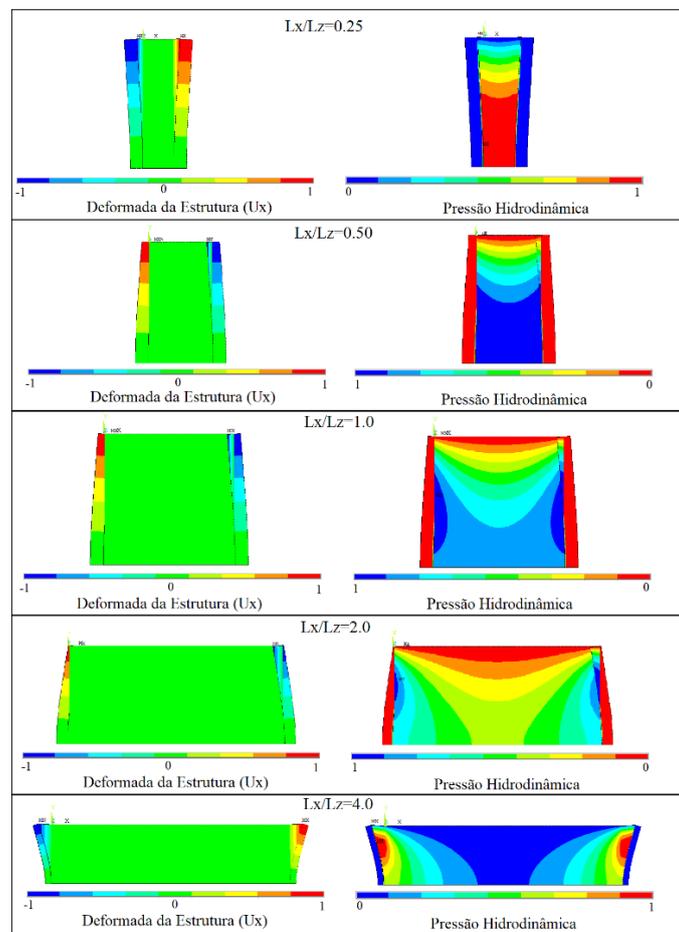


Figura 10.60: Deformadas modais estruturais e de pressão hidrodinâmica do primeiro modo acoplado (1º modo em oposição de fase) e diferentes relações geométricas L_x/L_z .

A partir da Figura 10.60 é possível observar que a primeira frequência acoplada é associada a um primeiro modo de oposição de fase. As estruturas vibram no primeiro modo desacoplado em sentidos opostos e tende a “comprimir” o fluido do reservatório. Quanto menor é a relação L_x/L_z (eclusa de canal estreito) o efeito da sobreposição nas pressões hidrodinâmicas é mais significativo, mas à medida que a relação L_x/L_z é maior (eclusa de canal mais largo) os efeitos tendem ao da interação barragem-reservatório. A Figura 10.61 apresenta as deformadas das estruturas da eclusa e de pressão hidrodinâmica do fluido para o segundo modo acoplado (1º modo em fase) e diferentes relações L_x/L_z estudadas.

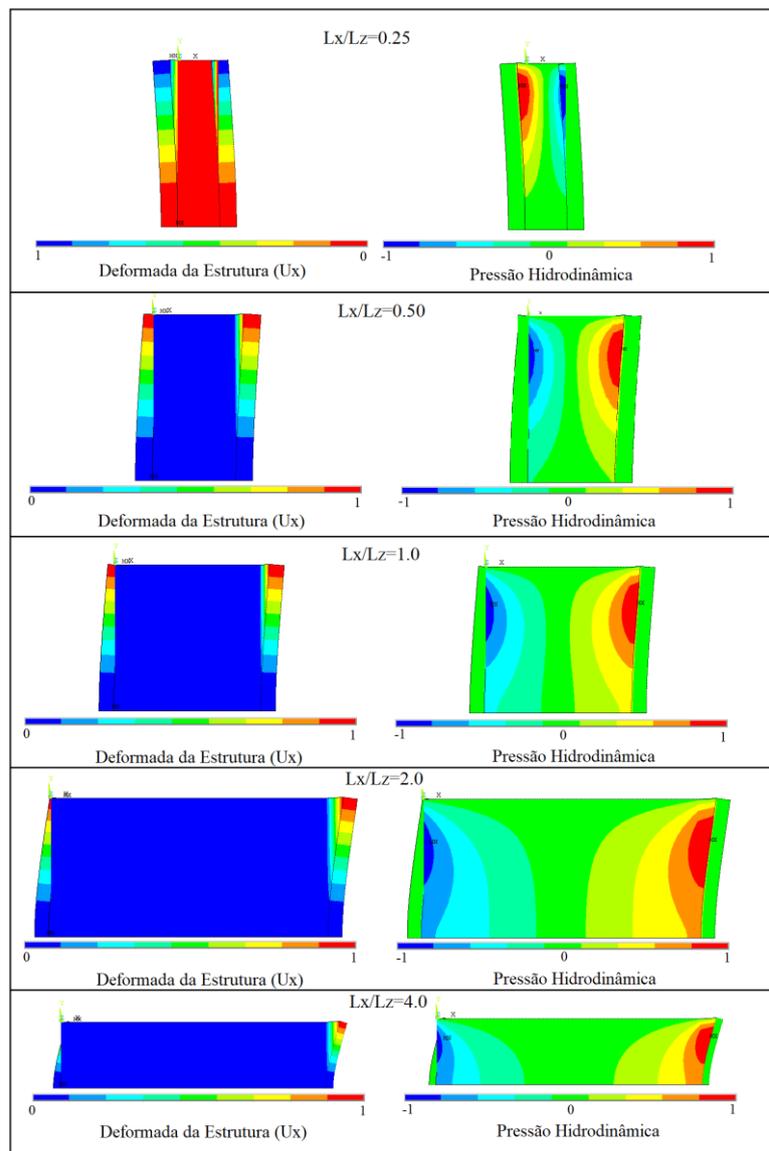


Figura 10.61: Deformadas modais estruturais e de pressão hidrodinâmica do segundo modo acoplado (1º modo em fase) e diferentes relações geométricas L_x/L_z .

A partir da Figura 10.61 é possível observar que a segunda frequência acoplada é associada a um primeiro modo em fase. As estruturas vibram no primeiro modo desacoplado no mesmo

sentido. Assim, neste caso o efeito da “compressão” no fluido do reservatório confinado acontece apenas por uma estrutura ou pela outra e vice-versa. Portanto, pode-se observar que tanto para a menor relação L_x/L_z (eclusa de canal estreito) quanto para a maior relação L_x/L_z (eclusa de canal mais largo) o efeito da sobreposição nas pressões hidrodinâmicas é menos significativo. Entretanto, para relações L_x/L_z menores (canais curtos) nota-se uma influência da proximidade dos campos de pressões hidrodinâmicas na região do reservatório próximo da base de ambas as estruturas. Para relações maiores ($L_x/L_z = 4,0$), o comportamento neste caso tende ao mesmo obtido na interação barragem-reservatório, onde a região de massa adicional no modo dominante estrutura é nítido.

Além dos diagramas em cores apresentados associados ao primeiro e segundo modo acoplado para diferentes relações L_x/L_z , foram realizados cortes na deformada da estrutura e nas pressões hidrodinâmicas, sendo ambos na região da interface fluido-estrutura. A Figura 10.62 apresenta os resultados obtidos.

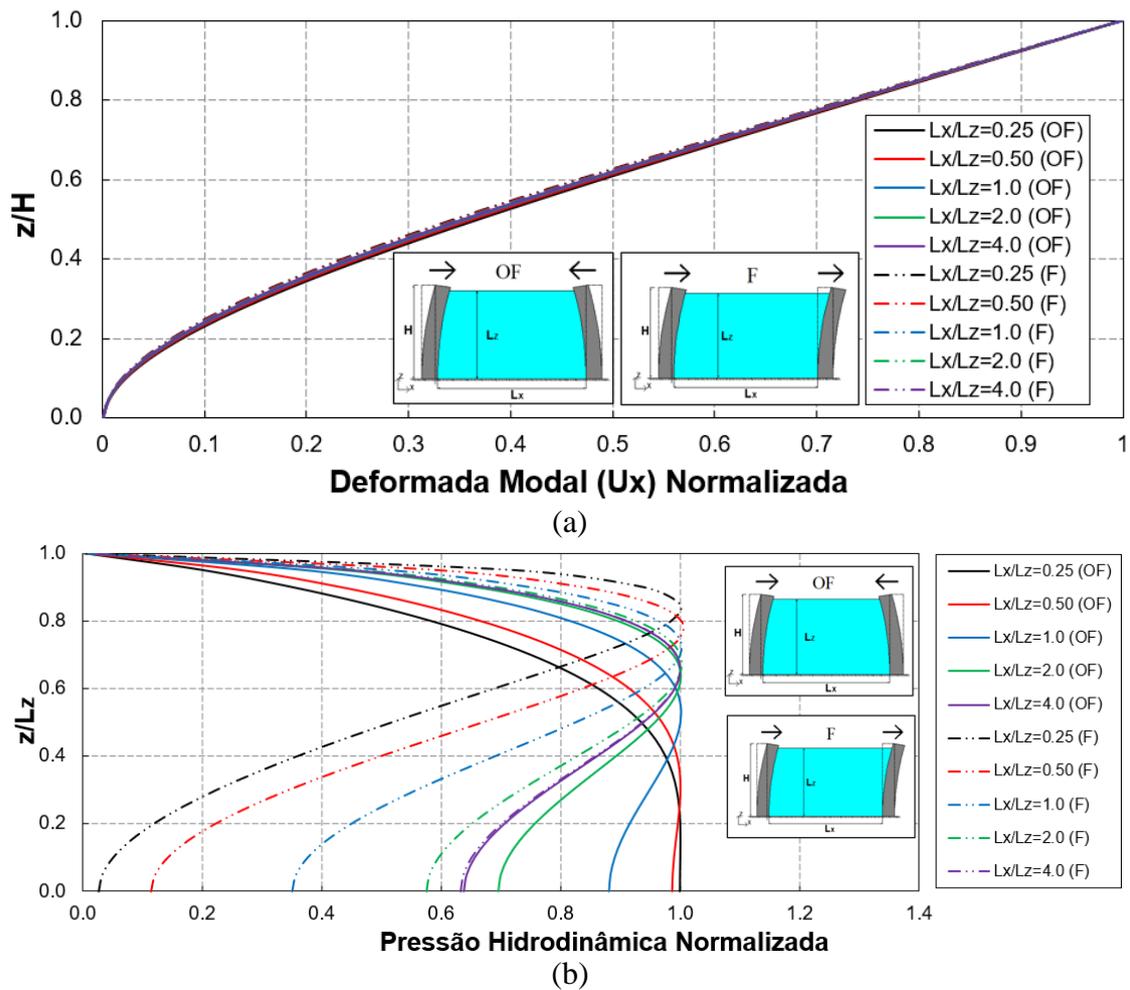


Figura 10.62: Deformadas modais estruturais e pressões hidrodinâmicas do primeiro e segundo modo acoplado para diferentes relações geométricas L_x/L_z .

A partir da análise da é possível reafirmar que a estrutura vibra no primeiro modo desacoplado tanto para o primeiro modo acoplado (oposição de fase) quanto para o segundo modo acoplado (em fase). A influência da relação geométrica L_x/L_z no caso da eclusa não altera a deformada modal da estrutura que predomina em um modo dominante de massa adicional no regime incompressível.

Contudo, observa-se ainda que, o campo de pressão hidrodinâmica é afetado pela proximidade das estruturas, principalmente no modo em oposição de fase para a relação $L_x/L_z = 0,25$, em que é evidenciado que o campo de pressão não tem relação com a deformada da estrutura engastada-livre como acontece nos modos em fase, pois o efeito do confinamento do fluido bem como a vibração em sentidos opostos das estruturas produzem uma espécie de “compressão” no fluido e reflete uma alteração no campo de pressão hidrodinâmico.

Por fim, nota-se ainda que para eclusas com relações L_x/L_z maiores (canais mais largos), os modos acoplados tanto em fase quanto em oposição de fase tendem a valores comuns das pressões hidrodinâmicas. Isso pode ser observado ao analisar a sobreposição nas curvas obtidas para a relação $L_x/L_z = 4,0$. Neste caso, o campo de pressão hidrodinâmico recai no mesmo efeito dos problemas de interação barragem-reservatório. A partir da análise das eclusas flexíveis, esbeltas e de inércia constante, o estudo foi expandido para a análise de eclusa flexível, espessa e de inércia variável visto no tópico a seguir.

10.6.2. Aplicação do ACPD na Análise de Eclusa Flexível, Espessa e com Inércia Variável (Eclusa de Tucuruí)

Prosseguindo com o estudo em eclusas, neste tópico são apresentados os resultados comparativos entre o ACPD e o MEF que foram obtidos da análise dinâmica em uma eclusa flexível, espessa e de inércia variável. O estudo foi aplicado na eclusa de Tucuruí, sendo que ela foi discretizada com sua seção real e com uma seção aproximada de análise. Ambas as estruturas da eclusa possuem condição de contorno engastada-livre e são acopladas com uma cavidade acústica. Assim, o resumo da condição de contorno do problema é denominado IFE-IFE-F-A.

Descrição e Parâmetros dos Modelos

A eclusa de Tucuruí é uma estrutura flexível, espessa e de inércia variável com uma descontinuidade inercial ao longo da seção. Então, foram realizados estudos com dois modelos da seção transversal, denominados: seção transversal aproximada e seção transversal real. O modelo da seção transversal aproximada é representado por uma aproximação da seção transversal de Tucuruí, sendo assumida inércia linearmente variável sem incorporar a descontinuidade da inércia. O modelo da seção transversal real é expresso pela seção transversal que realmente foi construída a eclusa de Tucuruí, ou seja, é incorporada na análise a descontinuidade da variação inercial no gargalo da estrutura.

O método do ACPP só simula inércia variando linearmente, então o modelo da seção transversal aproximada teve seus resultados obtidos pelo ACPP e confrontados com o MEF. A seção transversal real foi analisada numericamente. A Figura 10.63 apresenta as dimensões dos modelos estudados para eclusa de Tucuruí.

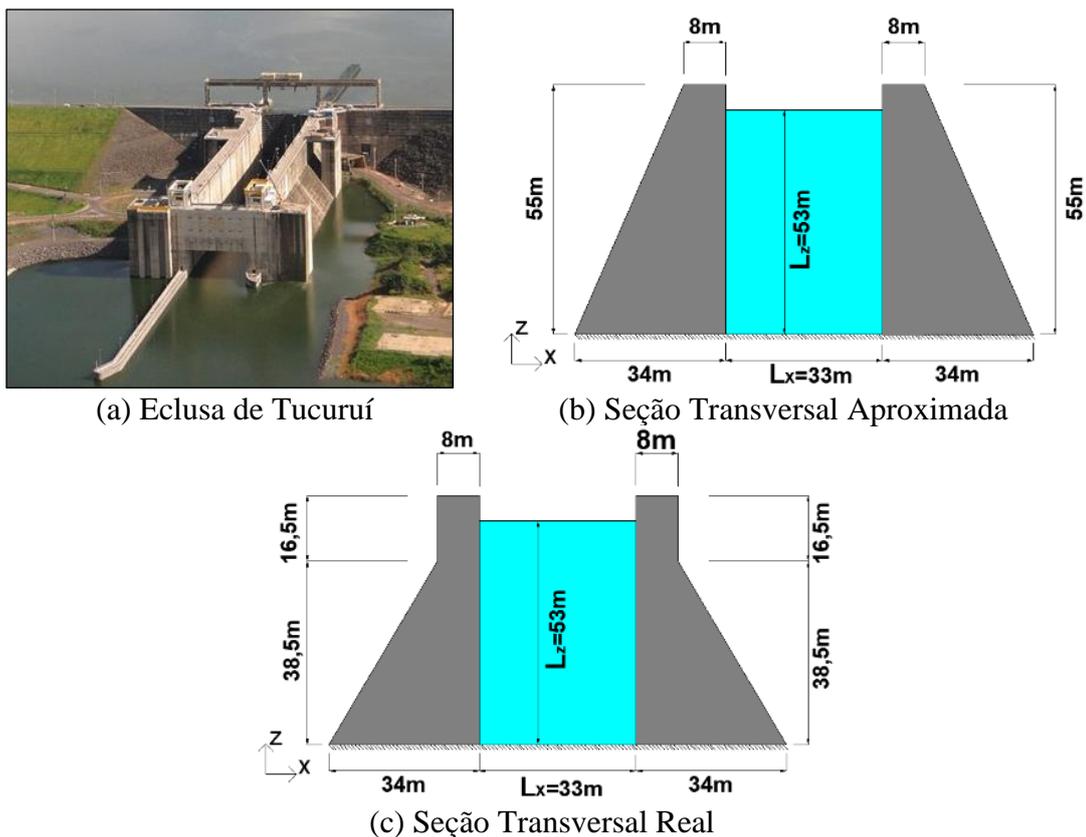


Figura 10.63: Dimensões dos modelos estudados da Eclusa de Tucuruí (jusante).

As estruturas têm condição de contorno engastada na base e livre no topo e de dimensões apresentadas na Figura 10.63. A estrutura da eclusa é de concreto e possui massa específica de 2400 kg/m^3 , coeficiente de Poisson de $\nu=0,25$ e módulo de elasticidade $E=25\text{GPa}$. Os parâmetros do reservatório retangular foram de massa específica do fluido corresponde a

1000 kg/m³ (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1500 m/s. As dimensões do fluido foram assumidas para situação da eclusa cheia, com água de altura (L_z) de 53m, com comprimento longitudinal (L_x) de 33m e com comprimento do canal (L_y) de 210m. As dimensões do reservatório refletem em uma relação comprimento/altura (L_x/L_z) do fluido de $L_x/L_z = 0,62$.

A condição de contorno apropriada para o fluido desacoplado é fechada-fechada no sentido longitudinal (L_x) e fechada-aberta no sentido transversal (L_z), denominada de F-F-F-A. No estudo da interação eclusa-reservatório as duas estruturas são acopladas no sentido longitudinal (L_x), denominada de IFE-IFE-F-A. Inicialmente as pressões hidrodinâmicas impulsivas foram avaliadas, posteriormente a condição de superfície livre *sloshing* foi incorporada nas análises.

As estruturas foram discretizadas pelo MEF como modelo tridimensional. Assim, nos modelos numéricos foram utilizados os elementos FLUID30 e SOLID95 para discretizar a cavidade acústica e a estrutura, respectivamente. Os modelos numéricos acoplados são apresentados na Figura 10.64.

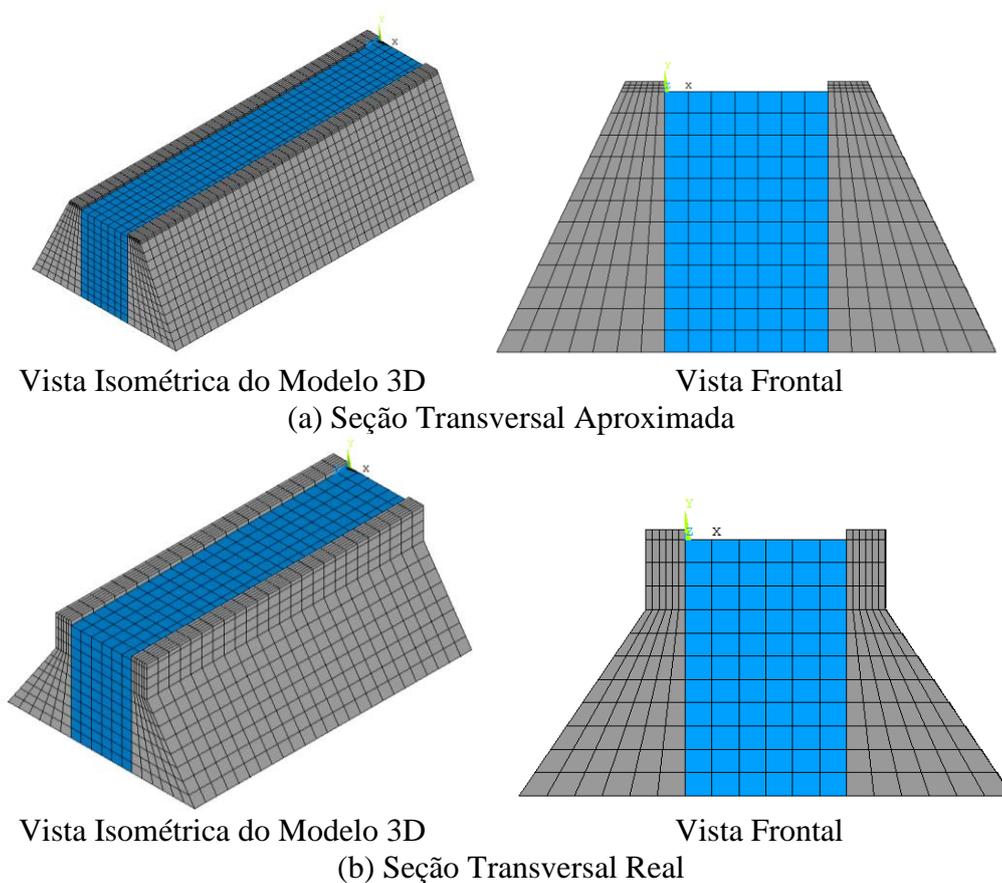


Figura 10.64: Modelos numéricos discretizados da Eclusa de Tucuruí.

O modelo analítico do ACPD é válido para a seção transversal aproximada, uma vez que a variação inercial não apresenta nenhuma descontinuidade. Assim, para as dimensões apresentadas da seção transversal aproximada apresentada, a rigidez generalizada e a massa generalizada utilizadas no ACPD associada ao modo fundamental (1º modo) é de $K^*=2469062609$ N/m e de $m^*=1719962$ Kg, respectivamente. O comprimento equivalente, associado ao primeiro modo, para uso no ACPD é de $L_{eq}=13,38m$. Com as estruturas discretizadas foram realizados os estudos comparativos analíticos e numéricos.

Resultados Associados as Pressões Hidrodinâmicas Impulsivas

A Tabela 10.22 apresenta os resultados da primeira frequência natural associadas ao modo de vibração fundamental da estrutura desacoplada, do fluido desacoplado e do problema acoplado eclusa-reservatório. As frequências fundamentais obtidas são relativas aos modos em oposição de fase (OF) e em fase (F), no regime incompressível dominante estrutura de massa adicional.

Tabela 10.22– Frequências naturais analíticas e numéricas da Eclusa de Tucuruí com seção transversal aproximada e seção transversal real.

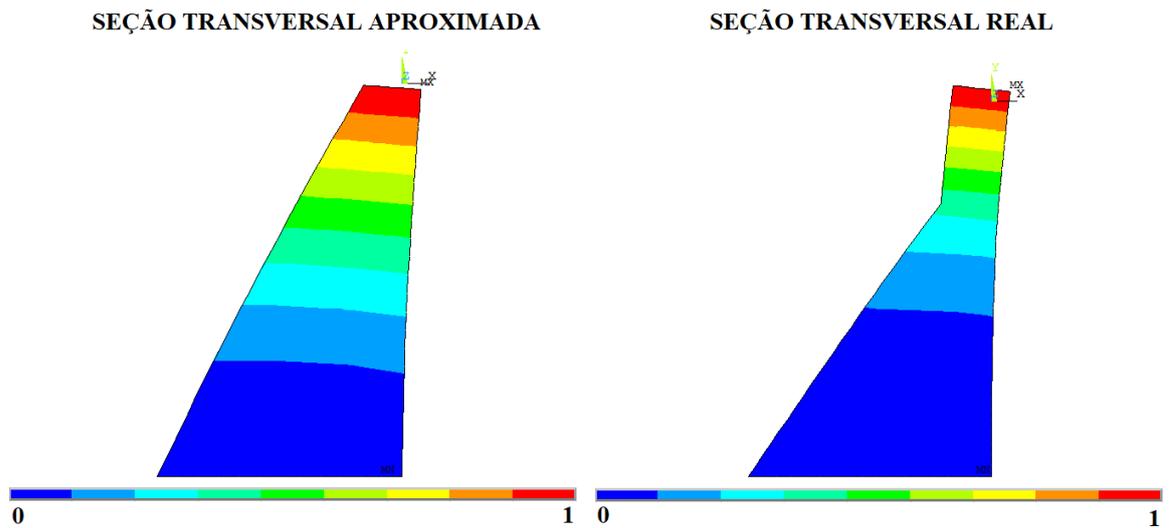
| Caso Analisado | Estrutura desacoplada | | | Fluido Desacoplado | | | Interação Fluido-Estrutura | | | |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|----------|--------------------|--------------------------------|----------|----------------------------|----------------|---------------------------|----------|
| | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica ACPD | Dif. (%) | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica (Energia) | Dif. (%) | Tipo do Modo | Freq. (Hz) MEF | Freq. (Hz) Analítica ACPD | Dif. (%) |
| Seção Transversal Aproximada | 5,80 | 6,00 | 3,45 | 7,07 | 7,07 | 0,00 | OF | 4,35 | 5,10 | 17,24 |
| | | | | | | | F | 5,30 | 5,10 | 3,75 |
| Seção Transversal Real | 5,0 | Não capta | - | | | | OF | 3,89 | Não capta | - |
| | | | | | | | F | 4,55 | Não capta | - |

A partir da Tabela 10.22 é possível observar que a formulação do ACPD determina adequadamente a frequência fundamental da estrutura desacoplada. A frequência fundamental do reservatório desacoplado obtida pela formulação analítica do método de energia apresentou valores iguais quando comparada com o MEF.

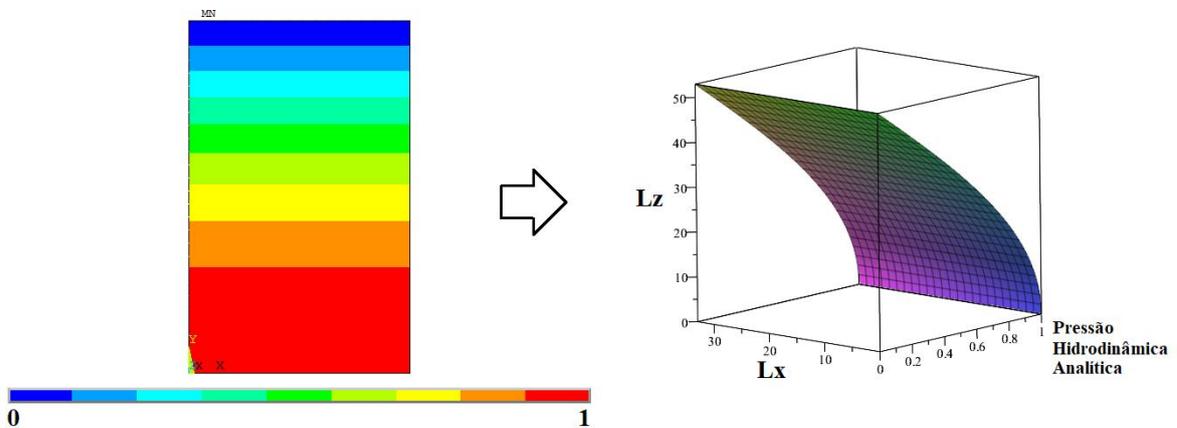
Infere-se ainda que, na análise da frequência fundamental das estruturas acopladas com fluido, o canal da esclusa é estreito ($L_x/L_z=0,62$) e no primeiro modo acoplado em oposição de fase (OF) as estruturas tendem a “comprimir” o fluido. Devido a isso, o campo de pressão hidrodinâmico se sobrepõe e justifica a alteração de forma significativa nas frequências obtidas pelo ACPD em relação ao MEF. Em contrapartida, o segundo modo acoplado é caracterizado pelo primeiro modo em fase (F), em que as estruturas vibram no mesmo

sentido e o campo de pressão hidrodinâmico é menos afetado devido à proximidade das estruturas. No modo fundamental em fase o ACPP apresenta pequena diferença percentual quando comparado ao MEF.

A Figura 10.65 apresenta os modos de vibração fundamental da estrutura e do fluido desacoplado associado as frequências apresentadas na Tabela 10.22.



(a) Modo de vibração fundamental das estruturas desacopladas

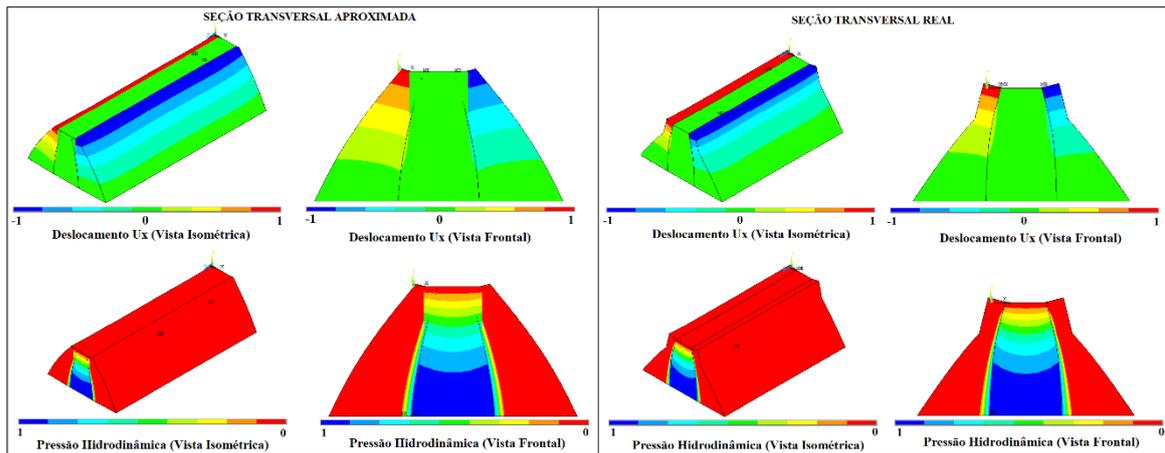


(b) Modo de vibração fundamental do fluido desacoplado

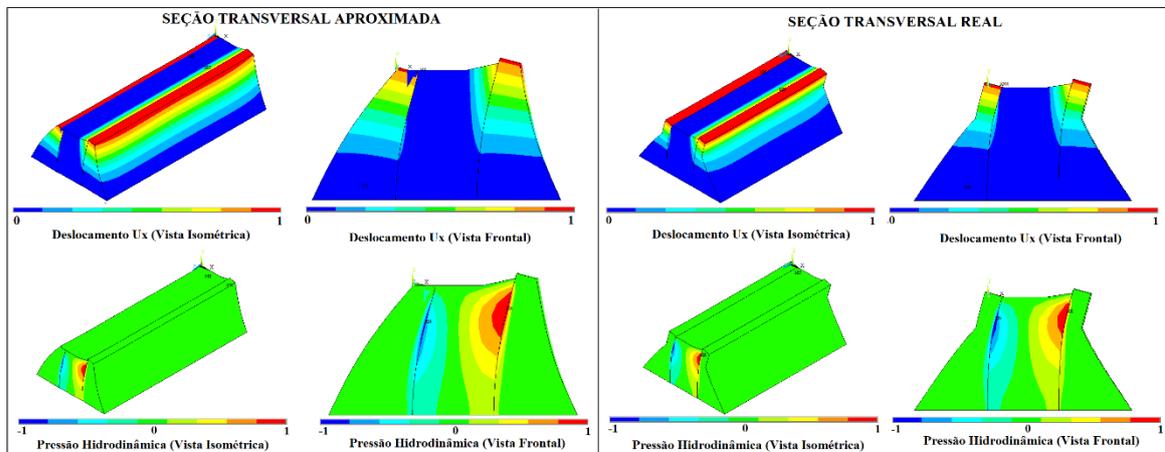
Figura 10.65: Modos de vibração da estrutura e do fluido desacoplado da eclusa de Tucuruí.

Com base na Figura 10.65 é possível notar que tanto a seção transversal aproximada quanto a seção transversal real da eclusa de Tucuruí possuem deformada do primeiro modo semelhante aos casos estudados no capítulo 10.4. O fluido do reservatório da eclusa apresenta a primeira frequência fundamental de ressonância com valor de 7,07Hz. O modo de pressão hidrodinâmico do fluido é associado pela composição entre um modo constante

($m=0$) no sentido longitudinal da condição de contorno fechada-fechada com o primeiro modo acústico transversal ($n=1$) da condição de contorno fechado-aberto que é caracterizado por um modo de onda plana. A Figura 10.66 apresenta os modos de vibração da estrutura e de pressão do fluido de forma tridimensional e no plano bidimensional, tanto para os modos em oposição de fase quanto para os modos em fase para o problema acoplado eclusa-reservatório.



(a) Modo de vibração em oposição de fase (OF) das estruturas acopladas com fluido



(b) Modo de vibração em fase (F) das estruturas acopladas com fluido

Figura 10.66: Modos de vibração da estrutura e de pressão hidrodinâmica do fluido para a eclusa de Tucuruí.

A partir da Figura 10.66 é possível observar que existe uma similaridade entre os efeitos obtidos na eclusa da seção transversal aproximada com a seção transversal real da eclusa de Tucuruí. Nos modos em oposição de fase a sobreposição nos campos de pressão hidrodinâmica é mais notória do que no modo em fase. Portanto, afirma-se que os resultados foram satisfatórios e reproduziram as tendências esperadas.

Além do estudo das pressões hidrodinâmicas impulsivas, foi também estudada as pressões convectivas (*sloshing*) do reservatório da eclusa de Tucuruí. Para isso, tanto no modelo com seção transversal aproximado quanto no modelo da seção transversal real a condição de pressão nula foi alterada para a condição de superfície livre (*sloshing*) no topo da cavidade acústica (superfície do reservatório).

Resultados Associados as Pressões Convectivas (Efeito Sloshing)

Na análise do efeito *sloshing* os parâmetros físicos, mecânicos e geométricos da eclusa de Tucuruí tanto para seção transversal aproximada quanto para seção transversal real foram mantidos os mesmos utilizados no estudo das pressões hidrodinâmicas impulsivas. Então, os resultados numéricos são associados a um problema *sloshing* com as paredes flexíveis (estrutura flexível). A teoria analítica apresentada no capítulo 5.3 assumem as paredes da estrutura totalmente rígidas. Contudo, por se tratar de uma estrutura de eclusa com paredes de concreto que possuem pequena deformabilidade (deslocamentos) em baixas frequências, tal aproximação e estudo comparativo é válido, ou seja, mesmo a eclusa sendo flexível, o efeito *sloshing* é associado a uma vibração em baixa frequência e, neste caso, as paredes da estrutura produzem um efeito de fronteira rígida no fluido.

Assim, foram obtidas as frequências naturais analíticas e numéricas do movimento de superfície livre *sloshing* do fluido, bem como as amplitudes de ondas (deslocamentos verticais). As frequências naturais dos dois primeiros modos (antissimétrico e simétrico) para as duas seções transversais estudadas para Eclusa de Tucuruí são apresentadas na Tabela 10.23.

Tabela 10.23– Frequências naturais analíticas e numéricas (em Hz) das ondas de *sloshing* da eclusa de Tucuruí

| Caso Analisado | Frequência (Hz) Analítica | Frequência (Hz) MEF | Dif. (%) | Ordem do Modo | Modo de Sloshing | Modo da Estrutura |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Seção Transversal Aproximada | 0,154 | 0,157 | 1,95 | 1º Modo | $n=1$ Antissimétrico | Fase |
| Seção Transversal Real | 0,218 | 0,232 | 6,42 | 2º Modo | $n=1$ Simétrico | Oposição de Fase |
| Seção Transversal Aproximada | 0,154 | 0,156 | 1,30 | 1º Modo | $n=1$ Antissimétrico | Fase |
| Seção Transversal Real | 0,218 | 0,229 | 5,05 | 2º Modo | $n=1$ Simétrico | Oposição de Fase |

Com base na Tabela 10.23 é possível notar que os resultados analíticos e numéricos foram próximos, demonstrando uma diferença percentual de valor máximo de 6,42% nos modos

simétricos. O primeiro modo de *sloshing*, geralmente, é o mais importante por produzir as maiores amplitudes de ondas. No estudo comparativo do primeiro modo antissimétrico, os valores analíticos e numéricos apresentaram diferença percentual máxima de 1,95%. O 1º modo antissimétrico e o 1º modo simétrico associados as vibrações de superfície livre *sloshing* são apresentados na Figura 10.67.

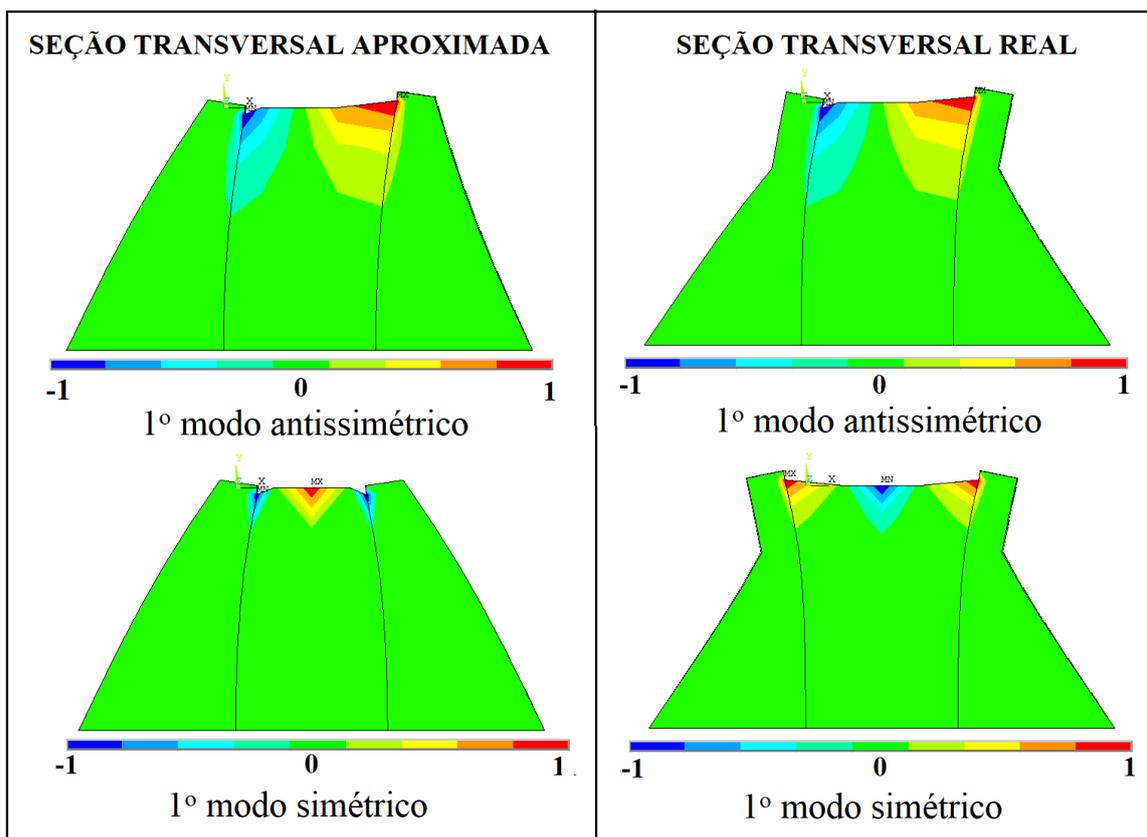


Figura 10.67: Vista frontal dos modo de vibração antissimétrico e simétrico de *sloshing* da Eclusa de Tucuruí com seção transversal aproximada e seção transversal real.

Através da Figura 10.67 é possível observar que o primeiro modo de *sloshing* (primeiro modo antissimétrico) é associado a uma vibração em fase da estrutura. O segundo modo de *sloshing* (primeiro simétrico) é associado a uma vibração em oposição de fase da estrutura. O reservatório em estudo possui relação L_z/L_x (altura do fluido/comprimento) maior que 0,5; sendo classificado o reservatório da eclusa de Tucuruí por águas profundas.

Por fim, afirma-se que o estudo das frequências e modos de vibração tanto da estrutura quanto das pressões hidrodinâmicas (impulsivas e convectivas) são a primeira etapa de uma análise dinâmica, uma vez que a análise em vibrações livres foi feita, pode-se então realizar a análise em vibrações forçadas e determinar o efeito da resposta dinâmica tendo por base o tipo e magnitude do carregamento aplicado.

Para complementar a análise em vibrações livres do efeito de superfície livre *sloshing*, o próximo capítulo (Capítulo 11) apresenta uma abordagem analítica, numérica e experimental das ondas de superfície livre *sloshing* em uma estrutura de tanque retangular. As frequências naturais e modos de vibração de *sloshing* foram investigados.

10.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos estudos comparativos analíticos e numéricos com aplicação em estruturas de barragens e eclusas de concreto de gravidade. O ACPP foi validado e demonstra ter um bom potencial para avaliar analiticamente os modos acoplados fluido-estrutura dominantes de massa adicional. As modelagens foram validadas e os estudos de parâmetros demonstraram os efeitos acoplados fluido-estrutura associados as pressões hidrodinâmicas impulsivas e convectivas (*sloshing*) em aplicações de barragens e eclusas de concreto de gravidade.

O próximo capítulo (Capítulo 11) apresenta uma abordagem analítica, numérica e experimental das ondas de superfície livre *sloshing* em uma estrutura de tanque retangular parcialmente preenchido com fluido. As frequências naturais e modos de vibração de *sloshing* foram investigados.

11. RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

11.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da análise experimental em um tanque retangular de fronteiras rígidas, caso similar ao fenômeno que pode ocorrer em uma câmara de uma eclusa. Na abordagem experimental a estrutura é rígida e o primeiro modo de *sloshing* pode ser avaliado pela TCMV.

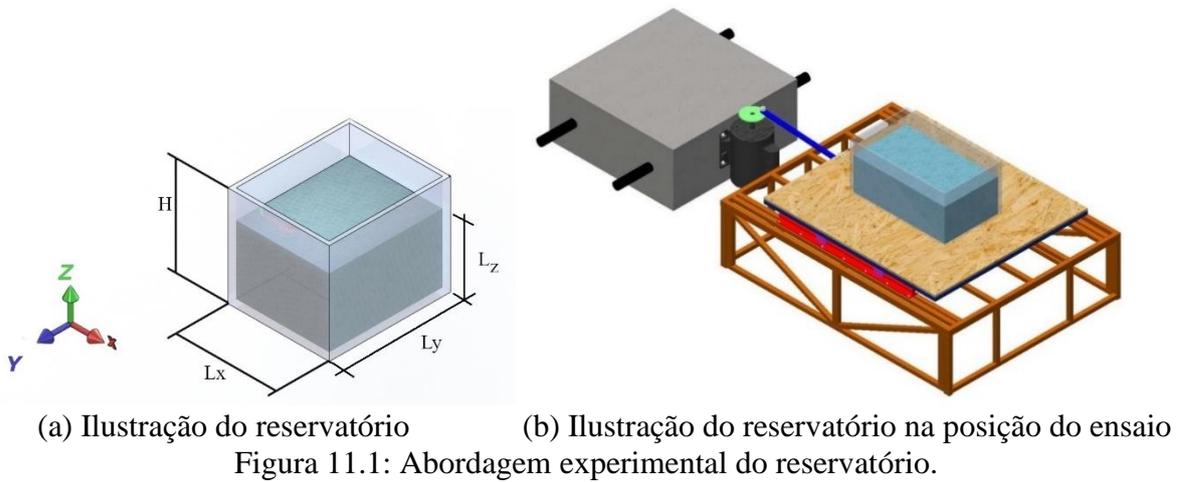
Para o estudo comparativo, foi feita uma modelagem numérica da cavidade acústica de forma tridimensional (3D), assumida com condições de contorno de superfície livre na parte superior do líquido e de fronteira rígida na base e nas quatro paredes laterais. Tal modelo foi feito com intuito de representar a situação física mais próxima do experimental.

Os resultados experimentais das frequências e modos relativos as pressões convectivas (ondas de superfície livre) foram confrontadas com a teoria analítica de *sloshing* e com os valores obtidos nas modelagens numéricas.

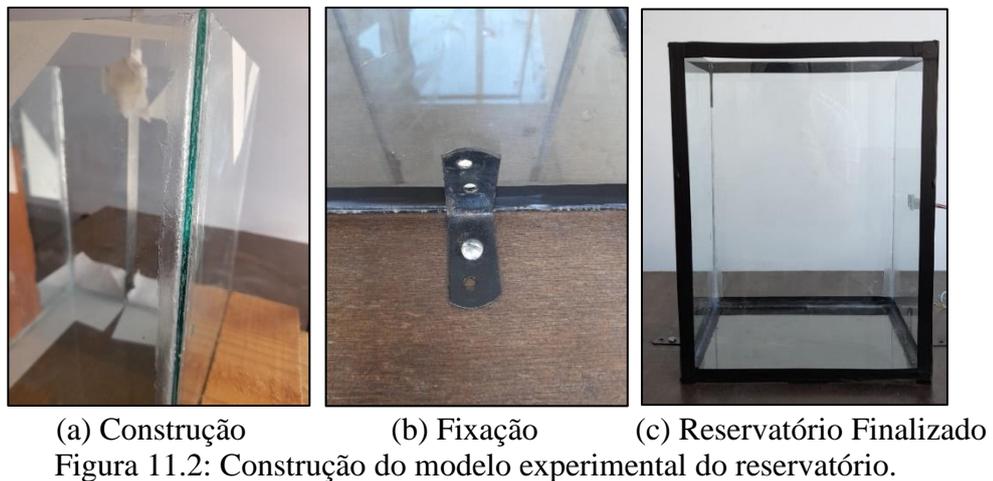
11.2. ESTRUTURA RÍGIDA ACOPLADA COM FLUIDO

11.2.1. Descrição e Parâmetros do Modelo

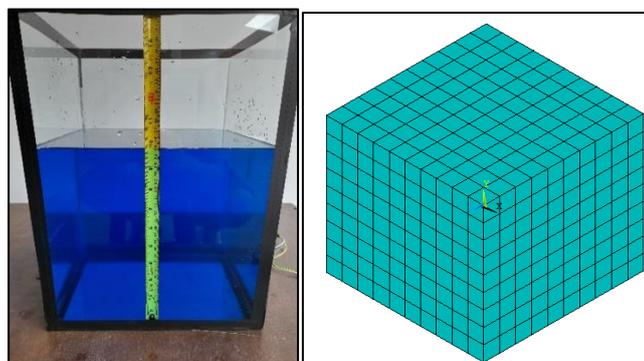
Para as simulações, o reservatório retangular foi feito com dimensões internas de largura (L_y) de 28,6 cm, comprimento longitudinal (L_x) 29 cm e de profundidade de altura (L_z) de fluido de 25 cm. O vidro possui espessura de 6mm e o reservatório tem altura total (H) de 40cm. A massa específica do fluido corresponde a 1000 kg/m^3 (água) e a velocidade de propagação da onda no meio (c) é igual a 1440 m/s. A Figura 11.1 apresenta um escopo da orientação das dimensões assumidas e da posição do reservatório na mesa vibratória de ensaios.



O reservatório do modelo experimental foi construído em vidro (paredes rígidas). A Figura 11.2 apresenta a construção do reservatório e o travamento dele na mesa vibratória.



Com base no reservatório mostrado, foi feito o modelo numérico tridimensional (3D) com paredes rígidas. O líquido teve uma profundidade de $L_z=25\text{cm}$. A Figura 11.3 apresenta o reservatório com o líquido e uma vista isométrica da discretização numérica aplicada ao problema.



Conforme visto na Figura 11.3, o modelo numérico 3D foi discretizado com elemento finito FLUID30. No modelo numérico apresentado na Figura 11.3 (b), as condições de contorno da cavidade acústica foram de superfície livre na parte superior do líquido e fronteira rígida na base e nas quatro paredes laterais. Tal modelo foi feito com intuito de representar a situação física mais próxima do experimental.

Com base no problema experimental descrito e tendo por base o modelo numérico e as soluções analíticas, foram possíveis obter os resultados oriundos da análise dinâmica do problema. Os resultados são apresentados abaixo.

11.2.2. Resultados do efeito de superfície livre *sloshing* (Pressões Convectivas)

De maneira análoga ao procedimento experimental no pórtico apresentados no capítulo 9, foi realizado o estudo no reservatório com fluido através da TCMV. Neste caso, foi aplicada uma mesma excitação harmônica sinusoidal para estabilizar o movimento do reservatório no primeiro modo de *sloshing*. Com o auxílio de um colorímetro de cor azul dissolvido na água, as amplitudes de ondas de superfície livre *sloshing* puderam ser lidas com o auxílio da TCMV. A Figura 11.4 apresenta o local de medição pela TCMV no tanque com 25 cm de água, sendo próximo da lateral da parede na região da superfície livre do fluido.



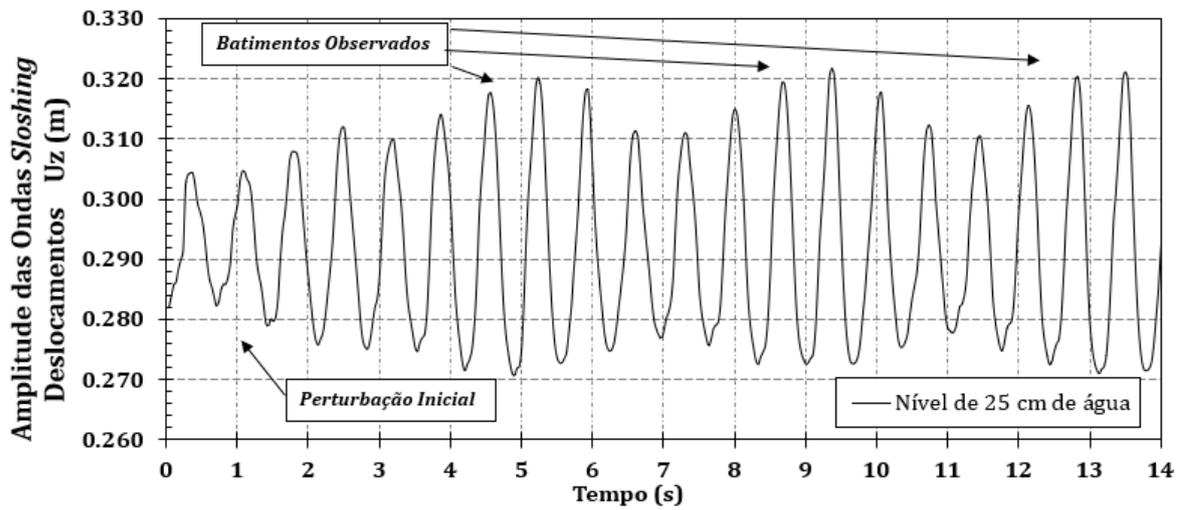
(a) Ponto de Leitura dos Dados

(b) Leitura no CvMob

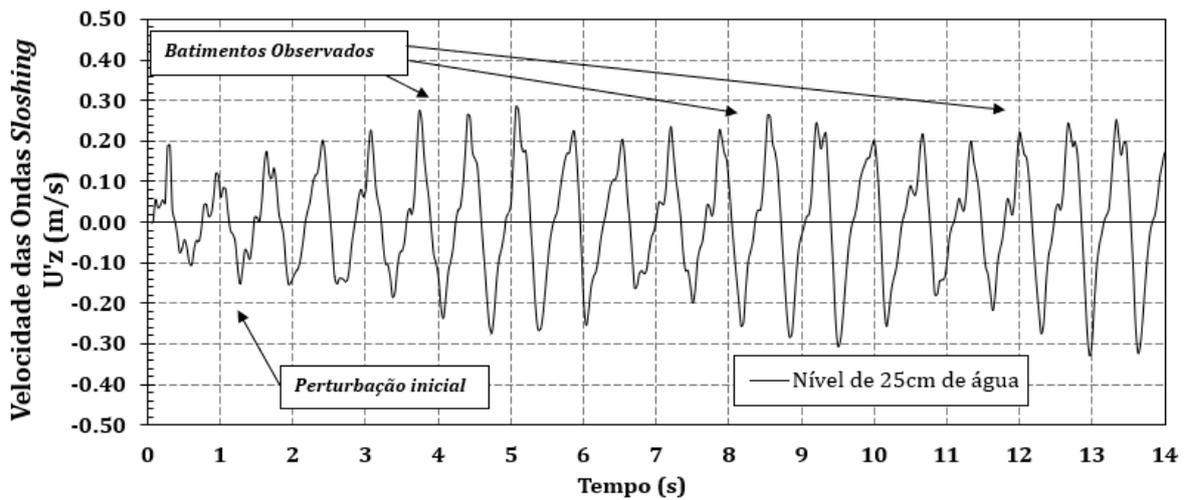
Figura 11.4: Procedimento experimental: (a) Ponto de Análise dos Resultados e (b) Leitura pela TCMV.

Foi obtido na superfície livre do fluido as amplitudes de ondas (deslocamentos verticais), velocidades e as acelerações. Para tal, após o início do ensaio e estabilização dos movimentos, as leituras foram obtidas em um intervalo de tempo de 0 a aproximadamente

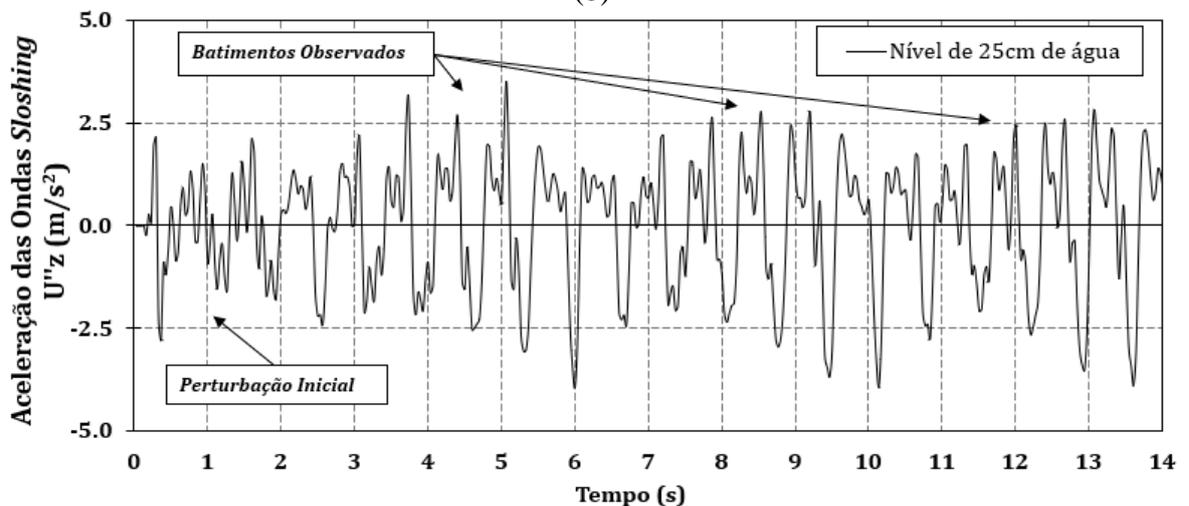
14 segundos, com valores relativos primeiro modo. A Figura 11.5 apresenta as amplitudes das ondas, velocidades e acelerações obtidas para o reservatório estudado.



(a)



(b)



(c)

Figura 11.5: Resultados experimentais das ondas *sloshing* para um intervalo de tempo entre 0 e 14 segundos, sendo: (a) deslocamentos, (b) velocidades e (c) acelerações.

Através dos gráficos de deslocamento, velocidade e aceleração, pode-se observar que a qualidade do sinal é melhor no gráfico dos deslocamentos, onde uma função seno que é oriunda do movimento harmônico foi obtida. Nota-se também que no início da leitura do ensaio (tempo entre 0 e 2 s) uma perturbação inicial imediata foi obtida.

Além disso, ao observar o gráfico do deslocamento, é possível notar que alguns batimentos são evidenciados. A frequência de movimento da mesa foi ajustada no inversor para produzir as maiores amplitudes de deslocamento próximas da ressonância. Isso justifica a presença dos batimentos.

Com o intuito de analisar a frequência de vibração do primeiro modo, com base nesse registro de deslocamentos, foi realizada a FFT para o intervalo de tempo de 0 a 14s. A Figura 11.6 apresenta os resultados obtidos.

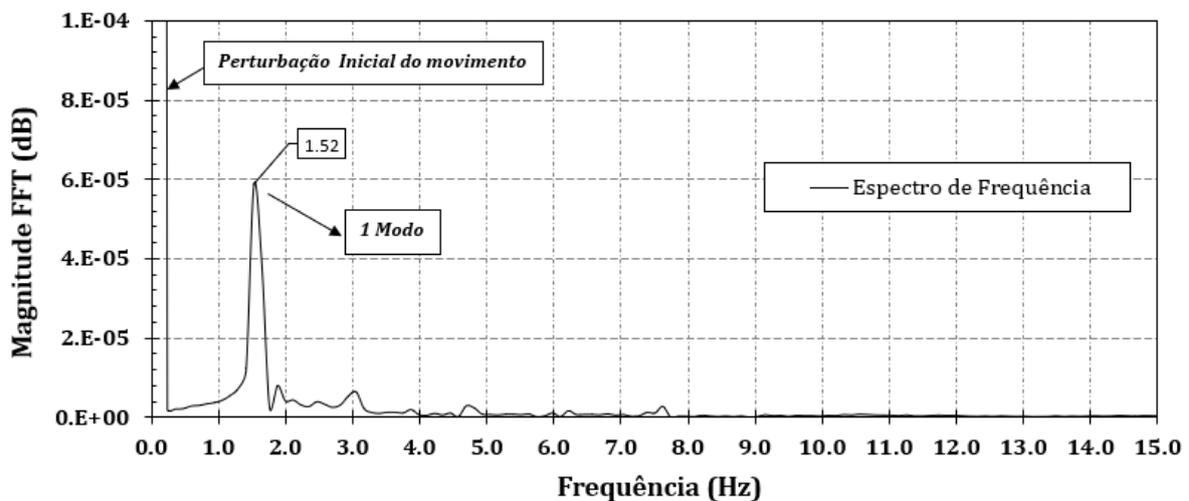


Figura 11.6: Espectro de frequência do *sloshing* para um intervalo de tempo entre 0 e 14s no primeiro modo.

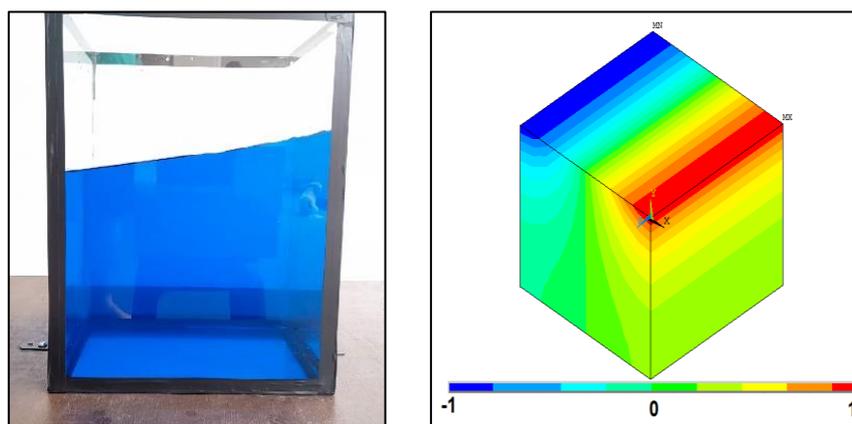
Através da Figura 11.6 é possível observar que o movimento inicial produz um pico no espectro de frequência, o qual pode ser desconsiderado. Além disso, no gráfico foi possível ver que a frequência obtida da FFT de todo o registro de deslocamentos foi de 1,52Hz. Assim, a frequência experimental que foi obtida no espectro de frequência foi comparada com a teoria analítica e com a discretização numérica 3D. A frequência natural do primeiro modo foi comparada e é apresentada na Tabela 11.1. O primeiro modo é um modo antissimétrico.

Tabela 11.1– Frequências analíticas, numéricas e experimentais do 1º modo de *sloshing*.

| Freq. (Hz) Analítica | Freq. (Hz) MEF 3D | Freq. (Hz) Experimental | Dif. (%) [1] | Dif. (%) [2] | Dif.(%) [3] |
|-------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1,64 | 1,62 | 1,52 | 1,22 | 7,32 | 6,17 |

Legenda: [1]: diferença percentual entre Analítica e MEF 3D; [2]: diferença percentual entre Analítica e Experimental e [3]: diferença percentual entre MEF 3D e Experimental.

Com base na Tabela 11.1 é possível notar que os resultados analíticos, numéricos e experimentais foram satisfatórios, demonstrando um bom acordo entre si. Os resultados experimentais tiveram uma diferença percentual de erro maior (máximo valor de 7,32%), mas diante das diversas variáveis físicas envolvidas, considera-se que os efeitos foram condizentes. O modo primeiro modo de *sloshing* longitudinal obtido no modelo numérico 3D foi praticamente o mesmo do experimental. Na Figura 11.7 o 1º modo de vibração experimental e numéricos (vista isométrica) são apresentados. O primeiro modo é classificado como um modo antissimétrico.

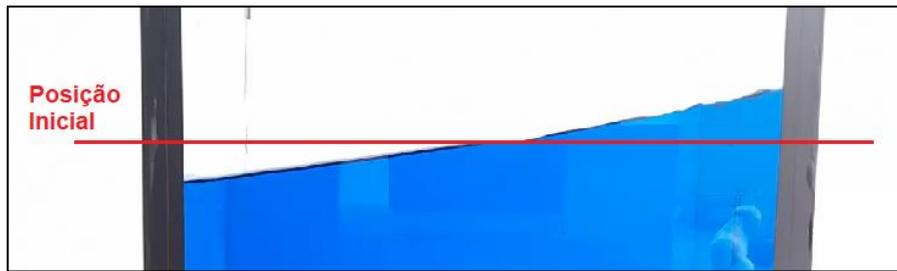


(a) 1º modo experimental

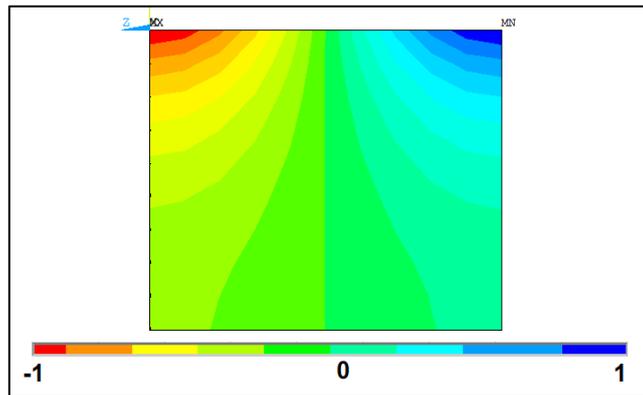
(b) 1º modo numérico 3D (isométrico)

Figura 11.7: Modo de vibração antissimétrico do 1º modo de *sloshing* : (a) análise experimental, (b) modelo numérico 3D e (c) modelo numérico 3D IFE.

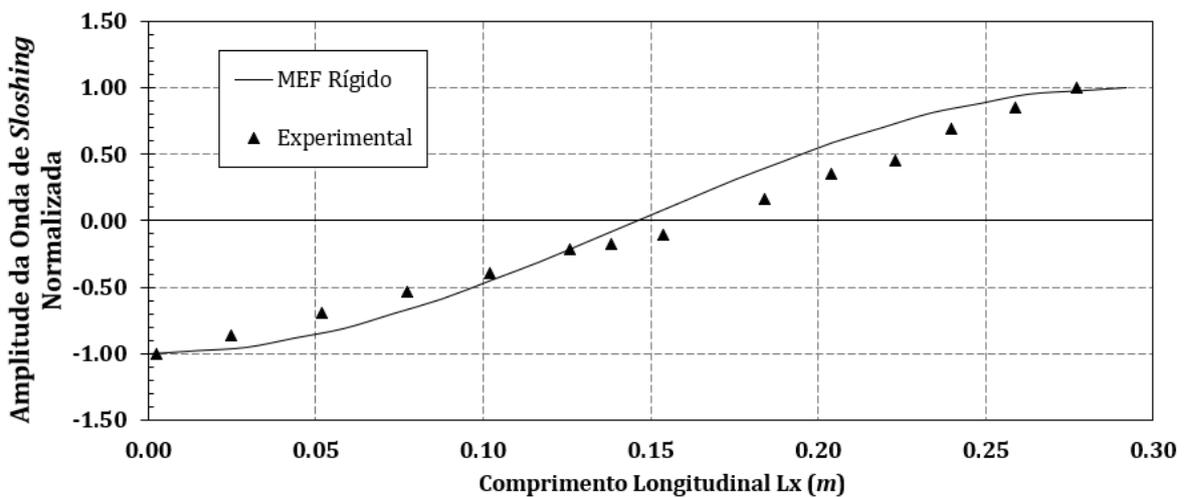
Através da Figura 11.7 é possível observar que o *sloshing* é linear. O reservatório em estudo possui relação Lz/Lx (altura do fluido/comprimento) maior que 0,5, sendo classificado por águas profundas. Com o auxílio da TCMV, alguns pontos na superfície livre foram monitorados. Os resultados da amplitude de onda em diferentes posições foram comparados com a modelagem numérica. A Figura 11.8 apresenta os resultados.



(a) 1º modo de vibração experimental (visualização do efeito)



(b) 1º modo de vibração numérico 3D rígido (vista frontal)



(c) Comparativo numérico e experimental

Figura 11.8: Modo de vibração antissimétrico do 1º modo de *sloshing* : (a) análise experimental e (b) Comparativo entre amplitudes numéricas e experimentais.

Através do gráfico apresentado na Figura 11.8 foi possível notar que os modos de *sloshing* numérico e experimental foram condizentes e tiveram comportamento próximo. Nos pontos de amplitudes obtidos experimentalmente nota-se que na região de vibração do fluido contrário o movimento da gravidade (lado direito do gráfico) ocorre uma maior discrepância e os pontos apresentam na parte inferior da curva do modelo numérico.

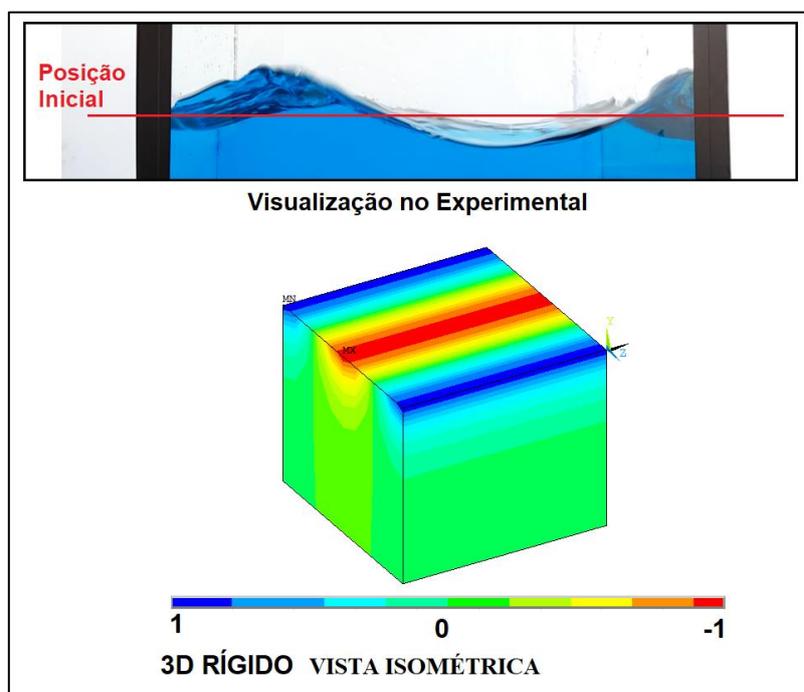
Abordagem para Diferentes Modos de Sloshing

Além do primeiro modo de *sloshing* estudado, a análise foi estendida aos dois próximos modos de vibração de superfície livre *sloshing* do reservatório. A Tabela 11.2 apresenta as três primeiras frequências naturais obtidas para os modos antissimétricos e simétricos longitudinais (Lx). Nesta etapa, a TCMV apresentou limitação em captar movimentos mais rápidos em fluidos, então só são apresentados os efeitos da análise experimental para um comparativo visual do fenômeno nas imagens das deformadas modais de pressão.

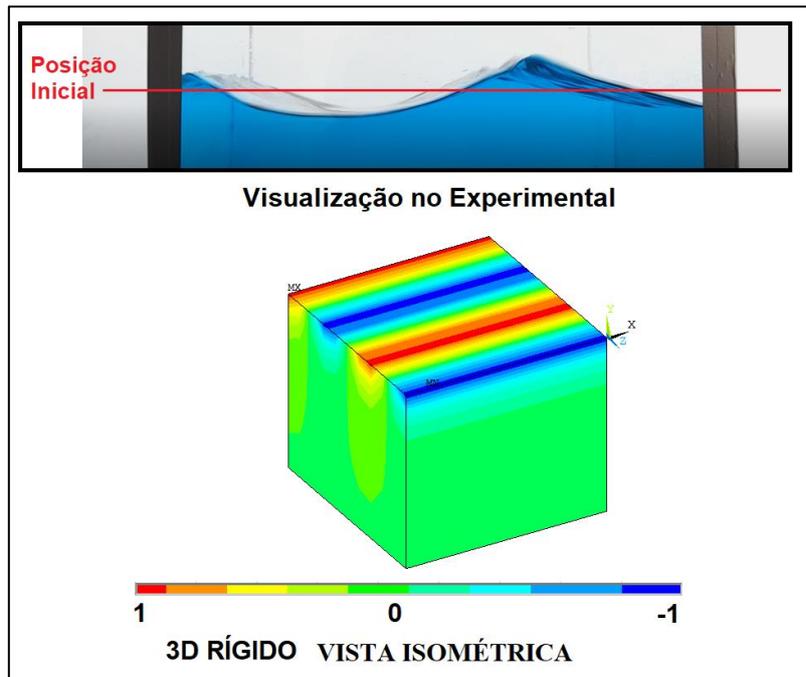
Tabela 11.2– Frequências analíticas e numéricas dos três primeiros de *sloshing* longitudinais (Lx).

| Freq. (Hz) Analítica | Freq. (Hz) MEF 3D | Modo (n) | Dif. (%) |
|-------------------------|----------------------|--------------------|----------|
| 1,64 | 1,62 | n=1 Antissimétrico | 1,22 |
| 2,32 | 2,34 | n=1 Simétrico | 0,862 |
| - | 2,93 | n=2 Antissimétrico | - |

Diante dos resultados encontrados na Tabela 11.2, tendo em vista os baixos erros percentuais, pode-se afirmar que a modelagem foi validada. A Figura 11.9 apresenta o segundo e terceiro modo de *sloshing* contidos na tabela 11.2. O primeiro modo já foi apresentado na Figura 11.8.



(a) 2º modo numérico de *sloshing* (modo simétrico)



(b) 3º modo numérico de *sloshing* (modo anti-simétrico)

Figura 11.9: Segundo e terceiro modo de vibração *sloshing* na direção longitudinal (Lx). Tendo em vista que o primeiro modo de *sloshing* experimental, analítico e numérico tiveram resultados satisfatórios.

11.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos estudos analítico, numérico e experimental associado ao primeiro modo de *sloshing*. Os efeitos observados no ensaio experimental foram condizentes com os previstos. A TCMV possibilitou a análise das ondas de superfície livre, demonstrando um bom potencial.

12. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho abordou os aspectos da interação dinâmica fluido-estrutura com aplicação em estruturas de barragens e eclusas de gravidade em concreto. Nessas estruturas foram estudadas as vibrações desacopladas e acopladas com fluido, caracterizando a problemática proposta da tese como de grande complexidade em função de uma série de fatores envolvidos acerca do comportamento da estrutura e do fluido. Assim, de uma forma geral, o presente trabalho abrange conhecimentos de diversas áreas, tais como: estática e dinâmica de estruturas, mecânica dos fluidos, hidrodinâmica, métodos numéricos (especialmente o MEF), análise experimental de estruturas, entre outras.

Como uma das propostas centrais dessa tese foi de desenvolver um procedimento analítico simplificado para determinar as frequências naturais sob vibrações livres em um sistema barragem-reservatório e eclusa-reservatório, pode-se afirmar que o objetivo foi cumprido. O Artífício do Campo de Pressão Prescrito (ACPP) desenvolvido permite determinar as frequências naturais em estruturas esbeltas ou espessas, com inércia constante ou linearmente variável, desacopladas ou acopladas com fluido no regime incompressível.

Nesse sentido, para demonstrar e reforçar a contribuição do ACPP, logo abaixo são descritas algumas vantagens do método ACPP sobre outros métodos. Assim, quando ele é comparado ao método clássico pseudo-dinâmico de Chopra (1978) e ao método da matriz de transferência modificado (MMTM), verifica-se que:

- No ACPP a estrutura pode ser rígida-móvel ou flexível. Se flexível, além do efeito da deformada modal; que por sua vez é assumido semelhante a uma viga engastada-livre, também é contemplado o efeito da variação de inércia na análise por funções lineares. Isso é uma vantagem em relação ao método pseudo-dinâmico de Chopra (1978), já que este não considera o efeito da variação inercial da estrutura;
- Nas estruturas esbeltas ou espessas, desacopladas ou acopladas com um fluido, as frequências podem ser obtidas pelo ACPP. Por outro lado, no método pseudo-dinâmico, apenas as estruturas espessas podem ter as frequências fundamentais obtidas;
- Na resolução das equações pelo ACPP, o sistema não recai em uma equação transcendental, demonstrando; embora pequena, uma vantagem sobre o método da matriz de transferência modificado;
- As frequências naturais, desacopladas ou acopladas com um fluido, associadas a diferentes modos podem ser obtidas pelo ACPP.

De uma forma geral, os resultados analíticos e numéricos reproduziram as tendências esperadas, fato que permitiu uma comparação e interpretação dos fenômenos observados durante esses estudos nessa gama de problemas. Além disso, com as inúmeras modelagens numéricas foi possível analisar o efeito do acoplamento fluido-estrutura, validar o ACP, bem como avaliar os modos dominantes dos sistemas acoplados no regime incompressível e compressível do fluido.

Acerca da vertente experimental, destaca-se que a proposta deste trabalho foi estudar, experimentalmente, alguns dos fenômenos complexos de interação fluido-estrutura que é o *sloshing*. Para isso, foi construída uma mesa de vibração harmônica, adquirindo seus dados por meio da Técnica de Captura de Movimento por Vídeo (TCMV) e os resultados das análises comparado teorias analíticas e com o MEF. Então, pode-se afirmar que a proposta foi cumprida. Dessa forma, as seguintes conclusões são elencadas a respeito da abordagem experimental.

- Com a utilização do uso da técnica de captura de movimento por vídeo pode-se afirmar que, mesmo sendo uma maneira relativamente atual de se obter experimentalmente a resposta dinâmica em estruturas e fluidos, ela demonstra um grande potencial para uso em pesquisas, em aulas didáticas e afins;
- O uso da TCMV possibilita o estudo em diversas análises experimentais em estruturas e fluidos, uma vez que é um sistema de baixo custo. Além disso, outro aspecto benéfico é a sua simplicidade de operação quando comparado com sistemas de acelerômetros, captadores de pressão piezoelétricos e componentes de aquisição de dados mais complexos, que por sua vez, possuem relativo alto custo e maior nível de complexidade;
- Com a abordagem experimental pela TCMV, os efeitos dos fenômenos de interação fluido-estrutura, sobretudo o *sloshing*, pode ser didaticamente e fisicamente melhor compreendido.

Com base no que foi dito, sabe-se que um projeto de uma barragem é uma tarefa complexa, na qual se não for bem executada pode gerar consequências desastrosas. Assim, mesmo com algumas simplificações realizadas em relação ao fenômeno físico real, a metodologia progressiva empregada neste trabalho amplia a bibliografia, fornecendo mais análises e argumentos importantes sobre a temática em questão.

Por fim, algumas pesquisas futuras que podem surgir a partir deste trabalho podem ser elencadas:

- Expandir a formulação do ACPD para outras condições de contorno na interface fluido-estrutura;
- Incorporar na formulação do ACPD o efeito da compressibilidade do fluido;
- Aplicar a metodologia do ACPD e do MEF no estudo dinâmico de barragens e eclusas brasileiras;
- Proceder a análise forçada (carga sísmica) das barragens e eclusas;
- Abordar experimentalmente com a TCMV outras análises experimentais, como por exemplo, um tanque com paredes flexíveis, fundo inclinado etc.

REFERÊNCIAS

AGRESTA, A.; CAVALAGLI, N.; BISCARINI, C.; UBERTINI, F. Effect of Bottom Geometry on the Natural Sloshing Motion of Water inside Tanks: An Experimental Analysis. *Appl. Sci.* 2021, 11, 605. <https://doi.org/10.3390/app11020605>

ALEGRE, A.; MENDES, P.; CARVALHO, E.; MATSINHE, B.; OLIVEIRA, S.; PROENÇA, J. Use of SSHM data for dynamic behavior analysis and damage detection on large dams. The cases of Cabril dam and Cahora Bassa dam. *Anais Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. Porto, Portugal, 2 de julho de 2021.

ANSYS Multiphysics v.14.5. Ansys Inc.

ARAÚJO, J. V. S. T.; RIBEIRO, P. M. V.. Finite element code for modal analysis on navigation locks considering fluid structure interaction. *Anais XLI Ibero Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE*, Foz do Iguaçu, 6 p., 2020.

ALDEMIR, A.. Prediction Equations for the Fundamental Period and Mode Shape of Roller Compacted Concrete Gravity Dams considering Three Dimensional Geometry Effects. *Journal of Earthquake Engineering*, 2018. DOI: 10.1080/13632469.2018.1532357.

BARBOSA, A. N.. Uma Formulação Potencial Simétrica para o Cálculo Estático e Dinâmico de Problemas de Interação Fluido-Estrutura. 1998. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.DM-008A/98, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998.

BATTAGLIA, L.; CRUCHAGA, M.; STORTI, M.; D'ELIA, J.; AEDO, J. N.; REINOSO, R. Numerical modelling of 3D sloshing experiments in rectangular tanks, *Applied Mathematical Modelling*, p. 1-51, 2018. doi: 10.1016/j.apm.2018.01.033

BLEVINS, R. D.. *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*. First Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, United States, 1979.

BOUAANANI, N. e PERRAULT. C.. Practical Formulas for Frequency Domain Analysis of Earthquake-Induced Dam-Reservoir Interaction. *Journal Of Engineering Mechanics*, Vol 136, No. 1, 2010.

BOUAANANI, N. e MIQUEL. B.. Efficient Modal Dynamic Analysis of Flexible Beam-Fluid Systems. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2014.04.061>.

CALCINA, S. V.; ELTRUDIS, L.; PIRODDI, L.; RANIERI, G.. Ambient vibration tests of an arch Dam with different reservoir water levels: Experimental results and comparison with Finite Element Modelling. *The scientific World Journal*, p. 1-12, v. 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/692709>

CAMPOS JUNIOR, H. S.. Procedimentos progressivos analíticos e numéricos para análise de barragens em arco. 2011. 183 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil). Publicação E.DM-007A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2011.

CHAKRABARTI, P.; CHOPRA, A. K.. Hydrodynamic effects in earthquake response of gravity dams. *Journal of the Structural division*, v. 100, issue 6, 20 p., 1974. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0003801>.

CHEN, D.; YANG, Z.; WANG, M.; XIE, J.. Seismic performance and failure modes of the Jin'anqiao concrete gravity dam based on incremental dynamic analysis, *Engineering Failure Analysis*, V. 100, 2019, p. 227-244. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.018>.

CHEN, J.; WANG, M.; FAN, S.. Experimental investigation of small-scaled model for powerhouse dam section on shaking table. *Structural control and health monitoring*, 13 p. 2012. DOI: 10.1002/stc.1489

CHENG, L.; TONG, F.; LI, Y.; YANG, J.; ZHENG, D.. Comparative Study of the Dynamic Back-Analysis Methods of Concrete Gravity Dams Based on Multivariate Machine Learning Models, *Journal of Earthquake Engineering*, 23 p., 2018. DOI: 10.1080/13632469.2018.1452802

CHIORINO, M. A.; NERI, G.. Model testing of structures in post-war Italy. The activity of ISMES, 1941-1974. Ernst & Sohn Verlag GmbH & Co. KG. 35 p, 2021.

CHOPRA, A. K.. Earthquake resistant design of concrete gravity dams. In: Journal of the Structural Division, ASCE, v. 104, p. 953-971, 1978.

CHOPRA, A. K.. Hydrodynamic pressures on dams during earthquakes. In: Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, v. 93, p. 205-223, 1967.

CHOPRA, A. K. "Earthquake resistant design of concrete gravity dams". In: Journal of the Structural Division, ASCE, v. 104, n. ST6, p. 953-971, jun. 1978.

CHOPRA, A. K.. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 4. ed. Berkeley: University of California at Berkeley, 944 p., 2012.

CHOPRA, A. K.. Earthquake engineering for concrete dams: analysis, design, and evaluation. University of California, Berkeley, 297 p., John Wiley & Sons, 2020. ISBN: 9781119056041.

CHOPRA, A. K.; ASCE, AM.. Earthquake behavior of reservoir-dam systems. Journal of the Engineering Mechanics Division, v. 94, issue 6, 1968. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JMCEA3.0001050>.

CHOPRA, A. K.; CHAKRABARTI, P.. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction. Earthquake engineering & structural dynamics, v. 9, n. 4, p. 363-383, 1981.

CHWANG, A.T.. Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes, Part 2. Exact Theory. In: Journal Fluid Mech., 87(2), p. 343-348, 1978.

CHWANG, A.T.; HOUSNER, G.W.. Hydrodynamic pressures on sloping dams during earthquakes, Part 1. Momentum method. In: Journal Fluid Mech., 87(2), p. 335-341, 1978.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J.. Dynamics of Structures. Third Edition. Berkeley, CA, USA. Computers & Structures, Inc, 2003.

COELHO, N. A.. Métodos analíticos e numéricos para o estudo dos efeitos termomecânicos no concreto massa orientados às barragens de gravidade. 2016. 275 p. Tese (Doutor em

Estruturas e Construção Civil). Publicação E.TD-007A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2016.

CONSTANTIN, L.; DE COURCY, J.; TITURUS, B.; RENDALL, T. C. S.; COOPER, J. E.. Analysis of damping from vertical sloshing in a SDOF system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 p. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107452>

COSTA, W. D.. *Geologia de Barragens*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012.

COWPER, G. R.. The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory. *Journal Appl. Mech.*, 33 p., 335-340, 1966.

CvMob *software*. <https://cvmob.wordpress.com/#:~:text=CvMob%20%7C%20http%3A%2F%2Fwww.cvmob.ufba.br%2F>

DARBRE, G.R.. Phenomenological two-parameter model for dynamic dam-reservoir interaction. In: *Journal of Earthquake Engineering*, v. 2, No. 4, p. 513-524, 1998.

DONLON, W. P.; HALL, J. F.. Shaking table study of concrete gravity dam monoliths. *Earthquake engineering and structural dynamics*, v. 20, p. 769 – 786, 1991. Doi: 0098-8847/91/080769-18

ELETROBRÁS. *Crerios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A.– Eletrobrás/CBDB/ICOLD, 2003.

FENVES, G.; CHOPRA, A. K.. *Earthquake Analysis and Response of Concrete Gravity Dams*, 1st ed. Califórnia: Univ. California, 1984.

FERREIRA, C.. *Tipos de barragens e como evitar rompimentos catastróficos*. Komercialize, 2019. Disponível em: < <https://impermeabilizacao.komercialize.com.br /Post/67/tipos-de-barragens-e-como-evitar-rompimentos-catastroficos>>. Acesso em: 20/01/2022.

FRANÇA JR, D. O.. *Estudo analítico-numérico em vibrações livres fluido-elásticas em cascas cilíndricas para diferentes condições de contorno*. 2018. 128 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil). Publicação E.DM-003A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

FREITAS, M.R.. CFD Modelling for the Study of Structural Stability of Dams and Spillways Subject to Overtopping. 2019. 134 p. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.DM – 10A/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

FTIMA, M. B.; LÉGER, P. (2006). Seismic stability of cracked concrete dams using rigid block models. *Computers & structures*, v. 84, n. 28, p. 1802-1814, 2006.

GAZETAS G.; DAKOULAS P.. Seismic analysis and design of rockfill dams: State of the art, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), p. 27–61, 1992.

GHOBARAH, A.; GHAEMIAN, M.. Experimental study of small scale dam models. *Journal of engineering mechanics*, v. 124, p. 1241 – 1248. 1998.

GIBERT, R. J.. *Vibrations des Structures. Interactions avec les fluides – Source d'excitation aléatoires*. Fifth Edition, Saint-Germain Paris, France, Éditions Eyrolles. gravity dams. A.S.C.E., *J. Struct. Div.*, 100, p. 1211-1224, 1988.

HALL, J. . Study of the Earthquake response of Pine lat am, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 14, No. 2, p. 281–295, 1986.

HALL, J. F.. The dynamic and earthquake behaviour of concrete dams: review of experimental behaviour and observational evidence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 7, n. 2, p. 58-121, 1986.

HALL, J. F.; CHOPRA, A. K.. Hydrodynamic effects in the dynamic response of concrete gravity dams. *Earthquake Eng. Struct. Dynam.*, vol. 10, no. 2, p. 333–345, Mar 1982, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.4290100212>

HAN, Y.; ZHU, X.; LI, T.; GUO, W.; PAN, L.. A semi-analytical study of the three-dimensional liquid sloshing in a horizontal cylindrical tank with an arbitrary liquid depth. *Ocean Engineering*, v. 238, 13 p., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109722>

HUANG, Â.. Desenvolvimento de uma plataforma de simulação sísmica de demonstração para pequenos modelos. 2018. 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2018.

HUANG, J.. Seismic response evaluation of concrete gravity dams subjected to spatially varying earthquake ground motions. v. 72, n° 11, 2011.

KADHIM, M. J.; ALFATLAWI, T. J. M.; HUSSEIN, M. N.. Experimental and Nonlinear Analysis of Cracking in Concrete Arch Dams Due to Seismic Uplift Pressure Variations, International Journal of Engineering, B: Applications Vol. 34, No. 05, p. 1156-1166, 2021.

KAMARROUDI, S. H.; HOSSEINI, M.; HOSSEINI, K.. Influence of earthquake vertical excitations on sloshing-created P- Δ effect in elevated water tanks: Experimental validation, numerical simulation and proposing a modification for Housner model. Engineering Structures, v. 246, 20 p., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112995>

KISHI, N., NOMACHI, S.G., MATSUOKA, K. G., KIDA, T.. Earthquake engineering. Japan society of civil engineering, proceeding of JSCE, No. 386/ I- 8, 4(2), p. 259–326, 1973.

KÜÇÜKARSLAN, S.. “Dam-Reservoir Interaction for Incompressible-Unbounded Fluid Domains Using an Exact Truncation Boundary Condition.” In: 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, July16-18, University of Washington, Seattle, 2003.

LIU, P.L.F.. Hydrodynamic pressures on rigid dams during earthquakes. In: J. Fluid Mech., 165, p. 131-145, 1986.

LØKKE, A.; CHOPRA, A. K.. Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of 3-dimensional semi-unbounded dam water-foundation rock systems, Earthquake Eng. Struct. Dynam., vol. 47, no. 5, pp. 1309–1328, Apr 2018, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.3019>.

LØKKE, A.; CHOPRA, A. K.. Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of concrete dams: Simplification, modeling, and practical application, Earthquake Eng. Struct. Dynam., vol. 48, no. 7, pp. 818–842, June 2019, <https://doi.org/10.1002/eqe.3150>.

LØKKE, A.; CHOPRA, A. K.. Direct finite element method for nonlinear earthquake analysis of 3-dimensional semi-unbounded dam water-foundation rock systems, Earthquake Eng. Struct. Dynam., vol. 47, no. 5, pp. 1309–1328, Apr 2018, <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.3019>.

LOPEZ, A. A. O.. Contribuições à metodologia de projeto de absorvedores líquidos sintonizados (ALS). 2020. 145 p.. Tese (Doutor em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.TD –1A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

LOPEZ, A. A.. Estudo comparativo analítico-numérico de vibrações livres e livres acopladas fluido-estrutura em cascas cilíndricas. 2014. 120 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

MEDEIROS, A. F.; SILVA, A. de A.; ATHAYDE, S. de F. de.. A escola Karitiana: Desafios e perspectivas no contexto de impactos socioambientais das usinas hidrelétricas do Madeira. *South American Journal of Basic Education*, v.8, n° 1, 2021.

MELO, C. A. E.. Estudo do Acoplamento Comporta-Reservatório Sob Ações Sísmicas. 2009. 107 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), E.DM 012A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

MENDES, N. B.. Estudo Comparativo Analítico e Numérico de Aspectos da Interação Fluido Estrutura Aplicados a Barragens em arco. 2013. 318 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

MENDES, N. B.. Um estudo de propagação de ondas e aplicação do sismo na análise dinâmica acoplada a barragem em arco - reservatório - fundação. 2018. 289 f. Tese (Doutor em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

MENDES, N. B.; PEDROSO, L. J.. Estudo de vibrações livres para barragem em arco-reservatório utilizando modelos simplificados. CILAMCE 2017 – XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, 17 p.

MENDES, N. B.; PEDROSO, L. J.; RIBEIRO, P. M. V.. A simplified numerical and analytical study for assessing the seismic response of a gravity concrete lock. Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 14, no. 1, e14104, 2021, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000100004>

MENDES, P. J. H. - Observation and Analysis of the Dynamic Behaviour of Concrete Dams. Tese (Doutor em Engenharia Civil), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Universidade do Porto, 338pp., 2010.

MIR, RIYAZ A.; TAYLOR, C. A. An experimental investigation into earthquake induced failure of medium to low height concrete gravity dams. Earthquake Engineering and structural dynamics, v. 24, p. 373-393, 1995.

MORAIS, M.V.. Modelização Numérica pelo Método dos Elementos Finitos em Problemas de Interação Fluido-Estrutura. 2000. 177 p.. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.DM-008A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília- FT/ENC, DF, 2000.

NAJIB, B.. Étude de l'effet d'un couvert de glacê sur le comportement dynamique des barrages-poids, 2002. 159 p.. Thèse (Doctorat ès sciences appliquées), Spécialité: génie civil, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil, Québec, Canada, 2002.

NA WANG, M. C.; ZHANG, Y.; SHI, S.; JIN, G. and LIU, Z. “Analysis of the Vibro-Acoustic Behavior of a Stiffened Double Panel-Cavity System”. In: Shock and Vibration, 17p. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6369832>.

NING, D. Z., SU, P., ZHANG, C. W.. Experimental study on a sloshing mitigation concept using floating layers of solid foam elements. China Ocean Eng. v. 33, n° 1, p. 34-43, 2019. DOI: 10.1007/s13344-019-0004-x

NIWA, A.; CLOUGH, R. W.. Shading table research on concrete dam models. Earthquake Engineering Research Center. Report n° UCB/EERC-80/05. 126 p.. 1980.

OLIVEIRA, F.F.. Análise de Tensões e Estabilidade Global de Barragens de Gravidade De Concreto. 2002. 169 p.. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil),

Publicação E.DM-015A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2002.

OSÓRIO, A. F.. Identificação modal e simulação da resposta Sísmica de barragens abóbada. 2015. 195 p.. Dissertação (Mestrado. Em Engenharia Civil) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Universidade do Porto, 2015.

OZDEMIR Z.; FAHJAN Y. M. & SOULI M. (2017). “Numerical simulation of liquid sloshing in tanks”. In: Computational Methods in Earthquake Engineering. DOI 10.1007/978-3-319-47798-5_3.

PAPAZAFEIROPOULOS, G.; TSOMPANAKIS, Y.; and PSARROPOULOS. P. N.. Dynamic interaction of concrete dam-reservoir-foundation: analytical and numerical solutions. Journal of Computational methods in Applied Sciences, p. 445-488, 2010.

PEDROSO, L. J. (1998). “Introdução a Dinâmica das Estruturas”. In: Notas de Curso e Apostila Didática, UnB-FT/ENC, Brasília, DF.

PEDROSO, L. J. (1997). “Interação Fluido-Estrutura pelo MEF: Formulação U- ϕ -P”. In: Notas de Curso e Apostila Didática, UnB-FT/ENC, Brasília, DF.

PEDROSO, L. J. (2003). “Interação Fluido-Estrutura”. In: Notas de Curso e Apostila Didática, UnB-FT/ENC, Vs.3, Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (1992). “Método da Matriz de Transferência e suas Aplicações em Problemas Acústicos de Interação Fluido-Estrutura.” In: Notas de Curso e Apostila Didática, UnB-FT/ENC - Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (1994). “Interação Fluido-Estrutura.” In: Notas de Curso e Apostila Didática. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPECC-Universidade de Brasília -FT/ENC Vs. 01 – Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (2000) - Analytical Solutions for the Study of the Acoustic Behaviour of Cavities With Rigid and Flexible Walls - An Approach for Dams-Reservoir Interaction - Part II. Relatório de Estudos de Pós-doutorado, University of Montreal, École Polytechnique, Civil Engineering Department, Structural Division.

PEDROSO, L.J. (2004). Formulações Potências para Abordagens Fluido-Estrutura. In: Notas do Curso de Interação Fluido-Estrutura e Apostila Didática. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPECC- Universidade de Brasília -FT/ENC Vs. 01 – Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (2006). “Dinâmica de Vigas Profundas.” In: Notas de Curso e Apostila Didática de Dinâmica das Estruturas II - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPECC- Universidade de Brasília -FT/ENC Vs. 02 – Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (2017). “Fundamentos Teóricos-Numéricos para a Compreensão do Problema Acoplado Barragem-Reservatório-Fundação com Contornos Absorventes Longínquos, Superfície Livre, e Interação entre os Três Meios pelo Método das Diferenças Finitas” In: Nota Técnica com Ideias e Princípios Básicos. NT-LJP01-08/2017. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPECC- Universidade de Brasília - FT/ENC Vs. 01 – Brasília, DF.

PEDROSO, L.J. (2022). “Manuscritos, Esquemas, Discussões e Notas de Sessões de Orientações, 2019-2022.” In: Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PPECC- Universidade de Brasília, Brasil.

PEREIRA, S. B.. Structural condition assessment of dams based on continuous dynamic monitoring. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 276 pp., 2019.

PEREIRA, S.; MAGALHÃES, F.; GOMES, J. P.; CUNHA, Á.; LEMOS, J. V.. Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir, *Engineering Structures*, v. 174, 2018, p. 548-560. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.076>.

PROULX J. e PAULTRE, P. Experimental and numerical investigation of dam-Reservoir-foundation interaction for a large gravity dam. Department of Civil Engineering, Faculty of Applied Sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada, 1997.

PROULX, J.; PAULTRE, P.. Experimental and numerical investigation of dam-reservoir-foundation interaction for a large gravity dam. *Can. J. Civ. Eng.* v. 24, p. 90-105, 1997.

RIBEIRO, P. M. V.. Soluções Analíticas para Cavidades Acústicas Bidimensionais com Aplicação ao Estudo de Problemas de Interação Dinâmica Barragem-Reservatório. 2010. 360 p.. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.TD-004A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

RIBEIRO, P. M. V.. Uma Metodologia Analítica para a Avaliação do Campo de Tensões em Barragens Gravidade de Concreto Durante Terremotos. 2006. 140 p.. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.DM - 003A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

RIBEIRO, P. M. V.; PEDROSO, L. J.. Dynamic Response of Dam-Reservoir Systems: Review and a Semi-Analytical Proposal. Latin American Journal of Solids and Structures, v. 14, p. 594-612, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253500>

ROȘCA, B.. Physical model method for seismic study of concrete dams. Buletinul institutului politehnic din Iași, Universitatea Tehnică, Tomul LIV, fasc. 3, 20 p., 2008.

SALEH, S.; MADABHUSHI, S. P. G.. Hydrodynamic pressures behind flexible and rigid dams. Dams and Reservoirs, v. 20, nº 2, p. 73-82, 2010. DOI: 10.1680/dare.2010.20.2 .73

SEVIM, B.; ALTUNIŞIK, A. C.. Determination of natural frequencies of arch dams based on reservoir levels using ambiente and forced vibration tests. Civil Engineering Research Journal, v. 3, issue 5, p. 138 – 151, 2018. DOI: 10.19080/CERJ.2018.03.555623

SILVA, S. F. Interação dinâmica barragem-reservatório: modelos analíticos e numéricos. Interação dinâmica barragem-reservatório: modelos analíticos e numéricos. 2007. 220 f. Tese (Doutor em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVEIRA, I. V.. Estudo da influência da crosta local no comportamento sísmico do sistema barragem gravidade-reservatório-fundação. 2018. 148 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SILVEIRA, I. V.; PEDROSO, L. J. (2018). Analysis of natural frequencies and modes of vibration involving interaction dam-reservoir-foundation for concrete gravity dams. In: Third International Dam World Conference, 3., Foz do Iguaçu, 2018.

SILVEIRA, I. V.; PEDROSO, L. J. and VITALI, M. M. (2018). Um estudo de vibrações livres acopladas barragem-reservatório através do método dos elementos finitos. In: CILAMCE 2018 – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Compiègne, France, 20.

SILVEIRA, I. V.; PEDROSO, L. J.; MAROTTA, G. S.. Study of the influence of the foundation and the reservoir on the dynamic response in a concrete gravity dam profile. Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 14, no. 4, e14403, 2021, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400003>.

SOTOUDEH P.; GHAEMIAN M., MOHAMMADNEZHAD, H.. Seismic analysis of reservoir-gravity dam-mass layered foundation system due to vertically propagating earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 116, 2019, p. 174-184. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.041>.

SOUZA JUNIOR, L. C. (2006). Uma Aplicação dos Métodos dos Elementos Finitos e Diferenças Finitas à Interação Fluido-Estrutura. 2006. 197 f.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Publicação E.DM-008A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SOUZA, S. M.. Contribuição para uma Metodologia de Análise Acoplada Fluido-Estrutura em Cavidades Acústicas com Paredes Flexíveis. 2007. 199 p.. Dissertação (Mestre em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2007.

TARINEJAD, R.; AHMADI, M. T.; HARICHANDRAN, R. S.. Full-scale experimental modal analysis of an arch dam: the first experience in Iran. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 61-62, p. 188-196, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.01.020>

THIRUNAVUKKARASU, B.; RAJAGOPAL, T. K. R.. Numerical investigation of sloshing in tank with horizontal baffles under resonant excitation using CFD code. Thin-Walled Structures, v. 161, 26 p., 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107517>

TRENTINI, L., CORRÊA, G.S., FERRER, J.G., BEZERRA, L.M. (2003). Sistema de transposição de desnível de Tucuruí Eclusa 1 – Análise em elementos finitos da cabeça de jusante – Bloco 9. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Tema 3 – Projeto e Construção (2003).

TSAI, C. S.. Semi-analytical Solution for hydrodynamic pressures on dams with arbitrary upstream face considering water compressibility. *Computers & Structures*, v. 42, N.4, pp. 497-502, 1992.

USACE (1995). *Engineering and Design – ARCH DAM DESIGN*. Department of the Army. U. S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-2201. Washington, 1995.

WANG, M.; CHEN, J.; WEI, H.; SONG, B.. Experimental investigation of a small-scaled model for overflow section of a high gravity dam on shaking table. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 11, issue 2, 13 p., 2019. DOI: 10.1177/1687814019829959

WEBER, B. (1994). *Rational Transmitting Boundaries for Time-Domain Analysis of Dam Reservoir Interaction*. In: Report IBK-ETH, Zurich 205, Birkhäuser Verlag, Basel, 1994.

WEI, L.; WEI, P.; YANG, Y.. Static calculation and Analysis of Certain Gravity Dam. *Journal of Physics: Conference series*, v. 1550, p. 1 – 6. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1550/3/032006/meta>.

WESTERGAARD, H. M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. *Trans. ASCE*, v. 95, p., (1933): 418-433.