

CARLOS HIDEAKI MIYAGI

**DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL
PARA ESTUDO DO IMPACTO HIDRODINÂMICO
BIDIMENSIONAL**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

São Paulo

2003

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Cheng Liang Yee cujo entusiasmo, incentivo e orientação permitiram a conclusão deste trabalho.

Aos professores Kazuo Nishimoto e Cláudio Sampaio pelo apoio e intermediação junto à Fapesp.

Aos colegas Celso Hino e Antonio Russo pelo permanente auxílio e apoio.

A João, Carlos e Marlei pelo fundamental apoio e auxílio nas atividades de laboratório e instrumentação.

Aos engenheiros do IPT Kazuo Hirata, in memmoriám, e Issao Miwa pela colaboração no desenvolvimento do aparato experimental e empréstimo de material.

Aos estagiários Antonio LLeyda e Amanda Parlamento pelo auxílio e suporte ao trabalho de pesquisa.

Ao CNPQ pela bolsa concedida que permitiu o desenvolvimento em tempo integral nas fases críticas.

À Fapesp pelo Projeto Temático Processo No. 1997/13090-3, que fomentou a pesquisa.

À minha família, por tudo.

Sumário

1	Introdução	1
1.1.	PROPOSTA	4
1.2.	OBJETIVOS	5
2	Revisão da Literatura	7
2.1	Os MÉTODOS ANALÍTICOS	9
2.2.	Os MÉTODOS NUMÉRICOS	12
2.2	MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	17
3	Desenvolvimento	20
3.1	REFERÊNCIAS A PARTIR DE ENSAIOS PUBLICADOS PARA O APARATO EXPERIMENTAL.....	21
3.2	RESTRICÇÕES DO LABORATÓRIO.....	23
3.3	DESENVOLVIMENTO DO ARRANJO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	24
3.3.1	<i>Desenvolvimento de cada dispositivo</i>	26
3.4	METODOLOGIA DE ENSAIO.....	44
3.4.1	<i>Arranjo de ensaio</i>	45
3.4.2	<i>Testes preliminares</i>	46
3.4.3	<i>Conclusões finais do testes preliminares</i>	50
4	Resultados	52
4.1	VALIDAÇÃO	52
4.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	64
4.3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS DOS MODELOS DE CUNHA	68
4.4	RESULTADOS OBTIDOS.	69
4.4.1	<i>Modelo de Cunha de ângulo de deadrise $\beta=15^\circ$</i>	70
4.4.2	<i>Modelo de Cunha de ângulo de deadrise $\beta=30^\circ$</i>	71

4.4.3	Modelo de Cunha de ângulo de deadrise $\beta = 45^\circ$	72
4.4.4	Modelo de Cunha de ângulo de deadrise $\beta=60^\circ$	73
4.4.5	Modelo de Cilindro.....	74
4.5	ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.	75
5	Conclusões	83
6	Anexos	86
A1.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	86
A1.1	Modelo de Cunha de $\beta=15^\circ$	86
A1.2	Modelo de Cunha de $\beta=30^\circ$	89
A1.3	Modelo de Cunha de $\beta=45^\circ$	91
A1.4	Modelo de Cunha de $\beta=60^\circ$	93
A1.5	Resultados para o modelo de Cilindro	95
6.1	A1. FOTOS DO APARATO EXPERIMENTAL	97
	Referências	102
	Apêndice: Sumário de referências de ensaios experimentais	I

Listas de Figuras

Figura 1.1: Exemplos de Ocorrência de Slamming.	2
Figura 2.1: Métodos de Solução de um problema físico, Maliska (1995) pág. 25	8
Figura 2.2 : Analogia do modelo de Von Kármán com o impacto de uma placa plana.	10
Figura 2.3: Largura da chapa plana equivalente - Wagner (1931)	11
Figura 2.4: Tarefa do Método Numérico	14
Figura 3.1: Arranjo da proposta inicial para o aparato experimental.	25
Figura 3.2: Lançador de modelos montado.....	27
Figura 3.4: Detalhe do dispositivo de gatilho	29
Figura 3.5: Detalhe da haste de fixação do modelo em posição oblíqua permitindo o pivotamento do modelo.....	29
Figura 3.6: Modelo de cunha com painéis laterais.	30
Figura 3.8: Desenho e dimensões dos painéis móveis.....	32
Figura 3.9: Fotos dos painéis móveis.....	33
Figura 3.10: Foto do protótipo de madeira fixado à haste.	34
Figura 3.11: Desenho dos modelos em cunha.	35
Figura 3.12: Foto do modelo em cunha de cunha de $\beta=45^\circ$	35
Figura 3.13: Foto do modelo de cilindro.	36
Figura 3.14: Imagem distorcida de um corpo na superfície livre.	37
Figura 3.15: Esquema do teste para verificar a distorção na imagem.	37
Figura 3.16: Gráfico da função da razão de distorção.	38

Figura 3.17: Caixa de Observação.	40
Figura 3.18: Caixa de Observação instalada.	40
Figura 3.19: Transdutor de pressão utilizado.	42
Figura 3.20: Arranjo do sistema de aquisição de dados.	44
Figura 4.1: Posição dos transdutores de pressão.	53
Figura 4.2: Resultados do teste com modelo de cunha $\beta=45^\circ$, $V_{imp}=1,85$ m/s.	53
Figura 4.3: Comparação dos resultados obtidos (a direita) com os obtidos por Miyamoto & Tanizawa (1984) (a esquerda)	54
Figura 4.4: Posição do sensores (A, B, C, D e E) - Diâmetro do cilindro $D = 300$ mm.	55
Figura 4.5: Resultados de pressão pontual Cilindro - $V_{imp}=1,50$ m/s.	55
Figura 4.6: Resultados de pressão normalizada obtidos por Shibue et. al. (1994).	56
Figura 4.7: Resultados obtidos por Ming & Li (1997).	56
Figura 4.8: Aceleração e Velocidade vertical do cilindro - $V_{imp}=1,50$ m/s.	58
Figura 4.9: Curvas de CS obtidas pelo sinal de aceleração - $V_{imp}=1,50$ m/s.	58
Figura 4.10: Comparativo de CS publicados	59
Figura 4.11: Teste sem placas laterais - $\Delta h=0,22$ m - $V_{imp}=1,88$ m/s	61
Figura 4.12: Teste com placas laterais afastadas de 5 mm - $\Delta h=0,22$ m - $V_{imp}=1,87$ m/s.....	61
Figura 4.13: Teste com placas laterais encostadas - $\Delta h=0,22$ m - $V_{imp}=1,87$ m/s	62
(distância modelo-placa menor que 1 mm).....	62
Figura 4.14: Teste com placas laterais solidárias (600×600 mm ²)	62
$\Delta h=0,22$ m - $V_{imp}=1,86$ m/s.....	62
Figura 4.18: Definição dos ângulos de inclinação α , <i>deadrise</i> β	68

Figura 4.19: Posição dos transdutores de pressão.....	70
Figura 4.20: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,11\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$	70
Figura 4.21: Posição dos transdutores de pressão.....	71
Figura 4.22: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$	71
Figura 4.23: Posição dos transdutores de pressão.....	72
Figura 4.24: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,15\text{m/s}$	72
Figura 4.25: Posição dos transdutores de pressão.....	73
Figura 4.26: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,14$ - $V_{\text{imp}} = 1,69 \text{ m/s}$	73
Figura 4.27: Posição do sensores	74
Figura 4.28: Impacto – Cilindro – $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,49 \text{ m/s}$	74
Figura 4.29: Pressão pontual em função do ângulo β para $V_{\text{imp}} = 1.90 \text{ m/s}$	76
Figura 4.30: Distribuição de pressão $\beta = 15^\circ$ – $V_{\text{imp}}=1,32\text{m/s}$	78
Figura 4.31: Distribuição de pressão $\beta = 30^\circ$ – $V_{\text{imp}}=1,53\text{m/s}$	79
Figura 4.32: Distribuição de pressão $\beta = 45^\circ$ – $V_{\text{imp}}=1,54\text{m/s}$	79
Figura 4.33: Comparativo do pico de pressões em função da velocidade.	81
Figura 4.34: Comparativo do pico de pressões em função da velocidade.	81
Figura 4.35: Coeficiente de <i>Slamming</i> em função da velocidade de impacto.	82
Figura A1.1: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 0,83\text{m/s}$	86
Figura A1.2: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,11\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,32\text{m/s}$	87
Figura A1.3: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,22\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,89\text{m/s}$	87
Figura A1.4: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,33\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,33\text{m/s}$	88
Figura A1.9: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,06\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,03\text{m/s}$	89
Figura A1.10: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$..	89
Figura A1.11: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,22\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,94\text{m/s}$..	90

Figura A1.12: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,34\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,38\text{m/s}$..	90
Figura A1.19: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,15\text{m/s}$..	91
Figura A1.20: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,13\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,54\text{m/s}$..	91
Figura A1.21: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,82\text{m/s}$..	92
Figura A1.22: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,32\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,35\text{m/s}$..	92
Figura A1.31: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,07\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,21\text{m/s}$..	93
Figura A1.32: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,69\text{m/s}$..	93
Figura A1.33: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,94\text{m/s}$..	94
Figura A1.34: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,31\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,46\text{m/s}$..	94
Figura A1.43: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 0,90\text{m/s}$	95
Figura A1.44: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,49\text{m/s}$	95
Figura A1.45: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,82\text{m/s}$	96
Figura A1.46: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,32\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,29\text{m/s}$	96
Figura A2.1: Detalhe do carro deslizante do lançador.....	97
Figura A2.2: Detalhe dos carros rolantes do lançador sobre o pórtico.....	97
Figura A2.3: Protótipo do modelo de cunha entre os painéis: Vista de cima.....	98
Figura A2.4: Modelo de cunha $\beta = 45^\circ$ em posição de lançamento.	98
Figura A2.5: Modelo de cilindro na ocasião do teste com placas solidárias.	99
Figura A2.6: Caixa de Observação	99
Figura A2.7: Caixa de Observação vista por cima.	100
Figura A2.8: Caixa de observação e os painéis móveis.....	100
Figura A2.9: Iluminação de superfície.....	101
Figura A2.10: Teste de filmagem com o protótipo do modelo visto em ângulo obliquo.	101

Listas de Abreviaturas

CFD: Computer Fluid dynamics - Dinamica dos fluidos computacional

B: Dimensão característica dos modelos de impacto (largura)

CS: Coeficiente de Slamming

d_{agua} : distancia entre a janela de observação e o modelo semi-submerso

d_{ar} : distancia entre a lente da camera e a janela de observação

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

F_{imp} : Força de impacto de slamming

F_n : Número de froude

Ma : Massa adicional - Fórmula de von Karman

MDF: Método de diferenças finitas

MEF: Método de elementos finitos

Mo : Massa de um corpo prismático - Fórmula de von Karman

MVF: Método de Volumes finitos

p_{ad} : pressão adimensional

p_{imp} : pressão de *slamming*

p_{max} : pressão máxima de *slamming*

SIMPLE: Semi implicit pressure linked equations

V: Velocidade de impacto

V_{imp} : Velocidade de impacto constante

VOF: Metodo Volume of Fluid

A: ângulo de inclinação vertical da cunha

β : ângulo de deadrise ou elevação da cunha

Δh : altura de queda

ρ : densidade da água

Resumo

O impacto hidrodinâmico é um fenômeno que ocorre na proa de embarcações navegando sobre ondas, no pouso e decolagem de aviões anfíbios e no impacto de ondas em estruturas oceânicas e costeiras como plataformas de petróleo, cais e quebra-mares. Entre as características deste fenômeno, destaca-se a geração de um campo de pressões de elevada magnitude, que pode causar tensões localizadas de grande intensidade nas estruturas marítimas, levando à fadiga do material, à vibrações locais ou transmitidas na viga-navio, ou mesmo a danos estruturais graves.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aparato experimental para estudo do impacto hidrodinâmico bidimensional. O objetivo do aparato experimental é prover dados de resultados experimentais nos estudos de casos de impacto de modelos e imersão total, dando corroboração e subsídio a resultados numéricos.

A pesquisa está dividida em duas fases: a revisão, projeto e desenvolvimento do aparato experimental e a validação dos ensaios. O desenvolvimento do aparato experimental é descrito de forma detalhada da concepção à execução, destacando as funções planejadas para o aparato, os resultados experimentais a serem obtidos, as restrições financeiras, operacionais e de espaço físico no laboratório, os problemas e as soluções originais ou baseadas em referências de pesquisas publicadas.

O procedimento experimental é executado com de modelos de impacto bidimensionais, em formato de cunhas e cilindro, instrumentados com um acelerômetro e transdutores de pressão. Os modelos são lançados contra a superfície livre de um tanque de provas, por um aparelho lançador, com os modelos em cunha podendo ser lançados inclusive simulando um impacto assimétrico, atingindo a

superfície livre em ângulo oblíquo. Um aparato de visualização dos ensaios também foi desenvolvido possibilitando a visualização e registro de imagens.

Quanto aos ensaios, dividem-se em dois casos, o primeiro realizado para validação do aparato, ou seja, comparação direta com resultados de ensaios obtidos pelo presente aparato experimental, com aqueles publicados por outros pesquisadores. Os resultados de pressão pontual são validados para um ensaio de modelos de cunha em impacto simétrico e um cilindro.

No segundo caso, trata-se de uma seqüência inicial de ensaios em impacto simétrico para futuro estudo do impacto hidrodinâmico assimétrico com ferramentas experimental e numérica, visando investigar os efeitos de assimetria das cargas hidrodinâmicas. Os resultados obtidos do ensaio de modelo de cunha em impacto comprovaram as observações de outros pesquisadores e a limitação da fórmula analítica de Wagner. Os ensaios do cilindro indicaram a ocorrência de um segundo pico de pressão que ocorre na imersão do cilindro.

Os resultados dos ensaios mostram que o aparato experimental cumpriu todos os objetivos propostos permitindo o lançamento de diversos modelos de cunha e cilindro, inclusive com o pivotamento dos modelos de cunha, com as velocidades de impacto previstas, aquisitando dados de pressão pontual e velocidade de impacto e permitindo também filmagens da superfície livre nos instantes do impacto.

Abstract

Hydrodynamic impact is a phenomenon that occurs at bow of ships navigating in rough seas, in landing of seaplanes or wave slapping on offshore and coastal structures, such as offshore drilling rigs, wave breakers and piers. The main characteristic of this nonlinear and transient phenomenon is the generation of a high pressure field, which may cause fatigue, vibrations or even direct damage on the marine structures.

This work presents the development of an experimental apparatus for the bidimensional hydrodynamic study. This apparatus aims to provide experimental data for the validation of numerical simulation on hydrodynamic impact and the total immersion process.

The studies are divided in two phases: the revision of existing systems, design and development of the experimental apparatus and the validation of the experimental results. The development of the apparatus is described, from the conception to the execution, with emphasis on its designed functions, experimental results to be acquired, the constraints on the cost, operation and available space, the shortcomings during the development and the original solutions found for them.

The experiments are executed with bidimensional models, with wedge and circular sections, impact force and pressure are measured by using an accelerometer and pressure transducers. An experiment visualization apparatus is also developed allowing video recording and image registers. The experimental procedure is carried out by free fall models, with the wedge models also capable to be launched in an oblique angle in relation to the free surface, simulating an asymmetrical impact.

The experiments are divided in two parts: the first one is experiments carried out to validate results obtained by the apparatus, that means direct comparisons between the results with similar cones published by other researchers. The validation is carried out with wedge shaped and circular models.

The objective of the initial works on the investigation of the effects of asymmetrical hydrodynamic loading. The data measured from the wedge models experiment agree with that obtained by other researchers and demonstrated the limitation of the Wagner analytical formula. The circular model experiments indicated the occurrence of a second pressure peak that occurs after the cylinders immersion.

The experiments results showed that the experimental apparatus reached all the proposed objectives allowing the launching of wedge and circular models and also allowing the wedge models pivotment, achieving the designed impact velocities, acquiring hydrodynamic impact pressure and velocity data and video recording.

1 Introdução

O fenômeno do impacto hidrodinâmico de um corpo sólido, rígido ou elástico, na superfície livre da água é conhecido como *slamming*, sendo caracterizado pela geração de espalhamento de água, também chamado de *spray*, e por um grande aumento na magnitude do campo de pressões local. O *slamming* pode ser observado na proa de embarcações navegando sobre ondas; em estruturas oceânicas, como plataformas de petróleo em mar revolto; na aterrissagem de hidroaviões e espaçonaves; em ondas quebrando em cais, quebra mares e outras estruturas portuárias e no lançamento de *life-boats*, entre outros. A Figura 1.1 apresenta exemplos de ocorrência de *slamming*.

O aumento da intensidade do campo de pressões na água, devido ao impacto hidrodinâmico, causa tensões localizadas de grande intensidade nas estruturas navais, levando à fadiga do material, às vibrações locais ou transmitidas na viga-navio, ou mesmo a danos estruturais graves, já reportados (Yamamoto et. Al. 1984).

O fenômeno de *slamming* tem recebido especial atenção recentemente, tanto na área naval como na engenharia oceânica, devido ao aumento no porte e na velocidade das novas embarcações, pois a intensidade do *slamming* é agravada com o aumento de velocidade, e no avanço da operação de plataformas de petróleo em ambientes mais hostis. A indústria de construção naval tem produzido, nas últimas décadas, um número crescente de embarcações de alto desempenho, principalmente para o transporte de passageiros e veículos. A principal característica observada nestas novas embarcações de alto desempenho é a velocidade, que passou de valores

típicos da ordem de 20 nós para velocidades de até 40 nós. Ao se atingir tais velocidades, as embarcações estão sujeitas a acelerações e cargas dinâmicas até pouco tempo desprezadas para os navios lentos. Tal crescimento da demanda deste tipo de embarcação está exigindo o desenvolvimento de novas técnicas de construção, novos modelos de cálculo, novos materiais e enfim, a pesquisa de novas ferramentas para se atingir o desempenho desejado.



Figura 1.1: Exemplos de Ocorrência de Slamming.

No caso de uma embarcação de alta velocidade, o projeto estrutural deve resolver o dilema de se garantir a integridade estrutural e também proporcionar a leveza exigida pelo desempenho. Um dos meios de se otimizar o projeto estrutural é o uso de ferramentas e modelos que possibilitem uma estimativa precisa dos esforços atuantes na embarcação.

Os princípios básicos do fenômeno de *slamming* já são conhecidos há muito tempo, porém, por ser de natureza não linear, seu estudo analítico, geralmente baseados em hipóteses simplificadoras e métodos de linearização, possui aplicações limitadas e não mostra resultados precisos. O ensaio experimental em tanques de prova era dificultado tanto pelos elevados custos dos ensaios, quanto pelas dificuldades técnicas e também pelo grande tempo despendido para o ensaio. Com o recente desenvolvimento dos métodos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e da capacidade cada vez maior de processamento e armazenamento dos computadores, a abordagem do problema do impacto hidrodinâmico por métodos numéricos, como os de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos, no domínio do tempo tornou-se uma alternativa promissora para o estudo do fenômeno. Métodos numéricos devem, porém mostra-se coerentes e precisos antes de serem aplicados na prática, ou seja, um novo método numérico precisa ser validado através da confrontação de seus resultados com dados reais ou experimentais, estabelecendo assim a precisão e os limites deste método.

1.1. Proposta

A despeito de haver um grande número de pesquisas publicadas sobre o fenômeno de *slamming*, estas realizadas até o presente momento consideravam apenas o impacto simétrico de modelos de cunha e cilindros nos instantes iniciais do impacto quando o ocorre o pico de pressão. A situação de impacto simétrico na realidade é uma situação ideal que raramente ocorre considerando que em manobras ou em ondas multidirecionais de um mar aberto, as embarcações não sofrerão impacto simétrico. Pode-se verificar também que embora modelos de cunha possam caracterizar cascos tipo “V-shape”, típicos de barcos de planeio, o mesmo não se pode dizer de seções de casco de navios sujeitos ao *slamming* como porta-containers rápidos, navios militares ou catamarãs, onde a assimetria de carregamentos entre os cascos causa cargas torcionais no casco e cargas de flexão no *crossdeck*, além de afetarem o movimento das embarcações, prejudicando a manobrabilidade de embarcações de alto desempenho em alto-mar. Portanto é nítida a necessidade de haver uma ferramenta que permita a análise de impacto de formas arbitrárias.

Quanto às pesquisas com modelos de cilindro, que representam elementos estruturais de plataformas *offshore*, têm considerado apenas o impacto inicial desconsiderando os efeitos pós-impacto.

Estes dois pontos podem ser investigados com uma ferramenta numérica, porém necessitam de corroboração de resultados experimentais. Visando fornecer subsídios para o desenvolvimento do método numérico, em particular, o aperfeiçoamento da abordagem proposta por Arai e Cheng (Arai, et al., 1994 e Cheng, 1995), foi proposto a realização de um ensaio experimental no laboratório de

engenharia naval e oceânica da USP, provendo resultados de pressão pontual, velocidade de impacto e visualização do *spray*. O aparato experimental deve possibilitar ensaios de impacto hidrodinâmico (*slamming*) tanto simétrico quanto assimétrico e o processo completo de imersão, onde modelos bidimensionais de cunha e cilindro podem ser ensaiados. As mesmas condições de impacto do ensaio experimental serão simuladas numericamente, permitindo a confrontação direta de ambos os resultados e conseqüentemente, a análise e conclusões tanto qualitativas e quantitativas sobre os resultados e os métodos empregados.

1.2. Objetivos

O objetivo da pesquisa é o desenvolvimento do aparato experimental específico para estudo do *Slamming* em escoamento bidimensional de modelos de cunha e cilindro. Este é a primeira etapa para o estudo de *Slamming* de corpos de geometria arbitrárias, com ferramenta experimental e numérica.

Além dos tradicionais estudos do impacto simétrico de cunhas e cilindro, o aparato deve ser apto a permitir a investigação, em um futuro trabalho, do efeito de assimetria no impacto e também o processo de imersão total.

Para fins de análise e aperfeiçoamento da ferramenta numérica, resultados obtidos por ambos métodos precisam ser comparados entre si e com resultados de experimentos já realizados por outros pesquisadores.

Resumindo, o aparato experimental deve possibilitar os seguintes resultados:

- Levantamento da magnitude do campo de pressões gerado pelo impacto de modelos de cunha e cilindro.
- Ensaio de impacto assimétrico de modelos de cunhas.
- Ensaio de imersão total em modelos de cilindro.
- Visualização e filmagem do impacto.
- Estudo do comportamento do *spray* (onda lateral levantada pelo impacto hidrodinâmico).
- Possibilidade de ensaios com modelos de corpos de geometria arbitrárias.

2 Revisão da Literatura

Muitos dos problemas de engenharia são de natureza física, e para solucioná-los, dispõe-se basicamente de três ferramentas:

- Os Métodos Numéricos;
- Os Métodos Analíticos;
- Os Métodos Experimentais;

Os métodos analíticos e numéricos são métodos teóricos, pois objetivam a solução do modelo matemático que representa o problema físico, ou seja, a resolução das equações, diferenciais nos casos de problemas de hidrodinâmica, que solucionam o modelo matemático. Já os métodos experimentais reproduzem o fenômeno físico real em laboratório, nos chamados experimentos de laboratório ou no próprio protótipo em campo, nos ensaios de campo ou em escala real. A figura 2.1 esquematiza a busca da solução pelos três métodos.

Os métodos analíticos buscam a solução exata das equações diferenciais. Normalmente são aplicadas a problemas de geometria e condições de contorno simples que proporcionam a resolução das equações, porém apresentam a desvantagem de, nos problemas mais complexos, necessitar de muitas hipóteses simplificadoras, que neste caso, apesar de fornecerem uma visão geral do fenômeno, os resultados do modelo matemático simplificado podem desviar-se demasiadamente do fenômeno físico real.

A vantagem dos métodos numéricos é o fato de apresentar bem menos restrições, podendo-se resolver problemas com geometrias e condições de contorno

complexas, além de apresentar soluções com muita rapidez. O problema do grande quantidade de cálculos a serem efetuados pelo método numérico está sendo reduzido pelo rápido avanço na capacidade dos novos computadores, tanto no processamento quanto na memória para armazenamento de dados, o que vem possibilitando também a solução de novos problemas cada vez mais complexos.

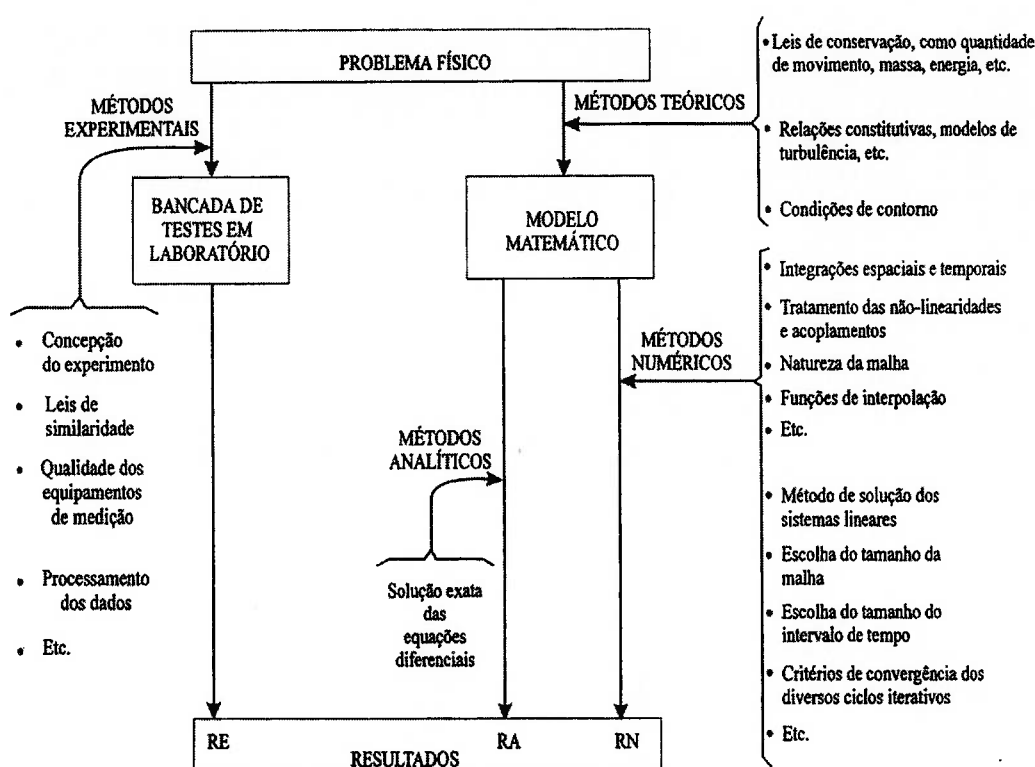


Figura 2.1: Métodos de Solução de um problema físico, Maliska (1995) pág. 25

Com relação aos métodos experimentais, podem ser experimentos de laboratório reproduzindo modelos reais em escala, ou ensaios de campo em protótipos. Sua vantagem é a reprodução da configuração real do problema físico, embora apresentando alto custo, demandando muito tempo e exigindo instalações especiais, até recentemente, métodos experimentais haviam sido a única alternativa

para a solução de diversos problemas devido as dificuldades de estabelecimento de modelos matemáticos simples e também devido aos casos de geometria complexa. Com o recente desenvolvimento e validação dos métodos numéricos, os métodos experimentais tendem a ser utilizados para ensaios de validação e configuração final.

2.1 Os Métodos Analíticos

O impacto hidrodinâmico foi estudado inicialmente por Von Kármán (1929), que estudava a força de impacto hidrodinâmico no pouso de hidroaviões, utilizando um modelo simples de teoria de conservação de quantidade de movimento, em impacto inelástico, utilizando o conceito de massa adicional. Em seu modelo, considerando um corpo prismático, de massa M_0 e velocidade de queda constante V_0 , após o impacto na superfície livre, utilizando a conservação da quantidade de movimento, tem-se:

$$(M_0 + m_a(t)).v(t) = M_0 V_0 \quad (1)$$

onde m_a : massa adicional;

$v(t)$: velocidade do corpo após o impacto, que pode ser definido também por $v(z)$.

A força de impacto é definida diferenciando-se a equação (1):

$$F_{imp}(z) = -\frac{d}{dt} M_0 v(z) = \frac{d}{dt} m_a(z) v(z) \quad (2)$$

Este modelo de Von Kármán desconsidera efeitos de gravidade, flutuabilidade, arrasto e torna necessário investigar a função da massa adicional em função da imersão. Von Kármán aproximou a massa adicional de uma seção do corpo pela massa adicional equivalente de chapa plana na superfície livre. A figura 2.2 ilustra a analogia do modelo de Von Kármán com uma placa plana.

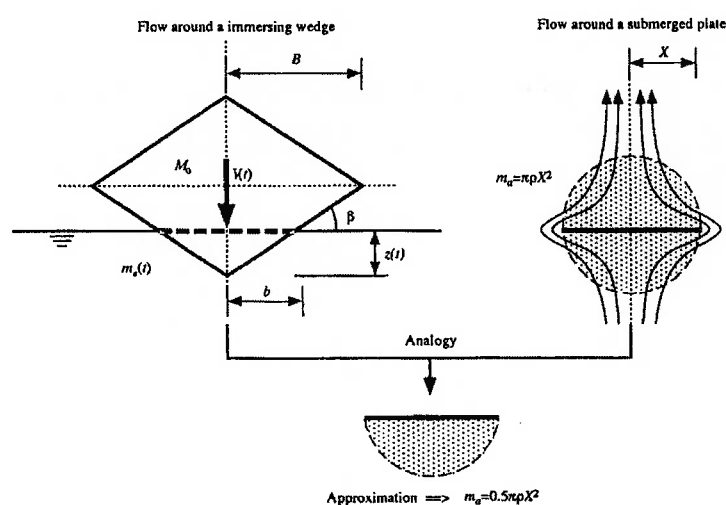


Figura 2.2 : Analogia do modelo de Von Kármán com o impacto de uma placa plana.

Posteriormente, Wagner (1931) aperfeiçoou a aproximação de Von Kármán, que definiu um modelo para o impacto de cunhas onde, na analogia com o escoamento ao redor de uma chapa plana, é considerada a porção de água levantada para definir a largura da “chapa plana” equivalente, conforme ilustrado na figura 2.3. Sua fórmula derivada para cálculo da distribuição de pressões no impacto de cunhas triangulares é apresentada abaixo:

$$\frac{P_{imp}}{0,5\rho v^2} = \frac{\pi}{\beta \sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}}} - \frac{\frac{x^2}{L^2}}{1 - \frac{x^2}{L^2}} + \frac{2z}{V^2} \sqrt{L^2 - x^2} \quad (3)$$

onde L = largura equivalente considerando a porção de água levantada.

p_{imp} = pressão de impacto

β = ângulo de elevação da cunha em relação à horizontal.

$V = V(t)$, velocidade de impacto.

ρ = densidade da água.

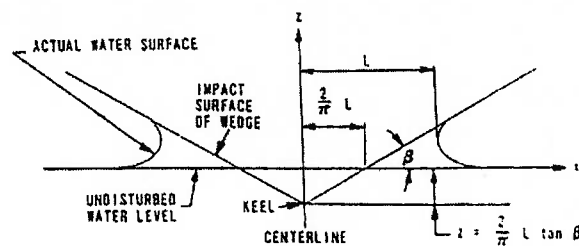


Figura 2.3: Largura da chapa plana equivalente - Wagner (1931)

Assumindo-se que a velocidade de impacto seja constante, ou seja, com aceleração nula ou desprezível, a equação pode ser reescrita:

$$\frac{P_{imp}}{0,5\rho v^2} = \frac{\pi}{\tan \beta \sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}}} - \frac{\frac{x^2}{L^2}}{1 - \frac{x^2}{L^2}} \quad (4)$$

A máxima pressão em um impacto bidimensional de uma seção em cunha triangular é definida por:

$$\frac{P_{max}}{0,5\rho v^2} = 1 + \frac{\pi^2}{4 \tan^2 \beta} \quad (5)$$

onde: V : velocidade de impacto constante.

Esta fórmula (4) permite verificar que:

- Quanto menor o ângulo de elevação, maior a pressão de impacto.
- A pressão é proporcional ao quadrado da velocidade.

Vários pesquisadores trabalharam no aprimoramento do trabalho de Wagner, porém sem considerar efeitos não lineares como geração de *spray* e separação do fluido do corpo. Mais recentemente, Liaw et. al.(1996) verificou o comportamento de bifurcação em um modelo linearizado de cilindro horizontal, Zhao et. al. (1997) generalizou o trabalho de Wagner (1931) aplicando condições de contorno da superfície livre linearizadas cuja solução é uma equação integral de contorno, resolvida numericamente. Xiaoming et al. (1999) desenvolveram o método de Zhao et. al. (1997) para corpos de impacto de forma genérica aplicando técnicas de mapeamento conforme.

2.2. Os Métodos Numéricos

O desenvolvimento e a aplicação dos métodos numéricos, também conhecidos por CFD (*Computer Fluid Dynamics*), tiveram um grande desenvolvimento nos últimos 30 anos, beneficiados pelo desenvolvimento da performance dos computadores, tanto na velocidade de processamento quanto na capacidade de armazenamento de memória. Os primeiros computadores não conseguiam processar a enorme quantidade de cálculos exigida pelos algoritmos dos métodos numéricos limitando muito sua aplicação. Como exemplo, a solução de um problema de escoamento supersônico sobre um fólio hoje requer minutos de CPU enquanto que o computador IBM 704, da década de 60, consumiria cerca de 30 anos

de processamento, Chapman (1979) e Maliska (1995). Na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor os métodos numéricos aplicados a meios contínuos já se desenvolveram em termos de precisão, confiabilidade e praticidade a ponto de hoje se tornarem ferramentas para soluções de engenharia, existindo programas comerciais para aplicações práticas, na área de aeronáutica, por exemplo, o projeto do conjunto asa-turbina do Boeing 737-300 foi totalmente definido por CFD, sem uso de túnel de vento, Rubbert (1988). Já na área naval, os métodos numéricos não se mostram tão eficientes ainda principalmente devido à dificuldade de se modelar a superfície livre, onde há descontinuidade dos meios: a água e o ar.

Os métodos numéricos são principalmente úteis no estudo de fenômenos não lineares e transitórios, onde métodos analíticos dificilmente são aplicáveis, e são vantajosos com relação aos procedimentos experimentais por causa do baixo custo financeiro e na economia de tempo ao possibilitar com relativa rapidez, inúmeras simulações de diferentes situações.

O princípio dos métodos numéricos é a solução das equações diferenciais do modelo matemático através de transformações destas em sistemas de equações algébricas, obtendo a solução para um número discreto de pontos dentro do domínio físico do fenômeno estudado. No fenômeno físico do escoamento, basicamente as derivadas das equações diferenciais, equações de Navier-Stockes (viscoso) ou Euler (invíscito), são substituídos por valores discretos. A figura 2.4 representa essa transformação. A solução assim obtida pelos métodos numéricos é uma aproximação da solução real, geralmente esta aproximação é tanto mais precisa quanto mais discretizado for o domínio físico.

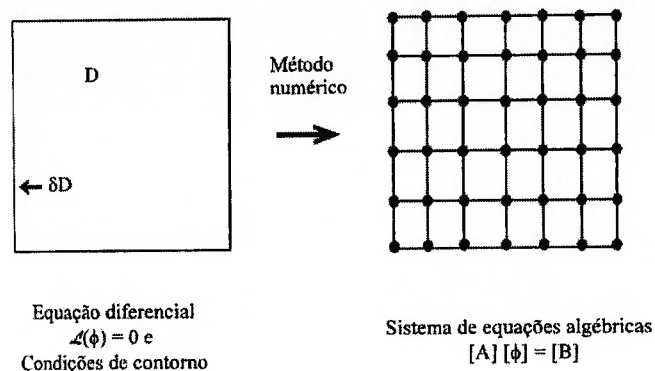


Figura 2.4: Tarefa do Método Numérico

O primeiro passo a ser realizado, portanto, é a discretização do domínio físico, dividindo-o em células elementares. Este procedimento é denominado geração de malha, que pode ser do tipo estruturada ou não estruturada.

Os tipos de métodos numéricos aplicados à malhas são:

- Método de diferenças finitas (MDF)
- Método de volumes finitos (MVF)
- Método de elementos finitos (MEF).
- Método de elementos de contorno.

No método de diferenças finitas (MDF), as derivadas das equações são substituídas por suas equivalentes expansões de Taylor, com a ordem de precisão desejada, nos pontos discretos da malha. As variáveis determinadas em cada ponto são então usadas como dados para os pontos vizinhos em um processo de iteração que atinge todo domínio físico. O MDF pode ser aplicado em malhas estruturadas e não estruturadas.

O método de volumes finitos (MVF) é uma variação do MDF, considerando também a equação da conservação de massa, também diferencial, transformada em equação de diferenças finitas, nas células fechadas quadriláteras, dando mais robustez física ao método, uma vez que em cada célula, ou volume finito, tanto as equações de movimento quanto a conservação de massa são satisfeitas. O MVF é associado a malhas estruturadas.

Já o método de elementos finitos (MEF), é análogo ao método de mesmo nome empregado em análise estrutural, na qual a solução é obtida pela resolução de um sistema linear único para todo o domínio físico. A grande vantagem do MEF é a possibilidade de aplicação de uma malha não estruturada, que é mais versátil a geometrias complexas.

Sendo a solução obtida por métodos numéricos uma aproximação, a precisão desta calculada por métodos numéricos depende de três condições: Consistência, Estabilidade e Convergência. A condição de Consistência define a relação entre as equações diferenciais e as equações discretizadas. A condição Estabilidade estabelece a relação entre a solução computada e a solução exata das equações discretizadas. A condição de Convergência relaciona a solução computada e a solução exata das equações diferenciais.

Embora muitos métodos numéricos empregados em simulações em fluidos monofásicos já possam ser utilizadas como ferramentas de engenharia, em sistemas com superfície livre, não se percebe tal grau de desenvolvimento devido a dificuldade de modelagem da superfície livre. Dentre os métodos de modelagem da superfície livre destacam-se as malhas adaptativas onde a malha acompanha o meio fluido a medida em que a superfície livre deste é deformada; o método SOLA-SURF

de Hirt et al. (1975), onde a superfície livre é uma definida por uma função $H(x,y,t)$ que representa a cota do fluido; o VOF (Volume of Fluid) de Nichols & Hirt (1981), onde uma função escalar F define a razão entre o volume de fluido em uma célula e o volume desta. A superfície livre é definida na posição das células parcialmente preenchidas.

Sendo o seu desenvolvimento recente, e devido ao difícil tratamento da superfície livre, até o presente momento, são poucos os trabalhos publicados de métodos numéricos aplicados à simulação de *Slamming*.

Arai et. al. (1994) e Cheng (1995) descrevem o desenvolvimento e algumas aplicações em cunhas, do método numérico desenvolvido pelos autores baseado na aplicação do método solucionador SOLA, Hirt et. al. (1975), que é um método de diferenças finitas acopladas com a equação da continuidade, e com adaptação do método VOF de Nichols & Hirt (1981) aplicados para coordenadas genéricas. Os resultados obtidos pelos autores são comparados a resultados analíticos com a fórmula de Wagner, apresentado boa concordância. Este método será utilizado para simulação numérica de *Slamming* neste presente estudo. Em outros trabalhos dos mesmos autores, são apresentadas as aplicações do método numérico, em Arai et. al. (1994) para o caso de impacto de *Slamming* em perfis arbitrários de seções típicas de embarcações de alta velocidade, côncavas e convexas, em Arai et. al. (1995) no caso de perfis de estruturas offshore e em Arai & Cheng (1997) na otimização quanto a cargas de *Slamming* no formato de formas de proas de navios.

Em outro estudo, Kamlesh et al. (2000) apresentam os desenvolvimento e estudo de um simulador numérico aplicando o método de volumes finitos com algoritmo SIMPLE (semi implicit pressure linked equations) em malha cartesiana

com encrustamento dos pontos próximos ao corpo. A superfície livre é definida através do método VOF de Hirt & Nichols (1981) com interpolação linear de células vizinhas. Os resultados apresentados são os obtidos pela simulação de seções de cascos catamarã tipo *V-shape*.

2.2 Métodos experimentais

Dada as limitações das formulações analíticas, diversos ensaios experimentais sobre *Slamming* têm sido conduzidos desde a década de 50, com pesquisas visando obter principalmente valores do parâmetro *CS*, coeficiente adimensional da força de impacto, nos primeiros ensaios, e posteriormente, valores de pressão de impacto dinâmico pontuais, comparando os resultados obtidos, principalmente com as formulações teóricas de Von Kármán (1929) e Wagner (1931).

Os trabalhos experimentais realizados seguem principalmente, dois tipos de ensaio de impacto bidimensional: os com modelos de chapas planas: fundo plano e cunha, e os modelos de cilindros, além dos ensaios utilizando seções de proa de embarcações específicas e também as medições em escala real. Os ensaios com modelos de fundo plano e cunha visam simular a proa do casco de navios de forma genérica enquanto os cilindros relacionam-se às treliças e vigas das estruturas offshore.

Os ensaios com modelos de fundo plano investigaram o efeito do *Slamming* associado ao fundo plano de embarcações, com os ensaios de Chuang (1966), Verhagen (1967), Lewison & MacLean (1968) e Miyamoto & Tanizawa (1984) e

(1985) que verificaram o efeito do ar aprisionado, o ar preso entre o modelo e a superfície livre no momento do impacto.

Dentre os ensaios com modelos de cunha, destacam-se o de Chuang (1967), onde diversos modelos bidimensionais rígidos de aço com fundo plano e em cunhas com ângulo de elevação pequeno de 5° a 15° , com dimensões de 508 x 508mm foram ensaiados em queda livre, instrumentados com sensores de pressão, com resultados comparados com a fórmula de Wagner e também foi investigado os efeitos do ar aprisionado, que leva a pressões de impacto inferiores à fórmula de Wagner, observou-se que o ar aprisionado praticamente inexistente para cunhas maiores de 3° . Takemoto (1984a) e (1984b), analisou o impacto de cunhas verificando a lei de escala (número de Froude) do fenômeno.

Os trabalhos experimentais publicados com modelos cilíndricos, podem ser classificados com relação aos objetivos dos ensaios:

A. *Slamming* vertical: Faltisen et Al. (1977), Arhan & Deleuil (1978), Campbell & Weynberg (1980) e Ming & Li (1997). Dentre estes, destaca-se o trabalho de Faltisen et al. (1977) onde estimaram o valor médio de CS experimental igual a 5,3 em escoamento bidimensional, com modelos de diâmetro entre 0,20~0,30m e comprimento de 0,30~0,40m com chapas laterais e com uso de um lançador hidráulico. Campbell & Weynberg (1980) derivaram uma expressão empírica para CS e Ming & Li (1997) introduziram um sistema de filmagem utilizando rastreadores de partículas presentes na água.

B. *Slamming* devido a Ondas: Dalton e Nash (1976), Miller (1978), Isaacson & Prasad (1993) e Chang (1993). Isaacson & Prasad (1993) ensaiaram modelos de diâmetro pequeno (4,2cm) em movimento vertical oscilante penetrando e saindo na água. Chang (1993) fez ensaios com impacto de ondas quebrando incidindo nos modelos fixos instrumentados com transdutores de pressão.

C. Escoamento Oscilante: Sarpkaya (1978).

Houve também ensaios experimentais bidimensionais com modelos de perfis de navios, Hagiwara & Matsumoto (1980) utilizaram a seção de proa de um VLCC para ensaio.

Com relação aos ensaios tridimensionais, Hagiwara & Yuhara (1974) ensaiaram modelos de proa de navio tridimensionais de forma semicilíndrica, Chuang (1973) conduziu testes com modelos tridimensionais em águas calmas e New et Al. (1993) realizaram ensaios com modelos prismáticos de diferentes seções, disparados em velocidade elevada (número de Froude da ordem de 20) contra a superfície livre de um tanque, obtendo valores de CS .

Ensaio de campo em escala real foram conduzidos por Kumakura et al. (1994) em um navio porta-contêiner rápido e Pegg et al. (1991) em uma embarcação SWATH. Nestes ensaios, são feitas medições a bordo de embarcações reais, possibilitando avaliar os efeitos de escala com relação aos resultados obtidos através de modelos reduzidos.

3 Desenvolvimento

O aparato e o procedimento experimental foram desenvolvidos de modo a simular o escoamento bidimensional em torno de um modelo de impacto, nas instalações do Laboratório de Engenharia Naval da EPUSP, no tanque de provas de dimensões 25,00 x 5,40 x 1,70 m.

Este capítulo descreve o desenvolvimento e montagem do aparato experimental, considerando os objetivos do ensaio e as restrições orçamentárias, cronológicas, técnicas e físicas. O objetivo do ensaio experimental é representar impacto hidrodinâmico bidimensional com modelos instrumentados de modo a registrar pressões pontuais na face do modelo de impacto devendo também prover imagens da deformação da superfície livre. O desenvolvimento detalhado do aparato experimental é descrito em Miyagi & Cheng (2002).

Serão ensaiados modelos com dois tipos de formato: em cilindro e em cunha que deverão atingir velocidade de impacto de até $F_n = 1,75$ (3,0 m/s). O impacto com modelos de cilindro já foram ensaiados por vários pesquisadores, o que permite a validação deste ensaio experimental comparando-se os resultados deste ensaio com os obtidos por ensaios anteriores, neste ensaio, porém está previsto o estudo do caso de imersão completa do cilindro, o que foi pouco estudado até o momento. O impacto de modelos de cunha também tem sido ensaiados, em impacto simétrico, porém assim como nas demais publicações, será estudado somente os instantes do impacto.

O aparato visa uma futura segunda fase de ensaios, onde será verificado o impacto hidrodinâmico assimétrico, com os modelos em cunha inclinados de seu

eixo de simetria, representando corpos assimétricos arbitrários. Na realidade, em mares revoltos a ocorrência de Slamming na proa de embarcações praticamente se dá em condições de assimetria. Então, resultados experimentais e numéricos serão confrontados. O aparato de ensaio e este próprio serão projetados e desenvolvidos para poderem ser realizados nas instalações do laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP.

3.1 Referências a partir de ensaios publicados para o aparato experimental

Com vários ensaios experimentais semelhantes aos pretendidos neste estudo já publicados por outros pesquisadores, é possível utilizá-los como referências de desenvolvimento do procedimento experimental, tanto quanto a metodologia como também quanto aos seus resultados para fins de comparação.

Algumas das pesquisas mais relevantes estão citadas a seguir, com um breve resumo de cada uma apresentada no apêndice A1.

- A. Flow Visualization and Pressure Characteristics of a Cylinder for Water Impact, de Ming-Chung Lin e Li-Der Shieh (1997) – Ensaio com cilindros.
- B. Water Impact Loads on Dynamic Response of Horizontal Circular Cylinder in Offshore Structures, de O. Faltinsen; O. Kjoerland; A. Nottvert e T. Vinje (1977) – Ensaio com cilindros
- C. Wave Slamming on Horizontal Circular Cylinder, de Isaacson M. e Prasad S. (1993) – Ensaio com cilindro.

- D. Extreme Wave Action on Large Horizontal Cylinders Located Above Still Water Level, de Soon Chan (1993) – Ensaio com cilindro
- E. Impact Loading and Water Entrance Characteristics of Prismatic Bodies de New, A. P.; Lee, T.S. e Low H.T. (1993) – Ensaio de corpos prismáticos
- F. Experiments on Slamming of Wedge Shaped Bodies de Sheng-Lun Chuang (1967) – Ensaios de cunhas.
- G. Water Impact Test of a Wedge with Rectangular plates and its Analysis de Takemoto, H. (1984) – Ensaios de cunhas.

Destes ensaios, observou-se que devido a simplicidade e menor custo, o uso de um aparelho lançador de gravidade, utilizado em Chuang (1966), Lewinson e MacLean (1968) e Ming & Li (1997) entre outros, é conveniente, em contrapartida a lançadores motorizados, utilizado em Faltisen et al (1977).

Quanto aos modelos de impacto, embora alguns experimentos (Lewinson e MacLean, 1968; Hagiwara e Yuhara, 1974) utilizassem modelos e lançadores muito grandes, Faltisen et al (1977) e Ming e Li (1997) utilizaram modelos de dimensões de 200 a 300 mm, instrumentados com transdutores de pressão. Tais dimensões são suficientes para acomodar os sensores, o que se pode concluir que estas dimensões para os modelos são convenientes, evitando-se a necessidade de um lançador de grandes dimensões, lembrando que este deve ser instalado internamente no tanque do laboratório.

Para registro de imagens, a maioria das referências fez uso de uma câmera filmadora de alta velocidade, da ordem de 2000 (Miyamoto & Tanizawa, 1985) a 8000 quadros/segundo (Verhagen, 1967), embora Faltisen et al (1977) tenham se

utilizado de uma com 50 fps, filmando através de uma janela transparente de observação no tanque. Deve-se, porém ressaltar que Miyamoto & Tanizawa (1985) e Verhagen (1967) visavam fotografar o ar aprisionado no instante do impacto, o que não deve ocorrer neste ensaio.

O tanque ideal seria um tanque estreito com possibilidade de montagem de um painel para tornar o escoamento bidimensional e que possuísse janela de observação. Dado que resultados publicados de pesquisas anteriores apresentam picos de pressão em escala de tempo da ordem de milisegundos, sugere-se o uso de equipamento para aquisição de dados de alta velocidade. Para registro de velocidade, a alternativa mais simples seria o acoplamento de um acelerômetro unidirecional como utilizado por Ming & Li (1997) solidário aos modelos.

3.2 Restrições do Laboratório

O laboratório possui altura de pé direito de 3,14m, possuindo dois tanques:

- um canal para ensaios bidimensionais com 24,00 x 1,00 x 0,90m
- um tanque para ensaios gerais com 21,00 x 4,80 x 1,70 m.

Para o ensaio de *Slamming*, o tanque de prova deve ter dimensões que permitam a condição do ensaio reproduzir condições de água aberta, ou seja, o comprimento do tanque deve ser suficiente para que as paredes laterais deste não interfiram no escoamento. O tanque mais indicado ao ensaio é o tanque bidimensional, que apresenta facilidades como janela de observação, porém fica desqualificado por ser raso. Sua profundidade de 900 mm é insuficiente dada as dimensões dos modelos (300mm), que deverão afundar completamente sob a água.

Definiu-se então que o ensaio se realizará no tanque maior, com o prejuízo deste não possuir janela para observação, tornando-se necessário um dispositivo que possibilite a visualização subaquática. Outra restrição é a altura de pé direito que restringirá a altura máxima do lançamento, e, portanto, a velocidade máxima do impacto nos ensaios. Além disso, têm-se as limitações das dimensões do lançador, que não deve ficar demasiadamente pesado, dificultando a montagem e posicionamento, lembrando que o lançador deve ser uma instalação não permanente posicionada acima do tanque, cuja borda está a 1m de altura do piso.

3.3 Desenvolvimento do arranjo do aparato experimental.

Em um primeiro ciclo de planejamento do ensaio, e baseado nas referências, verificou-se a necessidade dos seguintes itens para o ensaio, juntamente com um primeiro arranjo do aparato experimental.

Tanque de provas: o tanque de ensaio maior do laboratório de dimensões 21,00 x 4,80 x 1,70m

Lançador de queda livre: A ser montado apoiado sobre o tanque, acionado por gravidade, com dispositivo tipo gatilho para disparo do modelo. Devendo ter dois trilhos verticais retificados por onde deslizaria um carro, onde o modelo será acoplado, com rolamentos lineares.

Modelos: De dimensão característica (diâmetro ou largura) igual a 300mm, devendo possibilitar instalação e remoção dos transdutores de pressão e deve ser reclinável, no caso de modelos de cunha, para o ensaio de impacto oblíquo.

Sensores: Transdutores de pressão para registro de pressões pontuais na face dos modelos e um acelerômetro unidirecional para possibilitar o cálculo da velocidade.

Filmadora com caixa estanque: Prevê-se o uso de filmadora digital convencional, devido a facilidade para edição digital em computador, condicionada em uma caixa estanque, permitindo a filmagem subaquática.

A configuração inicial da proposta do aparato de ensaio é ilustrada na figura 3.1.

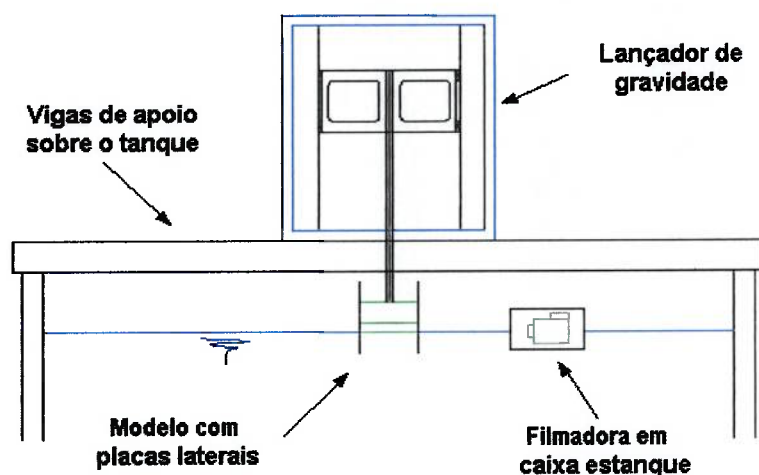


Figura 3.1: Arranjo da proposta inicial para o aparato experimental.

3.3.1 Desenvolvimento de cada dispositivo

Lançador

Inicialmente foi concebido como uma estrutura de perfis de aço soldados. A estrutura oferece suporte a dois trilhos verticais retificados por onde deslizaria um carro com rolamentos lineares. Solidário ao carro, há uma haste rígida de aço temperado em que cada modelo seria conectado.

O curso do carro (ou o curso de queda) deve ser suficiente para permitir que a velocidade final de queda que atendesse aos requisitos de se atingir a velocidade de impacto de 3,0 m/s (número de Froude em torno de 1,75, considerando os modelos de simensão característica de $B=0,30\text{m}$), o que requer um curso mínimo de 0,46m. Considerando a imersão total dos modelos, o lançador deve ter um curso de queda de pelo menos 1,00m, o que resultaria em um lançador de altura elevada, que poderia atingir o teto do laboratório.

Como solução, a posição do lançador passou a ser suspensa, por um guindaste tipo pórtico, já existente, que se pode deslocar livremente sobre o tanque de provas, e a adoção de uma haste vertical de posição ajustável em relação ao carro para regulagem da altura e conseqüentemente, a velocidade de impacto do modelo com a superfície livre. Cada modelo é conectado a esta haste do carro, por meio de uma segunda haste-encaixe removível, que também permite dar a inclinação aos modelos de cunha, nos ensaios de impacto oblíquo. Desta forma, com um braço da haste mais longo, é possível atingir velocidades mais baixas garantindo a imersão dos modelos e com braço de haste mais curto, atingir velocidades mais altas e com a

imersão do modelo garantida pelo curso do carro deslizante. Como dispositivo de disparo, optou-se por um gatilho mecânico, tipo catraca, acionado por uma alavanca.

Esta configuração trouxe as seguintes vantagens: flexibilidade no posicionamento sobre o tanque e maior facilidade na montagem, desmontagem e fixação, além do ganho de altura livre de queda.

A figura 3.2 ilustra uma foto do lançador montado no pórtico sobre o tanque. O lançador construído é apresentado na Figura 3.3, com suas respectivas dimensões, e as Figuras 3.4 e 3.5 mostram detalhes do dispositivo de gatilho e da haste de fixação do modelo.

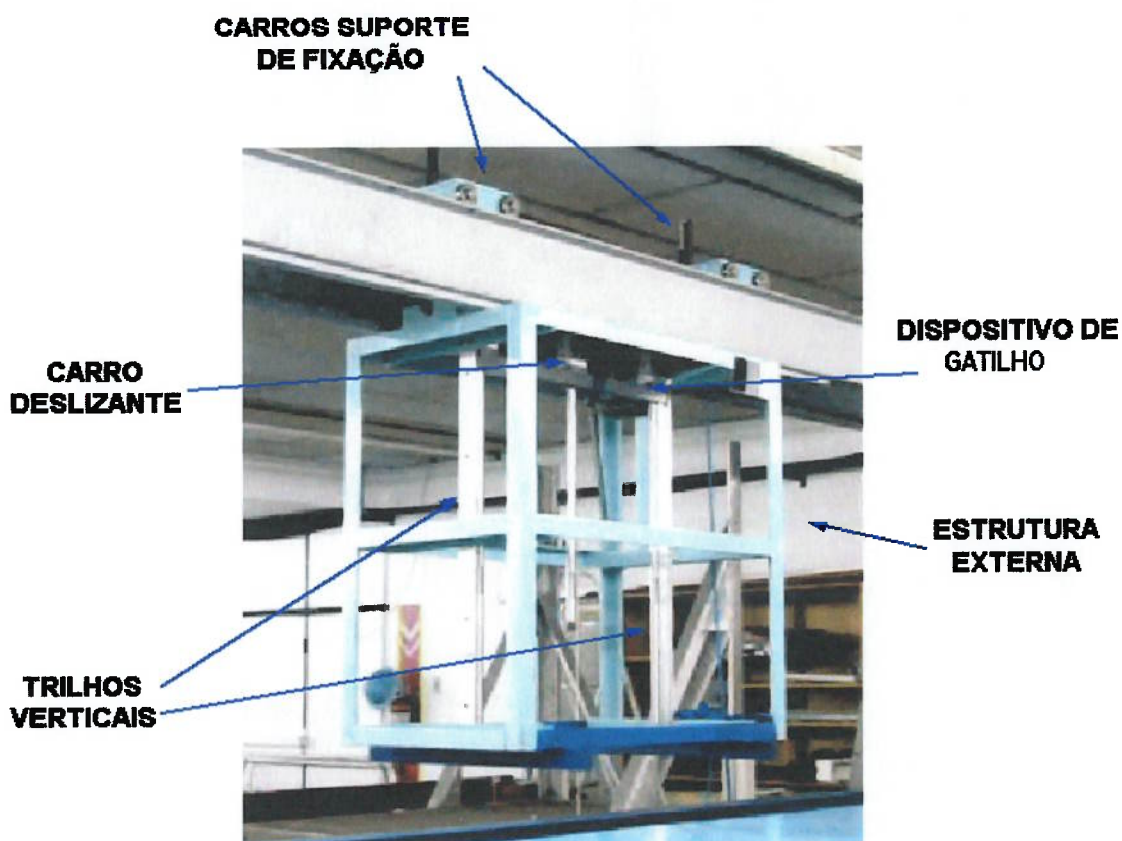


Figura 3.2: Lançador de modelos montado.

Chassis e Carro Deslizante

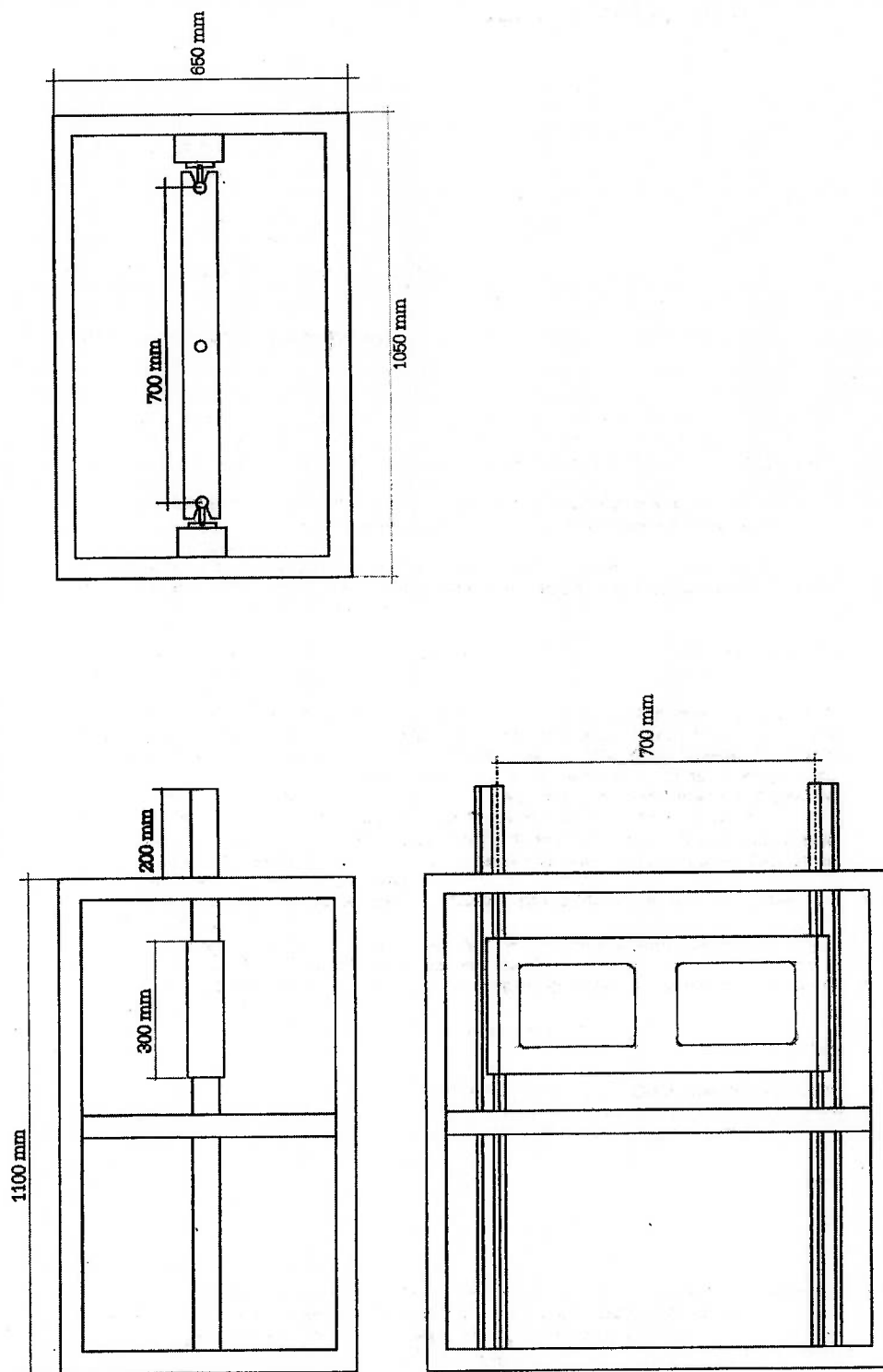


Figura 3.3: Desenho e dimensões do lançador.



Figura 3.4: Detalhe do dispositivo de gatilho

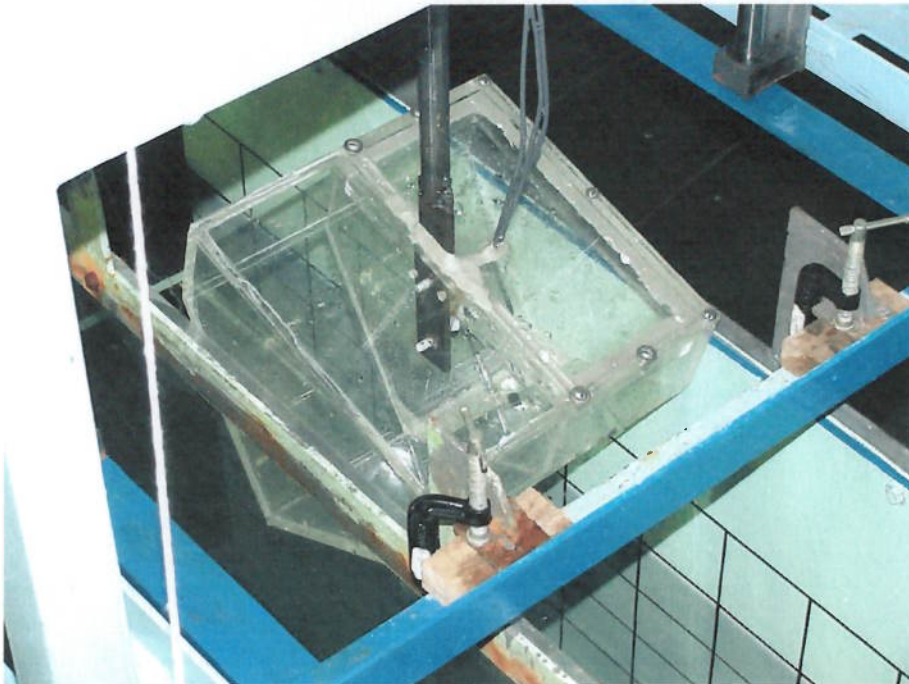


Figura 3.5: Detalhe da haste de fixação do modelo em posição oblíqua permitindo o pivotamento do modelo.

Painéis

Com a não disposição de se construir painéis fixos submersos no tanque, a primeira sugestão, baseada na simplicidade, era a instalação de placas verticais solidárias aos modelos, nas extremidades laterais destes, como os utilizados nos ensaios de Faltisen et al. (1977) e Shibue et al. (1994). Tais placas impediriam que o fluido escoasse na direção axial do modelo, criando o efeito de bidimensionalidade. Cada modelo então possuiria as placas solidárias, conforme ilustrado na Figura 3.6.

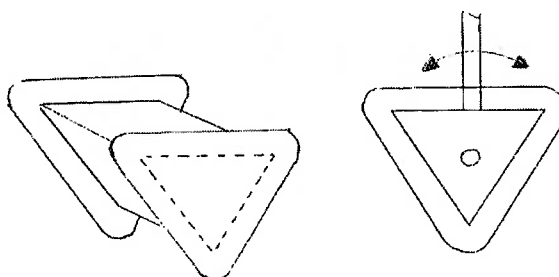


Figura 3.6: Modelo de cunha com painéis laterais.

Este procedimento exige alta precisão tanto na acoplagem do modelo como também na verticalidade da direção do escoamento no modelo, levando a resultados não confiáveis quando esses requisitos não são satisfeitos. Este detalhe levou a recomendação, pelos técnicos do IPT, de usar painéis que não sejam fixos ao modelo.

Dado os custos materiais de se montar painéis fixos totalmente submersos e a necessidade de se esvaziar completamente o tanque do laboratório, recorreu-se ao uso de painéis removíveis que são afixados durante a realização do ensaio.

Os painéis devem ter dimensões suficientes para cobrir toda a área de influência do impacto, com relação ao campo de pressões. Do resultado numérico de Cheng (1995), ilustrado na figura 3.7, pode-se verificar que a região de alteração do campo de pressões é da ordem de quatro vezes a largura do corpo de impacto. O número de Froude do caso calculado é igual a 1,36. Lembrando que a lei de escala seguida é a igualdade do número de Froude, e que os modelos usados no ensaio possuem dimensão característica de 0,30m, isso corresponde à velocidade de impacto de 2,33m/s, valor próximo à velocidade máxima de 3,00m/s pretendida neste ensaio. Sendo assim, a estimativa da largura dos painéis é de pelo menos 1,20m.

Como resultado tem-se um o painel frontal de vidro com quadro de alumínio, que permite a visualização do impacto e da deformação da superfície livre. O painel traseiro é de compensado naval reforçado com quadro de aço, pintado de verde claro, que segundo recomendação do IPT, permite a melhor nitidez em fotografias, este painel é ainda traçado com grade quadriculada de 10 x 10 cm, para referência visual na filmagem do *spray* gerado no impacto. Ambos painéis, com dimensões de 1,235 x 1,485 m, são encaixados no lançador por meio de cabides, ficando suspensos por estes, e são imobilizados por meio de cabos tirantes presos em suas bases. A Figura 3.8 apresenta o desenho e dimensões dos painéis e a figura 3.9, fotos dos painéis construídos.

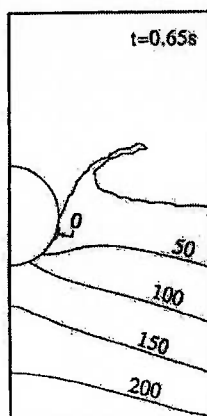


Figura 3.7: Resultado da simulação numérica mostrando a alteração no campo de pressões ao redor do corpo, Cheng (1995).

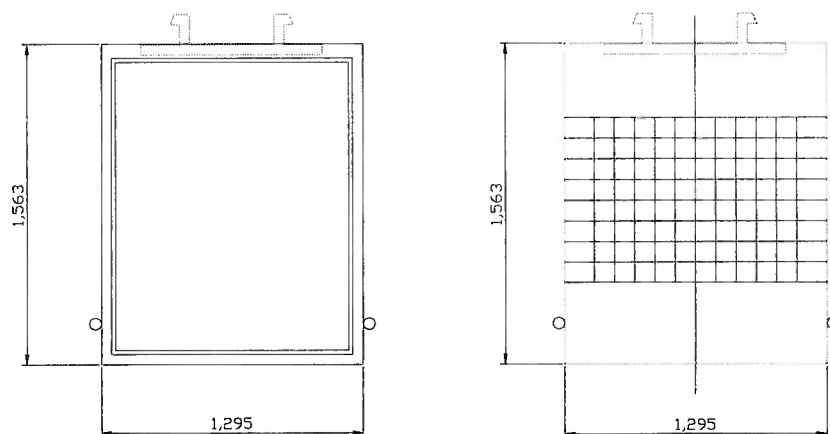
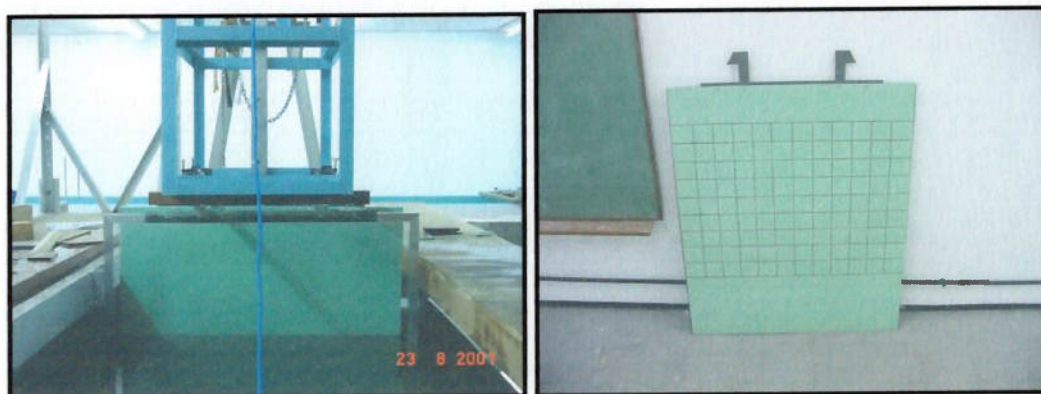


Figura 3.8: Desenho e dimensões dos painéis móveis.



(a) posição instalada

(b) grade demarcada

Figura 3.9: Fotos dos painéis móveis.

Modelos

Os modelos devem ser grandes o suficiente para acomodar os sensores. No caso dos modelos de cunha, devem ser inclináveis para permitir o estudo do impacto oblíquo e o cilindro deve ser totalmente submersível. Ambos tipos devem ter tampa removível para tornar possível a troca dos sensores. Com o objetivo de se realizar testes, verificar a viabilidade de construção e descobrir eventuais problemas, foi construído um protótipo de um modelo de cunha de 45° em madeira, com ângulo de inclinação variável e tampa removível, ilustrado na figura 3.10.

Conforme mencionado no item anterior, a dimensão característica (largura ou diâmetro) dos modelos foi definida com base na lei de escala de Froude, considerando a velocidade máxima permitida pelo aparato.

Decidiu-se confeccionar os modelos de cunha em acrílico transparente, dado o custo relativamente baixo, comparado a placas de aço soldado além de serem de rápida construção. A madeira, por ser hidrófila e ter tendência a empenar, não é

adequada. Por outro lado, modelos de fibra de vidro são mais complexos pela necessidade de se construir moldes macho e fêmea.

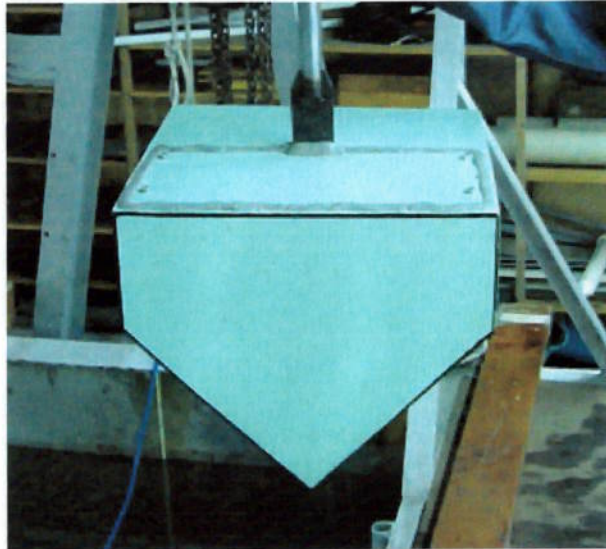


Figura 3.10: Foto do protótipo de madeira fixado à haste.

Já o modelo de cilindro, é confeccionado em PVC, utilizando-se um tubo comercial, sendo também instrumentado com transdutores de pressão. Os desenhos e medidas são ilustrados na Figura 3.11.

Os modelos confeccionados apresentam os seguintes dados de massa:

- Cunha de 15°: 3,77 kg
- Cunha de 30°: 4,05 kg
- Cunha de 45°: 4,80 kg
- Cunha de 60°: 5,80 kg
- Cilindro: 5,34 kg

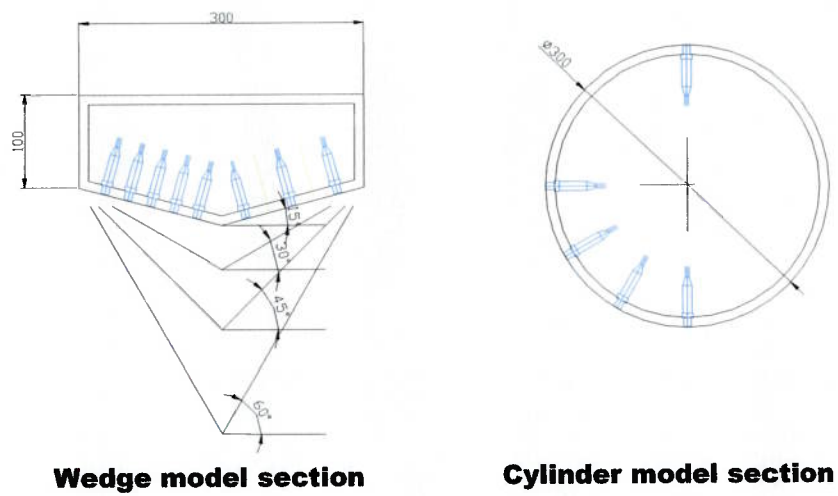


Figura 3.11: Desenho dos modelos em cunha.

As figuras 3.12 e 3.13 ilustram os modelos de cunha de $\beta=45^\circ$ e cilindro respectivamente, instrumentados com os transdutores de pressão.

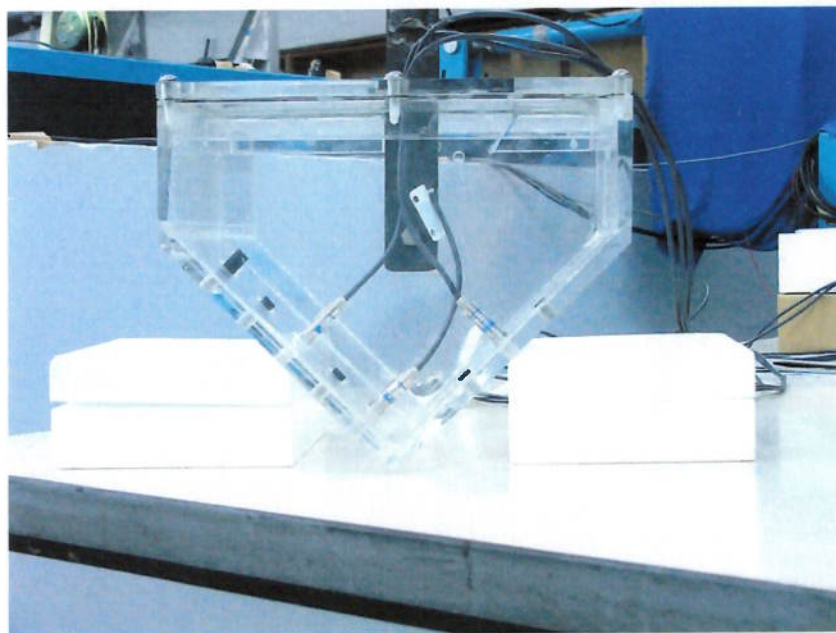


Figura 3.12: Foto do modelo em cunha de cunha de $\beta=45^\circ$.



Figura 3.13: Foto do modelo de cilindro.

Janela de Observação - Caixa de Observação

A janela de observação é necessária para a filmagem da deformação da superfície livre. Sendo o ensaio bidimensional, a melhor observação do ensaio seria com o modelo descendo rente a esta janela. Dado o fato do tanque maior do laboratório não possuir janela de observação, torna-se necessário a instalação de um equipamento que permita a filmagem subaquática. A opção mais simples é o uso de uma caixa estanque para acomodar uma filmadora. Como medida de se testar a eficiência desta alternativa, realizou-se um teste onde uma filmadora foi colocada dentro de uma pequena caixa de acrílico transparente. Constatou-se então que o efeito da distorção da imagem devido aos índices de refração diferentes da água e do ar deformava o objeto semi-submerso nos meios água-ar de uma forma significativa, conforme pode ser observado na Figura 3.14.

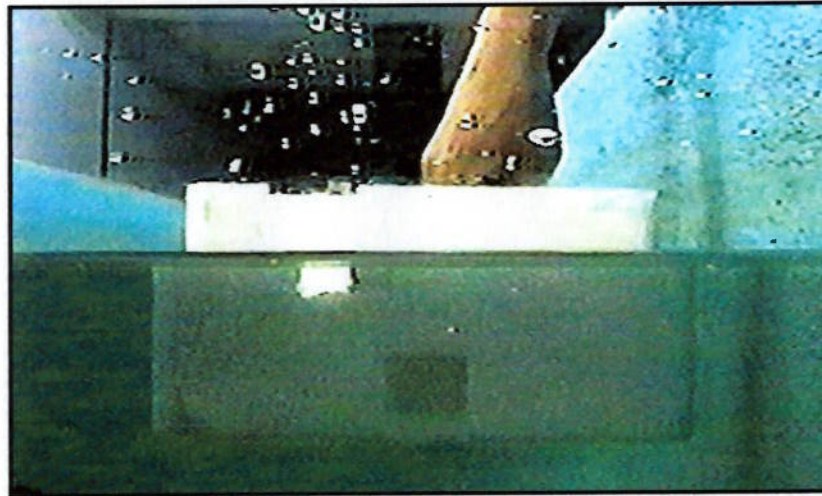


Figura 3.14: Imagem distorcida de um corpo na superfície livre.

Denominando o efeito de distorção como sendo a razão entre seu tamanho aparente fora e dentro da água, foram efetuados testes simples para estudar as possibilidades de se minimizar os efeitos da distorção da imagem. Nos testes, variou-se a distância de um objeto semi-submerso em relação a uma janela de observação e a distância da janela a lente da filmadora, na posição do observador, conforme a Figura 3.15.

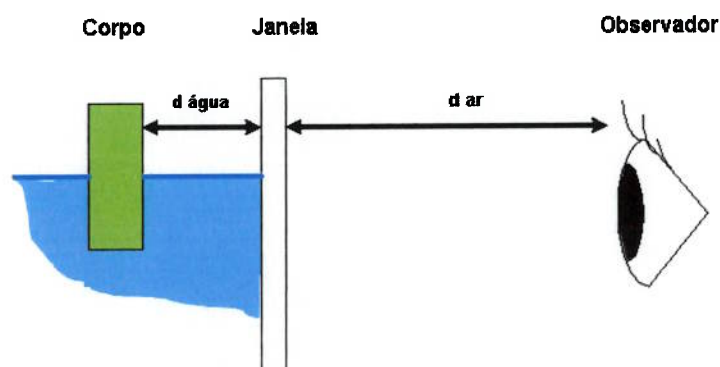


Figura 3.15: Esquema do teste para verificar a distorção na imagem.

Os resultados deste teste são apresentados em um gráfico na Figura 3.16, onde percebe-se que a deformação é menor quanto maior for a relação entre a d_{ar} (distância entre a lente da filmadora e a janela) com a $d_{água}$ (distância entre a janela e o modelo semi-submerso). Estes resultados, obtidos da relação de deformação, foram conseguidos através de imagens fotográficas, como os da Figura 3.14.

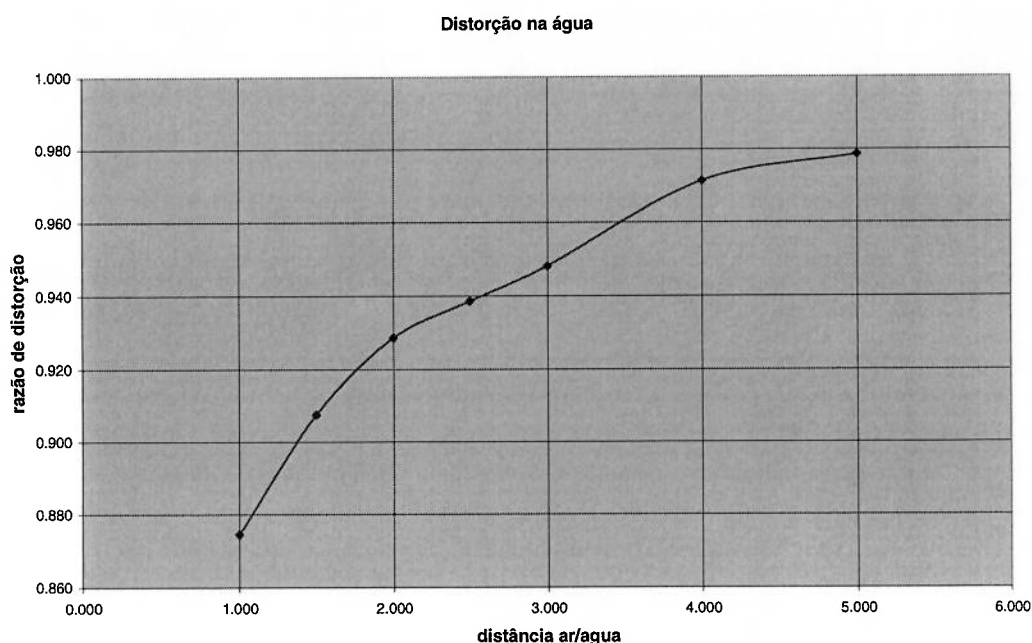


Figura 3.16: Gráfico da função da razão de distorção.

Pelo gráfico da Figura 3.16, pode-se observar que para razão de distorção aceitável, menor que 0.98, é necessário uma razão entre as distâncias d_{ar} e $d_{água}$ (Figura 3.15) maiores que 5. Considerando uma câmara de filmagem subaquática, a parede frontal funcionaria como uma janela de observação, e a lente da filmadora seria o observador, mantendo a razão de distâncias igual a 5, e é bastante difícil reduzir $d_{água}$ (no caso do aparato experimental, a distância entre o painel frontal e o

vidro da caixa estanque de observação) abaixo de 0,20 m, a câmara de filmagem teria comprimento superior de 1 m, resultando em uma caixa muito grande, implicando não só em dificuldade de custo de construção, mas também no peso necessário para se lastrear a caixa.

Foi adotado então, a alternativa de se utilizar uma caixa com espelho refletor que possibilitasse visualizar o fenômeno frontalmente, refletindo a imagem para fora d'água, na direção vertical, mantendo assim a distância muito acima do mínimo necessário para não distorcer a imagem. Desta forma, a filmadora pode ser posicionada verticalmente na estrutura do lançador, na distância desejável.

Esta caixa foi construída em armação de aço com em espelho no plano diagonal e vidros laterais para dar transparência e estanqueidade, a caixa deve ficar em posição de equilíbrio e imobilizada, flutuando no tanque, afundada na posição correta com auxílio de pesos de chumbo como lastros removíveis. A estrutura da caixa apresenta forma cúbica de aresta 0,90 m. Este tamanho, de dimensão característica de 3 vezes a largura dos modelos, também é próximo da largura do painel e considerando que a filmadora registrará a imagem refletida, que é menor que a real, estas dimensões se mostram adequadas para a função desta. A figura 3.17 ilustra a foto da caixa de observação construída e a figura 3.18 apresenta a caixa posicionada e instalada juntamente com o aparato experimental.



Figura 3.17: Caixa de Observação.

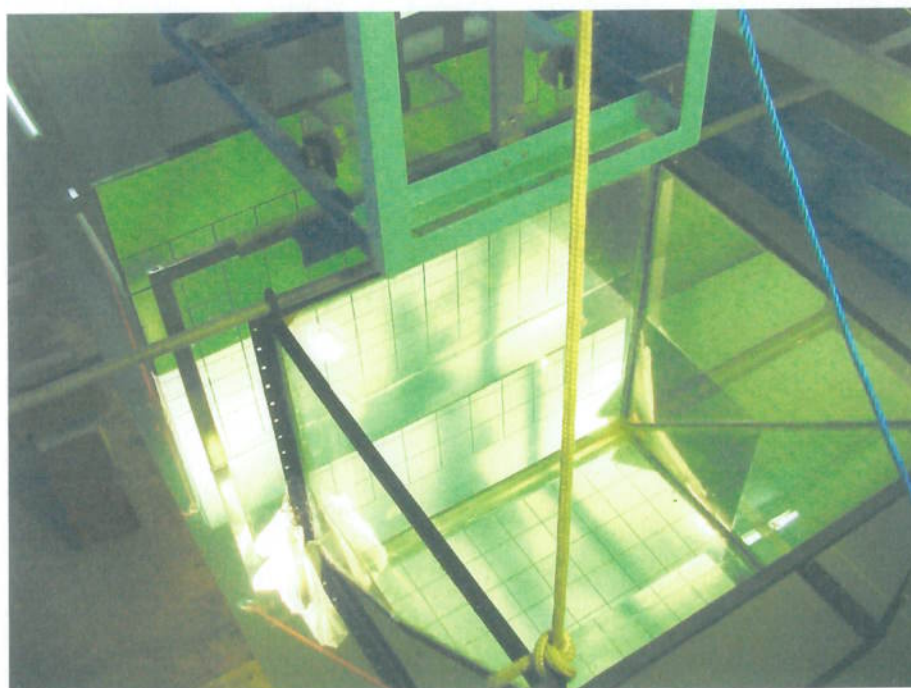


Figura 3.18: Caixa de Observação instalada.

Transdutores de pressão

Devido à limitação do espaço interno dos modelos, os transdutores de pressão devem ser compactos e com membrana sensora externa, de modo a ficar rente a superfície do modelo. Os sensores foram dimensionados segundo dois parâmetros: o fundo de escala e sua frequência natural de vibração.

O fundo de escala: Dimensionou-se o fundo de escala de acordo com a estimativa do valor máximo da magnitude de pressão esperado para o ensaio.

Frequência natural: Devem ter frequência natural de modo a não sofrer o efeito de ressonância devido à excitação do impacto. O impacto causa um pico de pressão característico e, com base nos resultados experimentais publicados, pode-se verificar a duração (período) deste pico, e conseqüentemente a frequência de vibração deste, bastando então dimensionar a frequência natural do sensor como sendo maior que a frequência de vibração.

Ming & Li (1997), obtiveram um valor experimental para o parâmetro adimensional pressão de impacto em cilindros:

$$\frac{p}{\frac{1}{2}\rho v^2} \leq 55, \quad (6)$$

para velocidades acima de 1,98 m/s, o que resulta em $p=247,5$ kPa.

Pela fórmula teórica de Wagner (1931), equação (5) para cunhas a pressão máxima é dada por:

$$\frac{p_{\max}}{\frac{1}{2}\rho v^2} = 1 + \frac{\pi^2}{4tg^2\beta},$$

resultando em $p=159,1$ kPa, para a cunha de 15° , lembrando que por esta fórmula a pressão aumenta com o menor grau de elevação.

Como se pode observar nos resultados publicados, o comportamento de pico de pressão é mais característico em cilindros. Do ensaio de Ming & Li (1997), a frequência do pico é da ordem de 1~3 kHz. Com essa estimativa de pico de pressão esperada para o ensaio, escolheu-se então os transdutores de pressão Kyowa modelo PGM-2KC com fundo de escala de 200kPa e frequência natural de $f_n=24$ kHz, ilustrado na figura 3.19. Embora o valor esperado para o pico de pressão no modelo de cilindro seja superior ao fundo de escala, este modelo de transdutor apresenta faixa de operação de até 150% do fundo de escala e a frequência natural deste transdutor é muito superior à frequência de pico esperada.

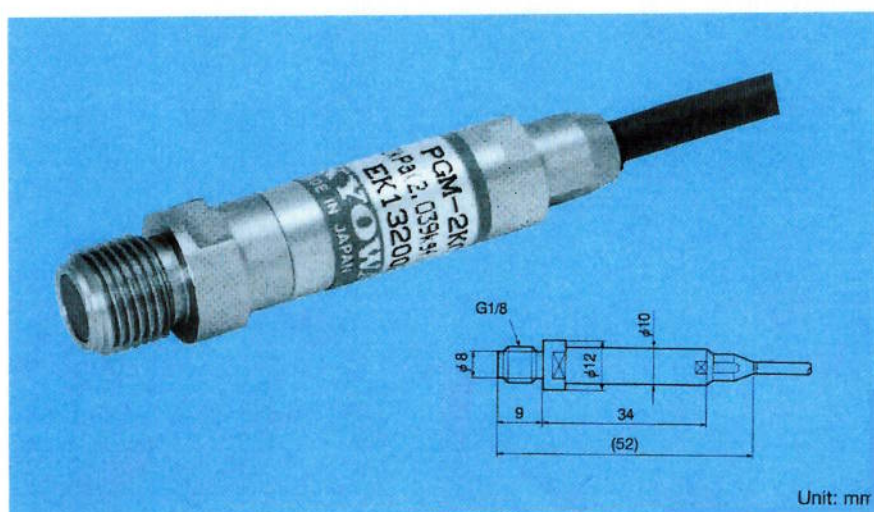


Figura 3.19: Transdutor de pressão utilizado

Acelerômetros

Foi utilizado um acelerômetro unidirecional com frequência natural de modo a não sofrer o efeito de ressonância devido a excitação do impacto. Do ensaio de Ming e Li (1997) a aceleração máxima obtida para 1,98 m/s de velocidade de impacto foi de 3g, com um pico aberto de 200Hz, o que leva a concluir que um acelerômetro de fundo de escala 5g e com frequência natural acima de 1kHz poderia funcionar sem problemas. Dada a disponibilidade, adotou-se um acelerômetro tipo servo-acelerômetro modelo Sundstrand 305BT, unidirecional e resposta dinâmica de até 500 Hz.

Filmadora

Dada a disponibilidade, definiu-se pelo uso de uma filmadora digital SONY modelo VCR-VX 1000, de propriedade do IPT, com taxa de quadros de 30 fps e velocidade de obturador de até 1/1000s.

Aquisição de Dados

Para a aquisição e armazenamento de dados, utilizou-se os seguintes aparelhos arranjados segundo a figura 3.20.

Amplificador de sinais de *strain*: Kyowa modelo DPM-6K

Amplificador de sinal do servo-acelerômetro Sundstrand 305BT.

Placa aquisitora com conversor analógico-digital Lynx PC/104 com capacidade de aquisição de 500khz em 8 canais diferenciais.

PC *Pentium*-MMX com software de tratamento de dados Aqdados4.

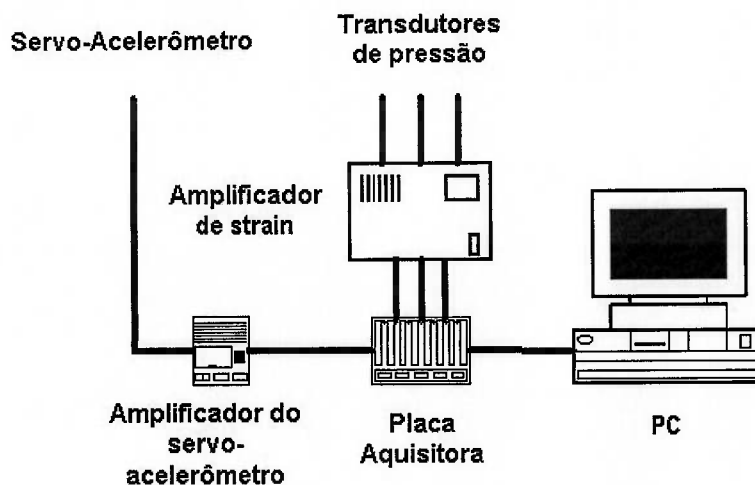


Figura 3.20: Arranjo do sistema de aquisição de dados.

3.4 Metodologia de Ensaio

O ensaio consistiu no lançamento de modelos na superfície do tanque em queda livre a partir de alturas determinadas, registrando pressões dinâmicas pontuais na face de impacto do modelo, força de impacto hidrodinâmico e velocidade de queda. As alturas de queda Δh determinam a velocidade de queda no instante do impacto na superfície livre. A tabela 1 mostra a relação entre a altura de queda e velocidade de impacto, através da conhecida fórmula de Torricelli, desprezando-se a resistência do ar e atritos nos trilhos guias.

Tabela 1: Velocidade de Impacto em função da altura de queda.

Vel.(m/s)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Δh (m)	0,05	0,12	0,20	0,32	0,46

3.4.1 Arranjo de ensaio.

O aparato experimental foi arranjado em sua forma final, segundo ilustrado na figura 3.21. O aparelho foi instalado aproximadamente no centro geométrico do tanque.

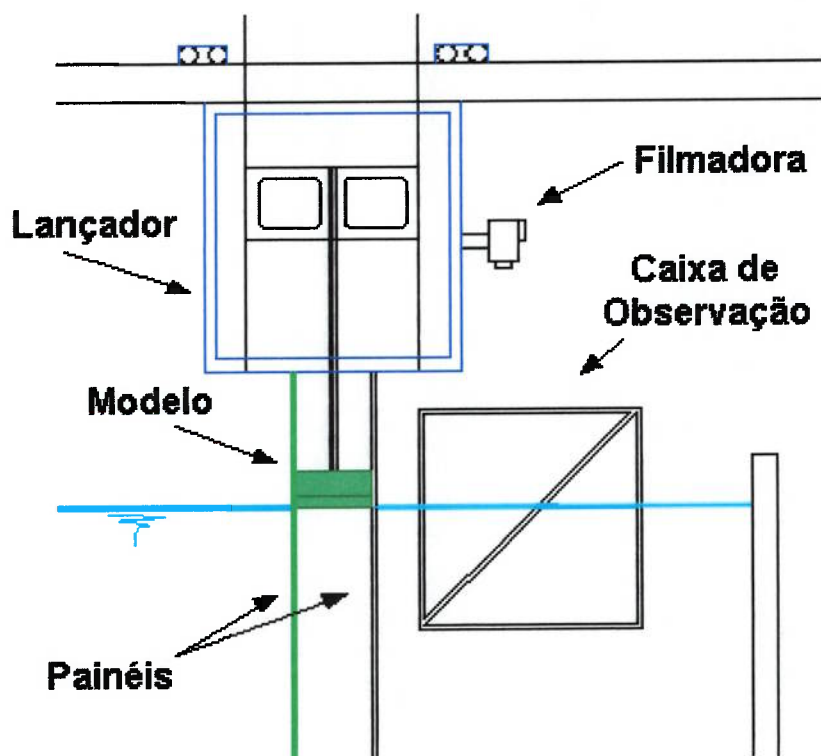


Figura 3.21: Montagem do aparato experimental.

3.4.2 Testes preliminares

Foi realizada uma seqüência de testes de montagem, execução e filmagem com o uso de um protótipo construído em madeira do modelo de cunha, visando identificar eventuais problemas e também servindo como preparação para a ocasião dos ensaios.

Inicialmente com lançamentos simples do modelo sem os painéis direcionadores, para teste do lançador, o que se sucedeu sem problemas, com o lançador funcionando satisfatoriamente.

O segundo teste foi realizado com uso dos painéis, já simulando o ensaio bidimensional. Neste ensaio foi verificada principalmente a viabilidade do sistema de filmagem, seguindo a montagem da Figura 3.21. Neste teste, foram utilizadas duas lâmpadas subaquáticas para reforço de iluminação e foram testadas duas velocidades de obturador: 1/100s e 1/1000s, à taxa de 30 fps. Os resultados da filmagem são apresentados na Figura 3.22.

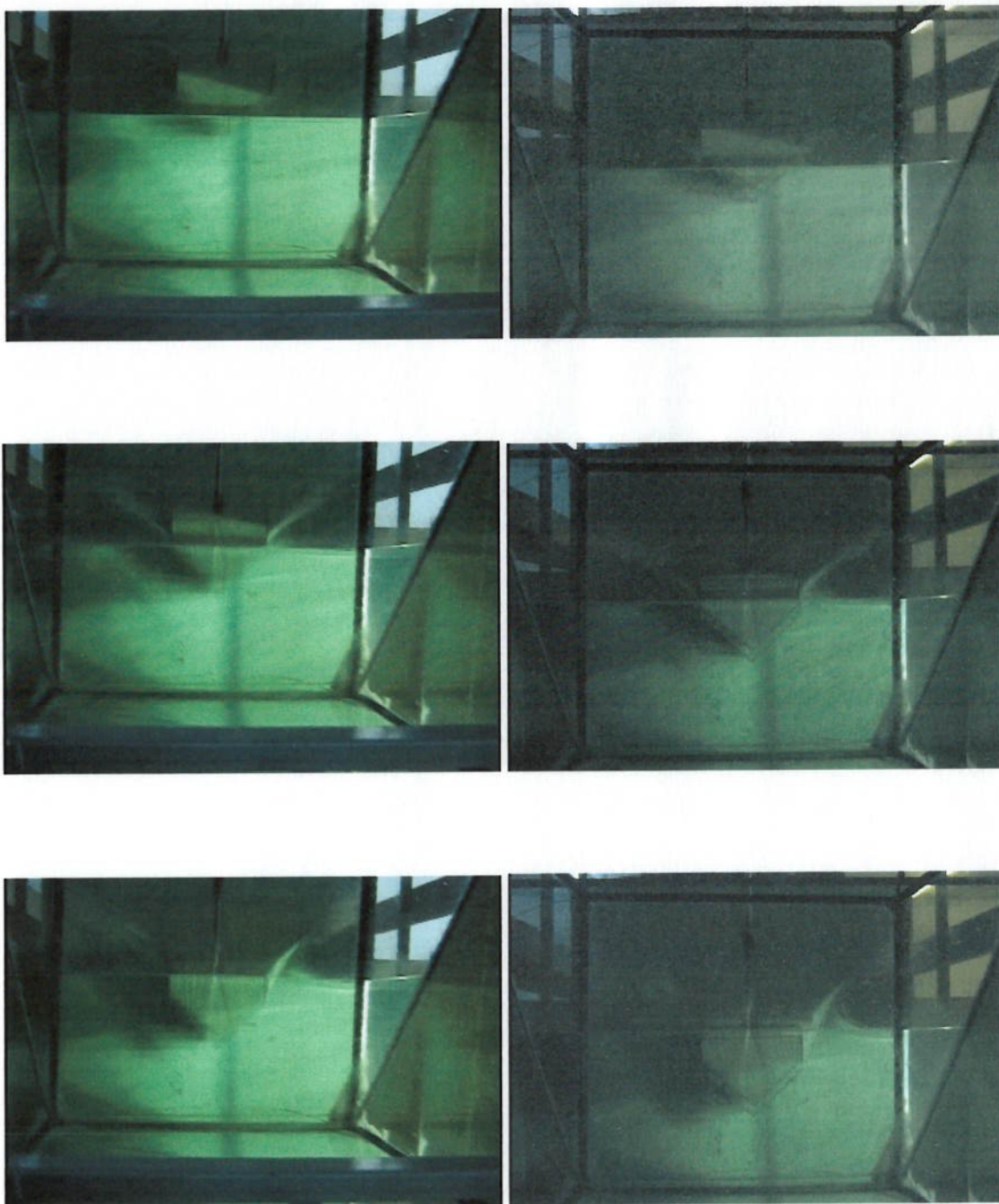


Figura 3.22: Seqüência de quadros, com velocidade de obturador igual a 1/100s a esquerda e 1/1000s a direita, ambos com taxa de 30 quadros/s.

A seqüência de imagens com velocidade de obturador de 1/1000s teve que ser clareada digitalmente por terem ficado muito escuras.

Das imagens obtidas, podemos observar que:

- A iluminação não foi suficiente, sendo necessário mais lâmpadas.
- A imagem do modelo e do spray da superfície livre de cada quadro do filme com velocidade de obturador de 1/100s aparece borrada, indicando que esta velocidade precisa ser aumentada.
- As imagens com velocidade de obturador de 1/1000s são bem mais nítidas embora ficassem muito escuras.
- O aparato de visualização com a caixa de filmagem e filmadora afixada na vertical funcionou como previsto, com imagens praticamente sem deformação devido a refração e permitiu visualizar o fenômeno como se fosse observado frontalmente.
- Embora relativamente baixa, a taxa de quadros de 30/s, permitiu registrar 5 imagens do modelo penetrando na água até a imersão total.

Foi realizado um terceiro teste, melhorando a iluminação, acrescentando duas luminárias de 200W cada acima da água e aproximando do modelo as duas lâmpadas subaquáticas utilizadas anteriormente. Esta nova seqüência de imagens quadro a quadro da filmagem obtida é apresentada a seguir na Figura 3.23.

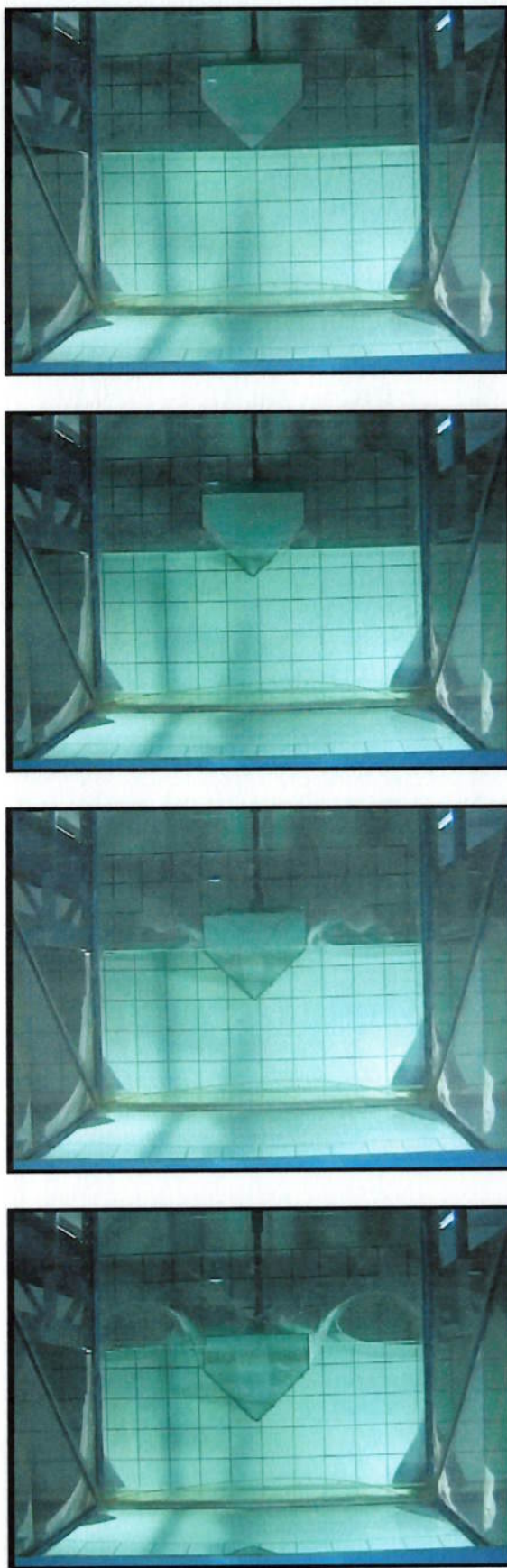


Figura 3.23: Seqüência de quadros - 3^o teste.

Esta última seqüência de imagens também tirada com velocidade de obturador de 1/1000s mostra imagens de qualidade superior, mérito da iluminação adicional. Embora as imagens ainda estejam escuras acima da superfície da água, o *spray* gerado aparece nitidamente indicando que a velocidade de obturador de 1/1000s é adequada e o gradeado traçado também é visível. Vale ressaltar que as imagens do modelo nos meios ar e água são vistas as mesmas dimensões. Este fato mostra que o sistema de caixa de visualização desenvolvido especialmente para o tanque sem janela de observação atende completamente os requisitos de projeto do aparato experimental.

3.4.3 Conclusões finais do testes preliminares

Os testes e as filmagens realizados até o presente momento permitem concluir que:

O aparato e a montagem de ensaio funcionaram adequadamente, de modo geral, o que deve permitir que os ensaios experimentais sejam feitos sem problemas. Alguns problemas menores surgiram ou não foram previstos, tais como fixação da caixa de observação, alguns problemas de vedação e infiltração de água e falta de iluminação.

- A iluminação precisa ser reforçada porque as imagens sendo geradas com velocidade de obturador de 1/1000s ficaram escurecidas, sendo necessário um clareamento digital.
- O equipamento de filmagem permitiu fazer boas imagens do fenômeno, embora com relação de quadros de 30 fps, o que resultou em imagens onde o

modelo se desloca por cerca de até 10 cm entre cada quadro. Considerando que este estudo visa apenas a comparação de fotos do ensaio com a simulação numérica, não há necessidade de um grande número de imagens.

- Apesar dos cuidados quanto à utilização da caixa de observação, o gradeado do painel de fundo aparece com ligeira deformação quando visto abaixo e acima da água, porque o painel traseiro está mais distante da caixa de observação.

4 Resultados.

Inicialmente, foram realizados testes para verificar a validade dos resultados experimentais obtidos pelo aparato experimental. A validação se dará com a comparação de resultados deste ensaio com resultados semelhantes já publicados. Para este teste, foram utilizados os modelos de cunha de 45° e cilindro, que são os modelos cujos resultados de ensaios são disponíveis na literatura. Verificada a validação, os resultados experimentais e numéricos para o impacto de cunha e cilindro são apresentados.

4.1 Validação

O modelo de cunha de 45° foi testado com lançamento a 20cm de altura de queda e frequência de aquisição 5000 Hz, atingindo velocidade de impacto de $V=1,848\text{m/s}$. A disposição dos transdutores de pressão é mostrada na figura 4.1. Os resultados de pressão adimensionalizados p_{ad} na forma:

$$p_{ad} = \frac{P}{0.5\rho v^2} \quad (7)$$

Os resultados de pressão adimensionalizada são apresentados a seguir na figura 4.2. Foram utilizados 5 transdutores, os de posição 1 a 5 da figura 4.1. Os sinais são apresentados sem filtragem, mostrando o ruído característico.

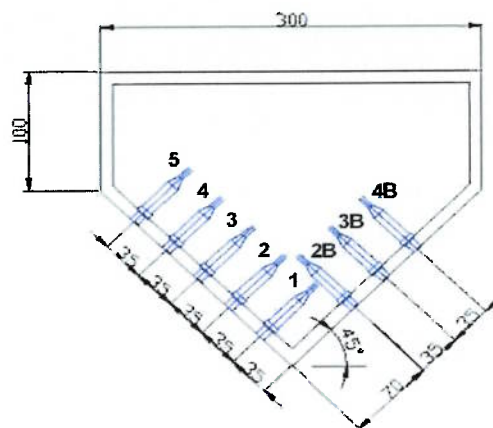


Figura 4.1: Posição dos transdutores de pressão

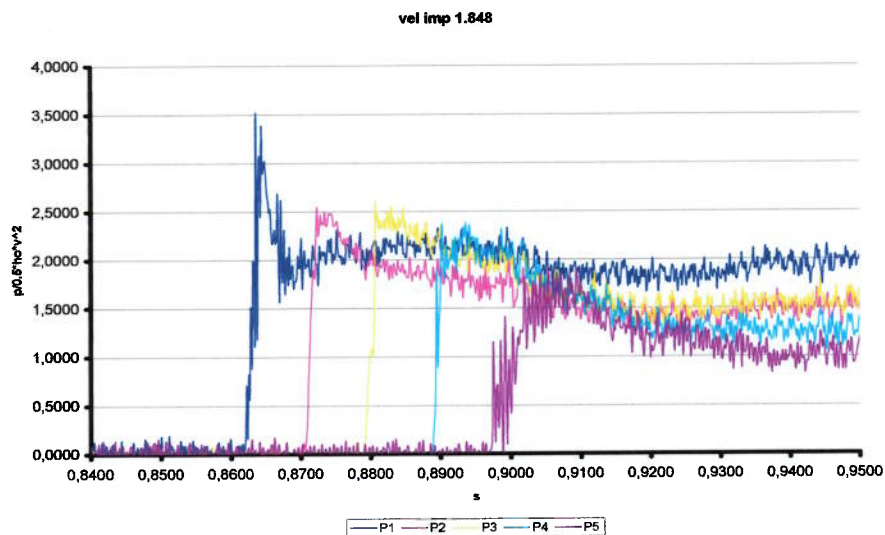


Figura 4.2: Resultados do teste com modelo de cunha $\beta=45^\circ$, $V_{imp}=1,85$ m/s

Este resultado para a cunha apresenta características muito semelhantes tanto qualitativamente quanto quantitativamente, comparando-se o parâmetro p_{ad} com os resultados de Miyamoto & Tanizawa (1984), que ensaiaram um modelo de cunha de 45° , cujos resultados de pressão adimensional são apresentados na figura 4.3. Pode-se perceber o mesmo comportamento de p_{ad} que no instante de impacto apresenta

uma abrupta elevação sem um pico pronunciado, e mantêm-se praticamente constante após o impacto. O valor de p_{ad} deste presente estudo atinge um valores de 2,0 até 3,5 enquanto que no de Miyamoto & Tanizawa (1984), atinge valores em torno de 2,0 a 2,5, o que é compatível para ensaios dinâmicos.

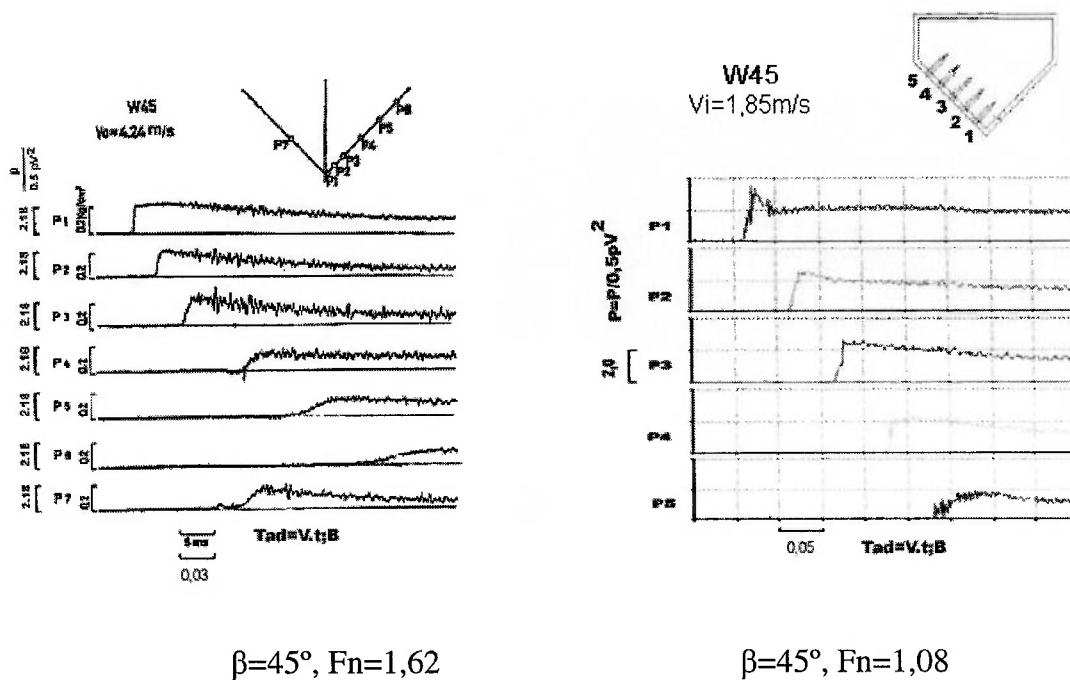


Figura 4.3: Comparação dos resultados obtidos (a direita) com os obtidos por Miyamoto & Tanizawa (1984) (a esquerda)

O modelo de cilindro foi ensaiado com 5 transdutores de pressão e o acelerômetro a partir de diferentes de altura de queda, atingindo velocidade de impacto de 0,90 m/s a 2,29 m/s. A taxa de aquisição de dados é de 5590 Hz/canal. A disposição dos sensores é mostrada na figura 4.4.

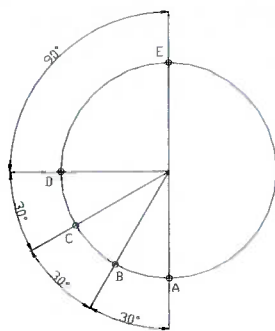


Figura 4.4: Posição do sensores (A, B, C, D e E) - Diâmetro do cilindro $D = 300\text{mm}$.

Os resultados obtidos por este aparato experimental são mostrados sem filtragem na figura 4.5 para o caso de $V_{imp}=1,50\text{ m/s}$. Para comparação, são apresentados os resultados de Shibue et. al.(1994) e Ming & Li (1997), figuras 4.6 e 4.7 respectivamente, ambos utilizando placa aquisitora com capacidade total de 200kHz.

Devido ao fato da taxa de aquisição estar no limite do equipamento, ocorreram perdas de sinal em alguns pontos, que foram excluídos do gráfico.

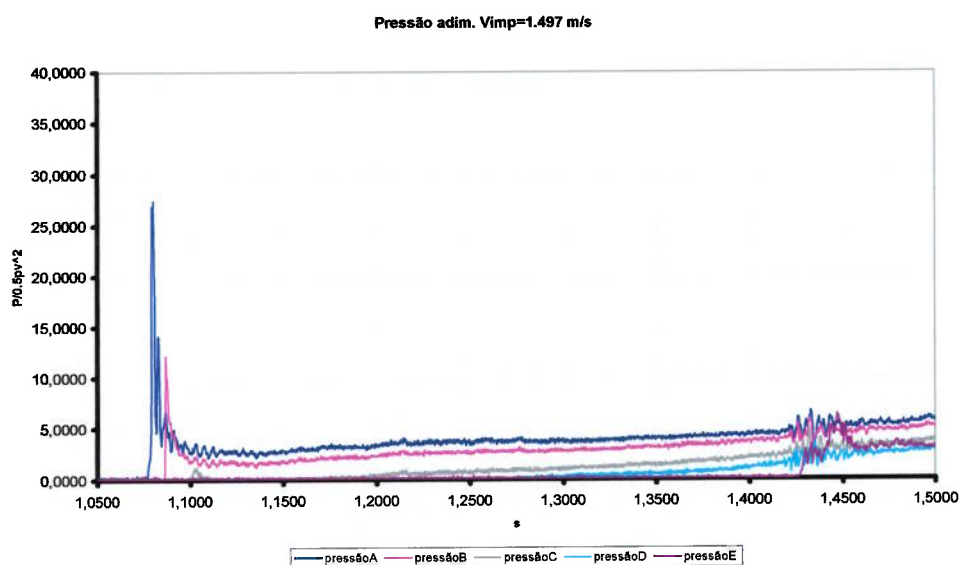


Figura 4.5: Resultados de pressão pontual Cilindro – $V_{imp}=1,50\text{ m/s}$.

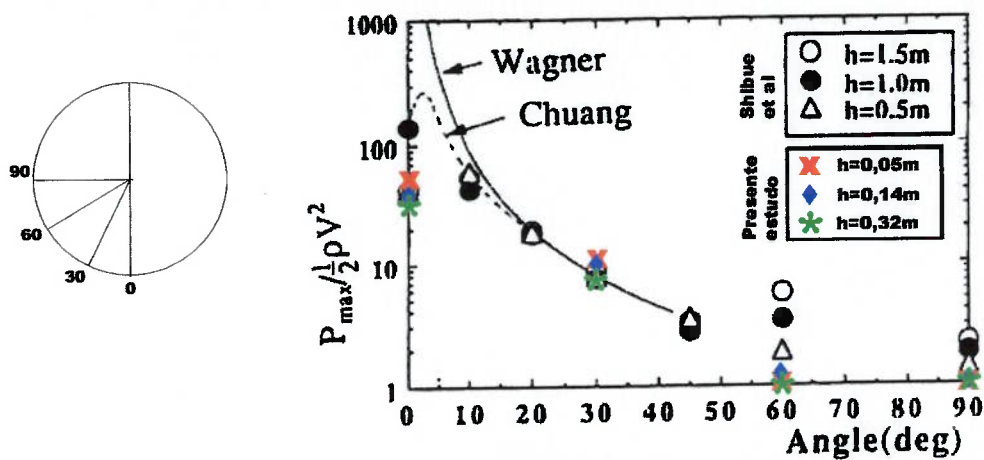


Figura 4.6: Resultados de pressões normalizada obtidos por Shibue et. al. (1994).

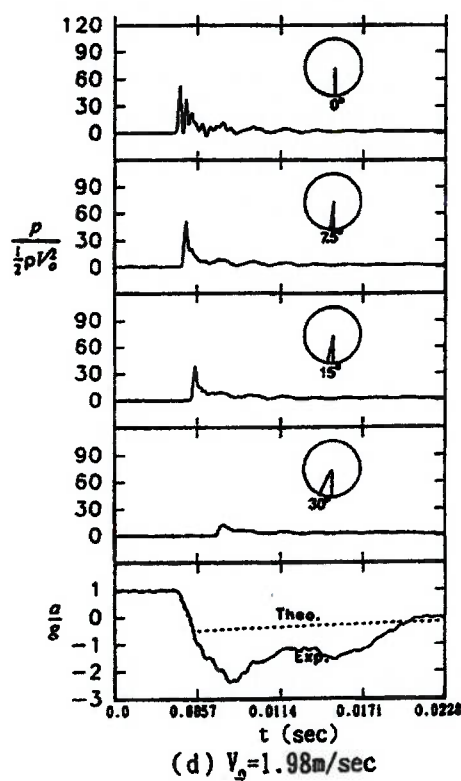


Figura 4.7: Resultados obtidos por Ming & Li (1997).

Este teste mostra que os resultados do presente teste são qualitativamente similares apresentando o mesmo comportamento das referências com pico de alta

frequência porém com menor magnitude. O pico máximo de pressão adimensional obtido por este ensaio igual a 28, contra 25 a 40 de Shibue et al.(1994) e 50 de Ming & Li (1997). Embora o ensaio de Shibue et. Al. apresentasse pico de pressão na posição 60°, o presente ensaio não apresentou pico de pressão na posição 60° e 90°, pelo fato do spray formado ser tangente ao cilindro nesta posição (60°) e estar descolado da posição 90°.

Um outro parâmetro obtido em ensaios experimentais para modelos de cilindros é o Coeficiente de *Slamming*, CS, para o presente caso, CS foi calculado através da desaceleração no instante de impacto, pelo sinal registrado pelo acelerômetro, ilustrado na figura 4.8. O gráfico de CS obtido é mostrado na figura 4.9, onde devido ao ruído do sinal de aceleração, a curva de CS é obtida por regressão.

$$CS = \frac{F_{imp}}{0,5\rho DV^2} \quad (8)$$

e

$$F_{imp} = (M_{md} + M_{carro})\vec{a}_{vertical} \quad (9)$$

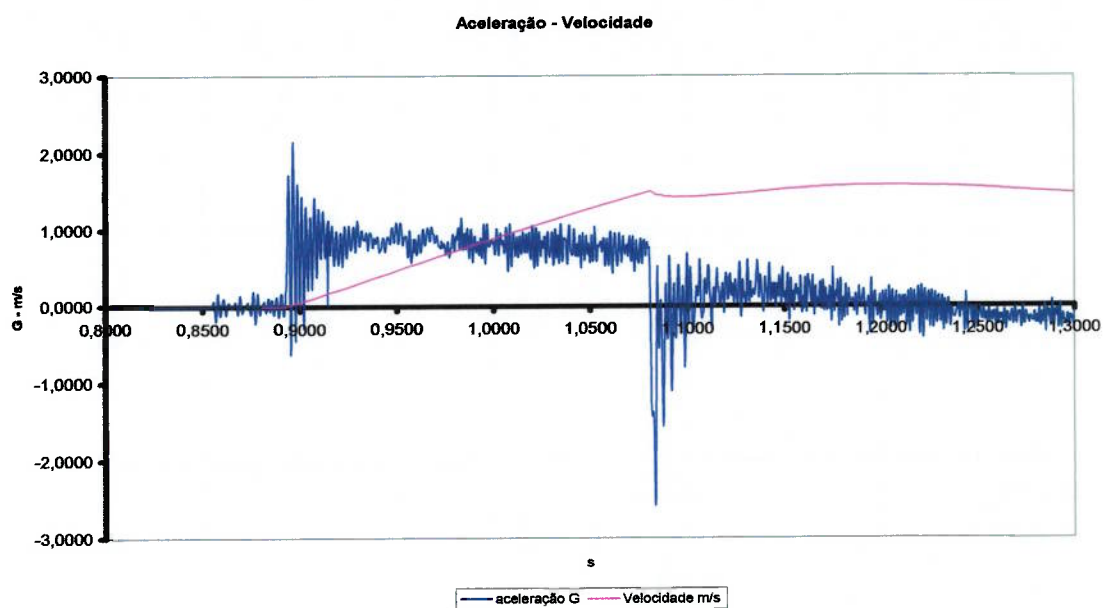


Figura 4.8: Aceleração e Velocidade vertical do cilindro - $V_{imp}=1,50$ m/s

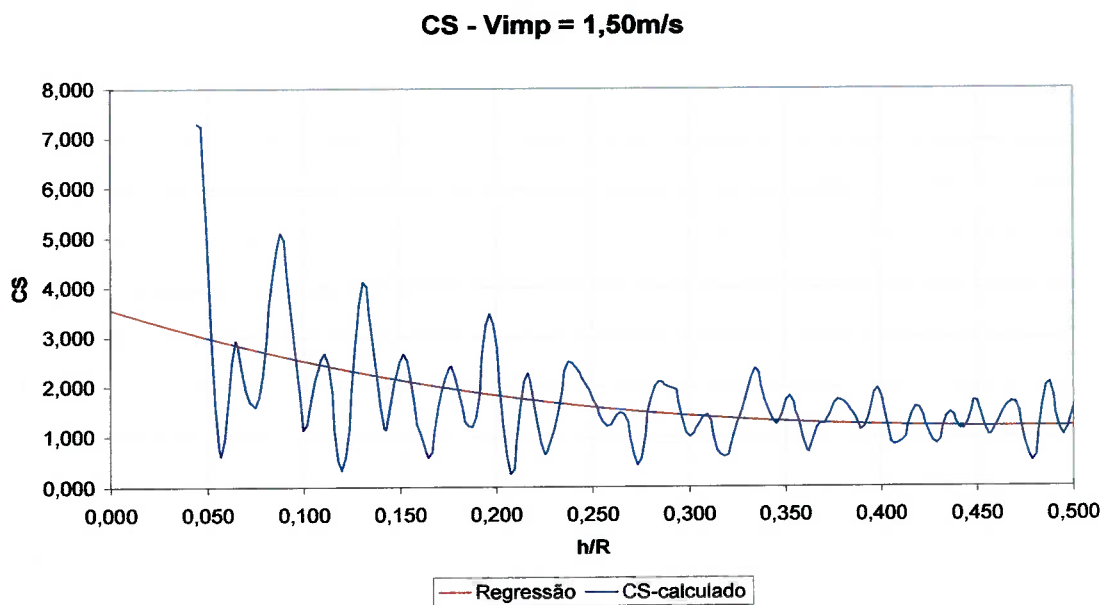


Figura 4.9: Curvas de CS obtidas pelo sinal de aceleração - $V_{imp}=1,50$ m/s.

Os valores de CS obtidos ficaram em torno de 4,15 a 3,12, valores um pouco abaixo dos obtidos por Faltinsen et al.(1977), de 4,1 a 6,4 e da regressão de Campbell & Weynberg (1980), CS=5,3. A figura 4.10 ilustra a curva de CS obtida comparada a alguns resultados publicados. Para o presente caso, CS obtido é inferior a curva de Campbell (experimental) e Cheng (numérico) porém esta diferença é aceitável dado que as publicações tem apresentado valores de CS com um grande grau de dispersão, principalmente na fase inicial de impacto.

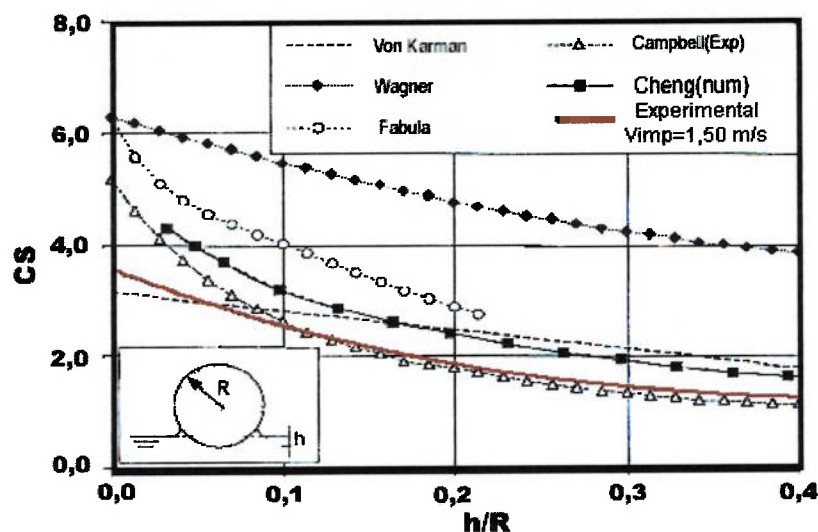


Figura 4.10: Comparativo de CS publicados

Já diferença apresentada no resultado de pico de pressão do modelo do cilindro pode ser devido as seguintes razões:

- a) Escoamento pela lateral tornando o escoamento tridimensional. O escoamento bidimensional sendo restrito apresentaria pressões maiores.

- b) A Taxa de aquisição deste ensaio ser mais baixa que as das referências. A taxa de aquisição mais baixa pode fazer com que se perca dados de eventos principalmente no pico de alta frequência.
- c) Possível amortecimento mecânico do impacto. Na ocorrência de amortecimento a pressão indicada é reduzida.
- d) Deve-se considerar também que no impacto hidrodinâmico do cilindro, na posição A, a membrana sensora do transdutor de pressão atinge a água horizontalmente podendo criar um “colchão de ar” aprisionado, semelhante ao que ocorre nos modelos de impacto de placa plana, o que reduz a pressão de impacto. A presença ou não deste ar aprisionado só é detectável com uso de câmeras filmadoras de altíssima velocidade devidamente posicionadas para registrar o ponto de impacto A, ou com sensores elétricos através de fechamento de corrente elétrica no contato com a água.

Das razões listadas, com as limitações técnicas e cronológicas, investigou-se os efeitos da não bidimensionalidade do escoamento, onde um teste foi realizado mantendo-se a altura de queda, analisando-se quatro casos de lançamento do mesmo modelo de cilindro:

- Com os painéis encostados sem folga no modelo.
- Com os painéis afastados de 5mm do modelo.
- Sem os painéis.
- Com placas laterais solidárias ao modelo.

Os resultados obtidos foram com taxa de aquisição de 5590 Hz, e são apresentados nas figuras 4.11 a 4.14.

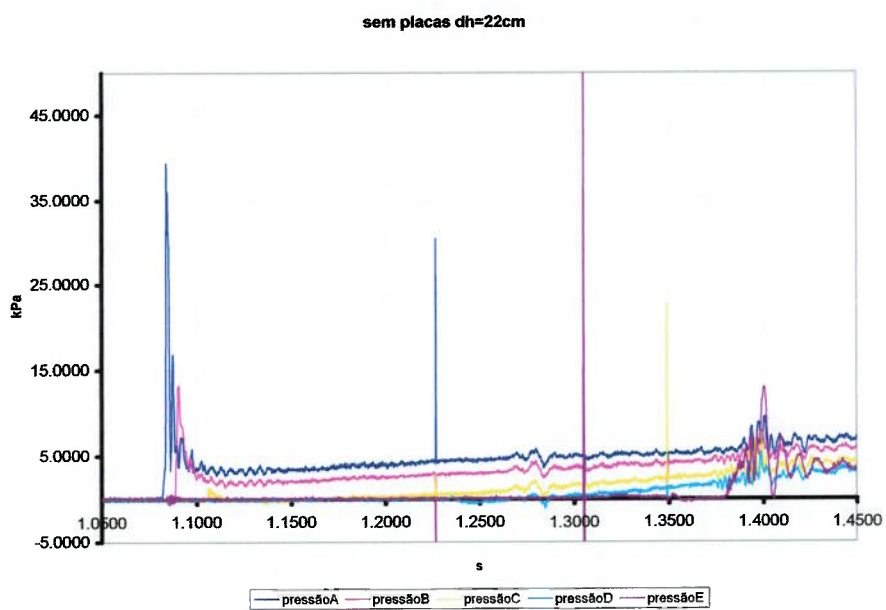


Figura 4.11: Teste sem placas laterais – $\Delta h=0,22\text{m}$ – $V_{\text{imp}}=1,88\text{m/s}$

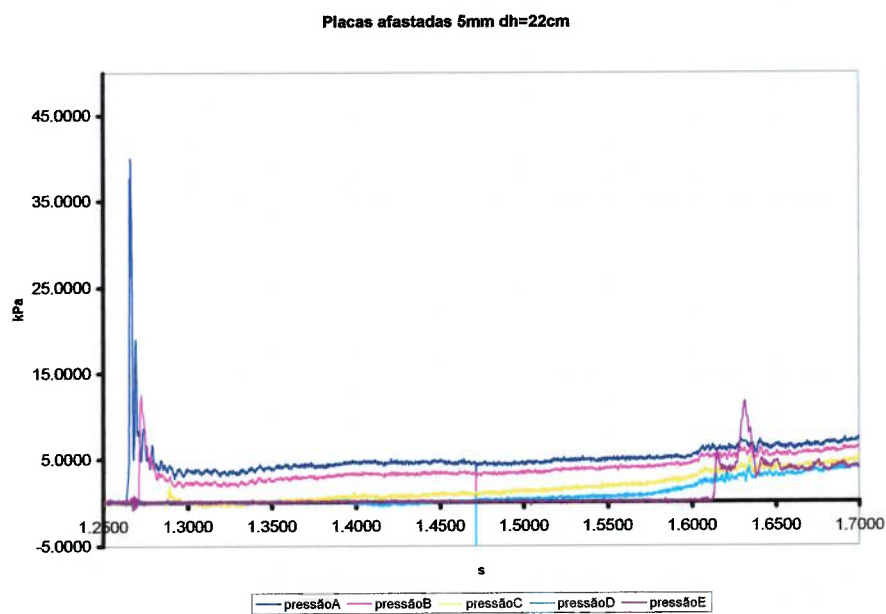


Figura 4.12: Teste com placas laterais afastadas de 5 mm - $\Delta h=0,22\text{m}$ –

$$V_{\text{imp}}=1,87\text{m/s}$$

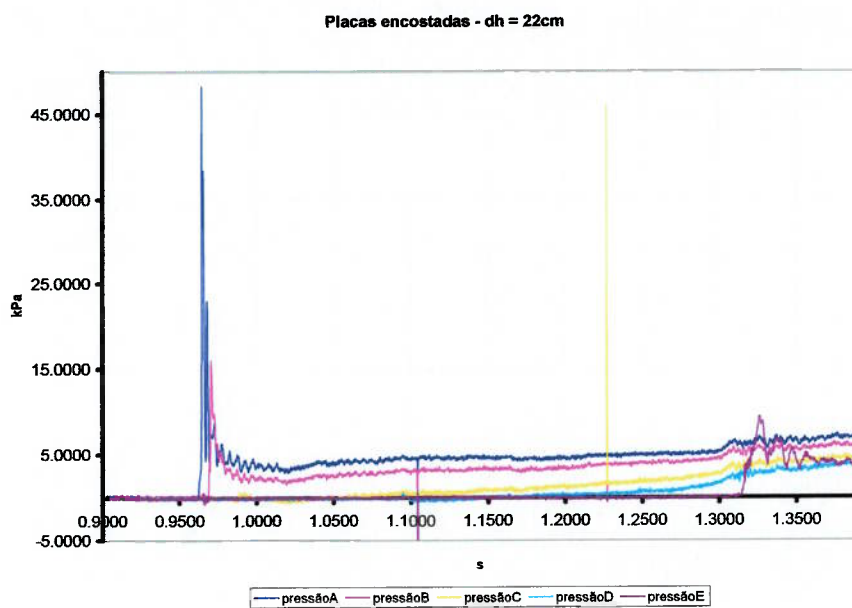


Figura 4.13: Teste com placas laterais encostadas - $\Delta h=0,22\text{m}$ - $V_{\text{imp}}=1,87\text{m/s}$
(distância modelo-placa menor que 1mm).

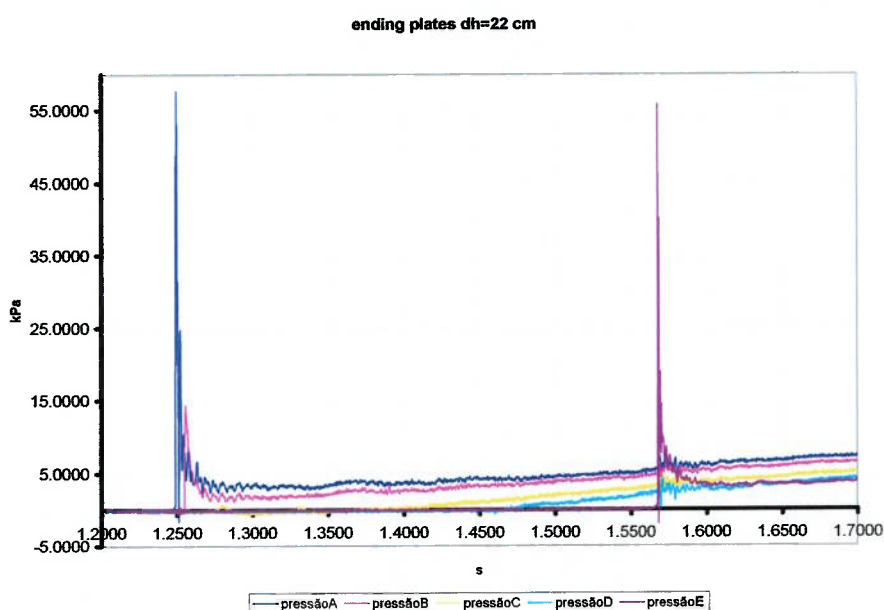


Figura 4.14: Teste com placas laterais solidárias ($600 \times 600 \text{mm}^2$)

$$\Delta h=0,22\text{m} - V_{\text{imp}}=1,86\text{m/s}.$$

A figuras apresentam resultados semelhantes qualitativamente, porém com diferença no valor de pico da pressão pontual. Entre as figuras 4.11 a 4.14, é

possível verificar a influência da bidimensionalidade do escoamento, que aumenta o pico de pressão conforme o escoamento se torna bidimensional. Já a figura 4.14 apresentou maior pico de pressão, também apresentando um segundo pico extremamente acentuado no ponto E do modelo de cilindro, correspondendo ao instante da água cobrindo o cilindro, após a imersão. Embora o uso das placas laterais solidárias tenha resultado em valores de pico de pressão maiores, sua utilização demanda um grande cuidado na montagem do aparato para garantir a verticalidade no curso de queda do modelo e conseqüentemente no impacto, dificuldade esta verificada durante a maioria dos testes realizados desta forma, confirmando a recomendação dos técnicos do IPT-SP, vide item 3.3 desta dissertação. Deve haver também cuidados na fixação das placas nos modelos, pois dado o elevado valor de pressão atingido e a grande área das placas (600x600 mm²), a força resultante pode deformar ou soltar as placas solidárias, fato que ocorreu durante um teste, onde as placas eram coladas ao modelo com borracha de silicone.

Além disso, estudos publicados indicam que o valor de pico de pressão apresenta dispersão significativa. Para efeitos práticos de consideração de carregamento sobre estruturas, ao invés dos valores de pico, a integral da curva da pressão, ou seja, o impulso é o parâmetro decisivo.

Dadas as dificuldades no uso de placas solidárias, os ensaios serão realizados com as placas direcionadoras fixas, tomando-se o cuidado para mantê-las o mais próximo possível do modelo. Embora o presente teste tenha resultado em pressões de pico ligeiramente inferiores aos dados da literatura disponíveis, para o modelo de cilindro, qualitativamente estes mesmos são compatíveis com as referências.

4.2 Simulação Numérica

O método numérico empregado e o método desenvolvido por Arai et. Al. (1994) e Cheng (1995), com emprego de uma malha conforme coincidente com o contorno do corpo de impacto. Em geral, excetuando-se os problemas de convergência, os simuladores numéricos apresentam melhores resultados com o maior refinamento das malhas acarretando, porém, em maior custo de tempo de processamento, visto que em malhas bidimensionais, o tempo de processamento aumenta com o quadrado da dimensão da malha. Com o objetivo de verificar o tamanho da malha ideal, a menor possível, mas sem prejuízo dos resultados, foi realizado um teste com o contorno do modelo de ensaio de cunha de $\beta=45^\circ$, figura 4.1, nas mesmas dimensões e com velocidade de impacto de $V_{imp} = 1.54\text{m/s}$, registrando os pontos de pressão correspondentes àquelas das posições dos sensores, com quatro diferentes refinamentos de malha e com as mesmas condições de contorno, ilustrados na figura 4.15. A dimensão do contorno externo é de nove vezes a largura do modelo (2,70m), ou seja, suficiente para que não ocorra o efeito de canal, interferindo no escoamento.

A figura 4.16 apresenta os resultados, de pressão pontual em função do tempo, da simulação numérica para cada diferente malha. O principal critério para se verificar o refinamento de malhas ideal a partir dos resultados obtidos é a observação de tendência dos resultados em se manter constante a partir de determinada dimensão de malha. Pode-se perceber que as malhas de 90×90 e 120×120 apresentaram curvas de pressão com comportamento definido e de mesma tendência, sendo que a diferença entre os dois resultados é mínima, embora os resultados da malha de 90×90 apresente oscilação após o pico de impacto. Conclui-

se então que a malha de 90x90 é o tamanho ideal para as simulações otimizando-se o tempo de processamento.

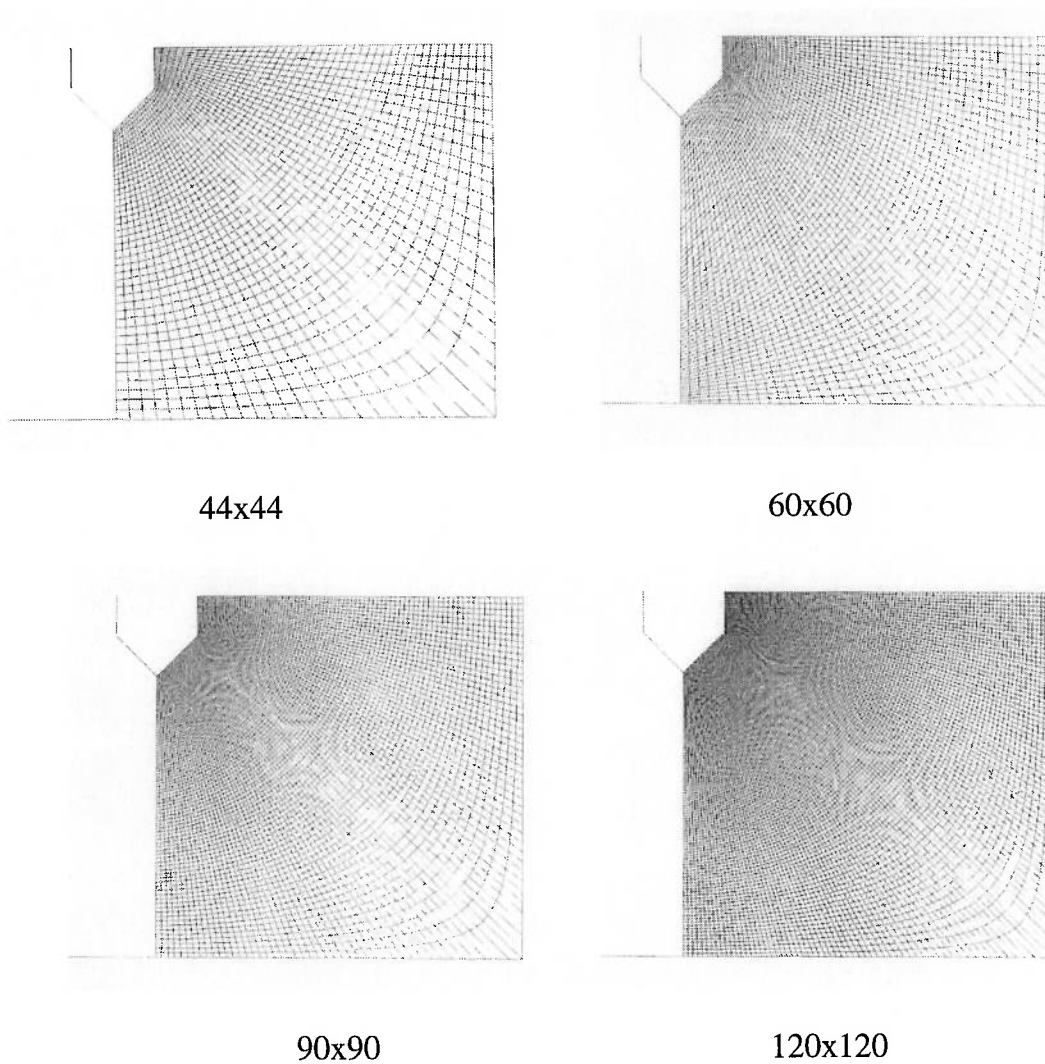


Figura 4.15: Malhas e casos simulados

Definido o tamanho da malha, o método numérico será simulado para as mesmas condições de velocidade de impacto com as mesmas dimensões de modelos de ensaio, registrando valores de pressão pontual nas mesmas posições dos sensores de pressão, permitindo a comparação direta dos resultados experimental e numérico.

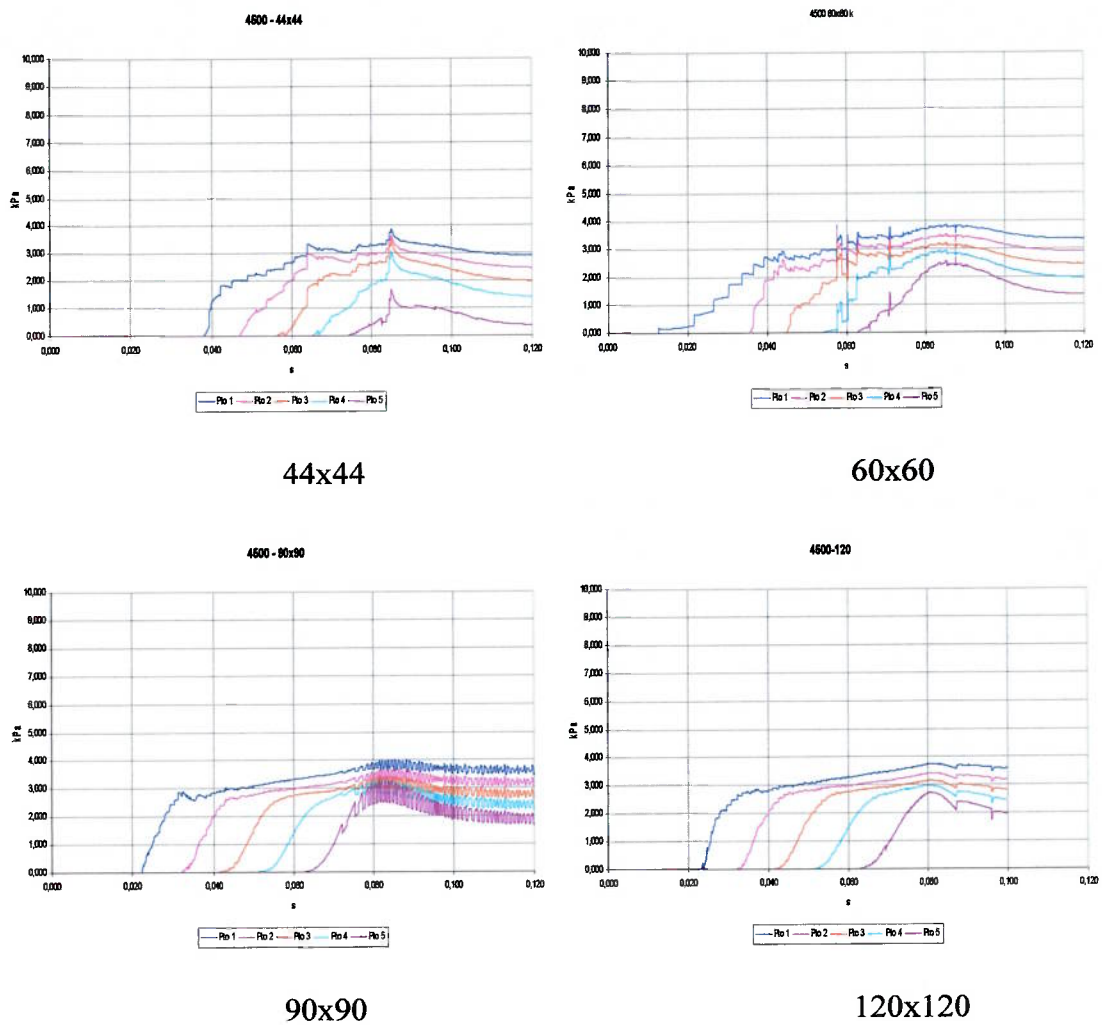
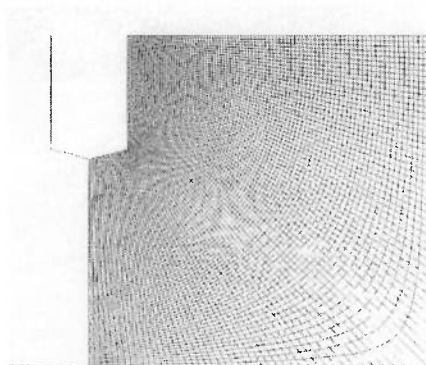
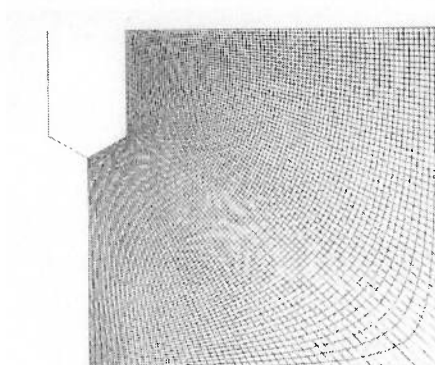
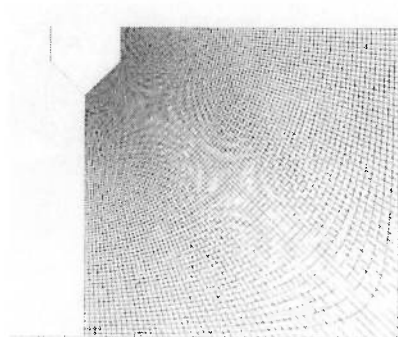
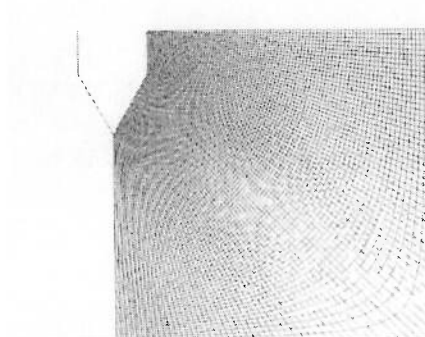
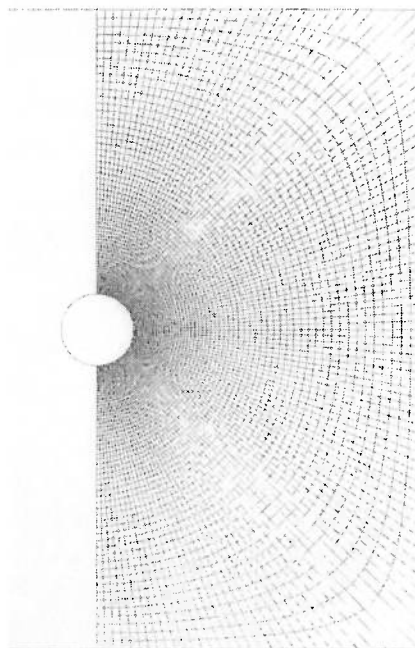


Figura 4.16: Resultados de pressão pontual para simulações em diferentes refinamentos de malha – $V_{imp} = 1,54\text{m/s}$

Todas as malhas utilizadas nas simulações, nos casos de impacto de cunhas e cilindro, são apresentadas a seguir na figura 4.17.

cunha de $\beta = 15^\circ$ cunha de $\beta = 30^\circ$ cunha de $\beta = 45^\circ$ cunha de $\beta = 60^\circ$ 

Cilindro

Figura 4.17: Malhas utilizadas nas simulações numéricas.

4.3 Ensaios Experimentais dos modelos de Cunha

Nos ensaios realizados para os modelos de cunha, foram utilizados 4 modelos de ângulo de *deadrise* β iguais a 15, 30, 45 e 60 graus, com possibilidade de inclinação no plano vertical de ângulo α , conforme mostra a Figura 4.18. Todos os modelos possuem a dimensão característica (largura) igual a 300mm. Embora possuindo dispositivo de fixação que permite reclinar os modelos para ensaios de impacto assimétrico, o ângulo α é igual a zero no presente estudo de casos de impacto simétrico.

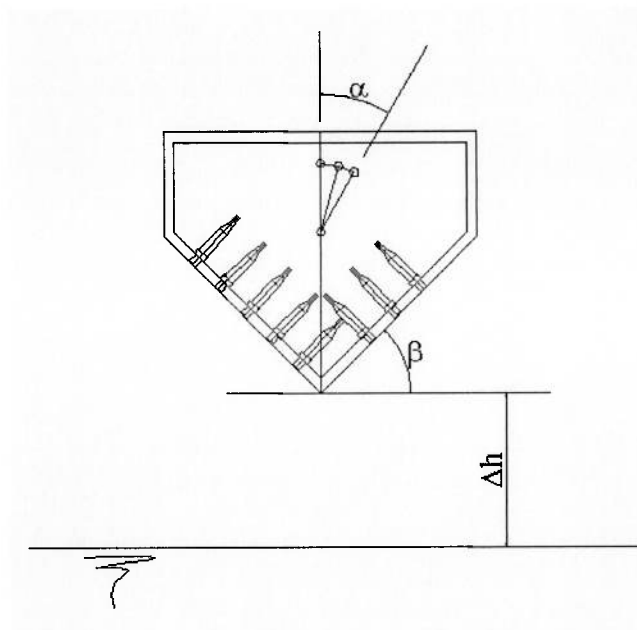


Figura 4.18: Definição dos ângulos de inclinação α , *deadrise* β .

A simulação numérica foi feita nas mesmas condições das do ensaio experimental, confrontando-se diretamente os resultados de pressão pontual correspondentes às posições dos transdutores dos modelos experimentais.

Em cada modelo de cunha a posição dos sensores é indicada pelos pontos 1 a 5 e os pontos 2B a 4B, previstos para serem utilizados apenas nos ensaios oblíquos, sendo que estes estão em posição simétrica aos correspondentes aos pontos 2 a 4.

Os casos ensaiados são:

- Cunha de $\beta=15^\circ$, $\alpha = 0^\circ$;
- Cunha de $\beta=30^\circ$, $\alpha = 0^\circ$;
- Cunha de $\beta=45^\circ$, $\alpha = 0^\circ$;
- Cunha de $\beta=60^\circ$, $\alpha = 0^\circ$;

e velocidades nominais de impacto de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m/s.

A frequência de aquisição de sinal em todos os resultados de cunha é de 5500Hz por canal.

4.4 Resultados Obtidos.

Nesta seção são apresentados os resultados experimental e numérico, séries temporais de pressão pontual no instante de impacto, representativos de cada modelo de cunha. Todos os resultados obtidos são apresentados no Anexo A1.

4.4.4 Modelo de Cunha de ângulo de *deadrise* $\beta=15^\circ$.

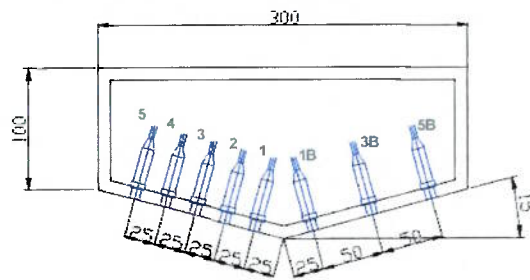


Figura 4.19: Posição dos transdutores de pressão

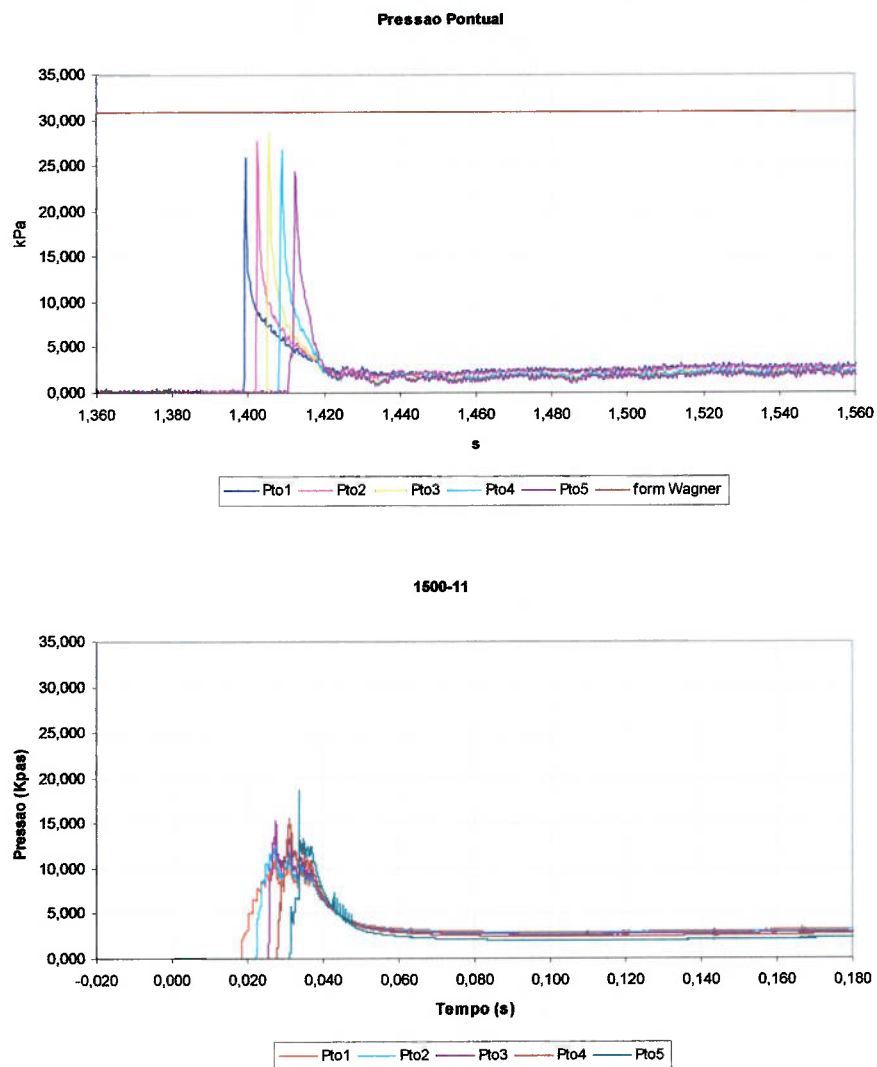


Figura 4.20: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,11\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$

4.4.5 Modelo de Cunha de ângulo de *deadrise* $\beta=30^\circ$

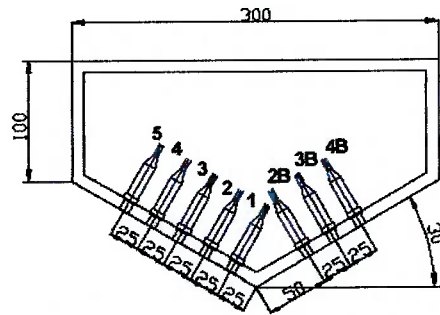


Figura 4.21: Posição dos transdutores de pressão

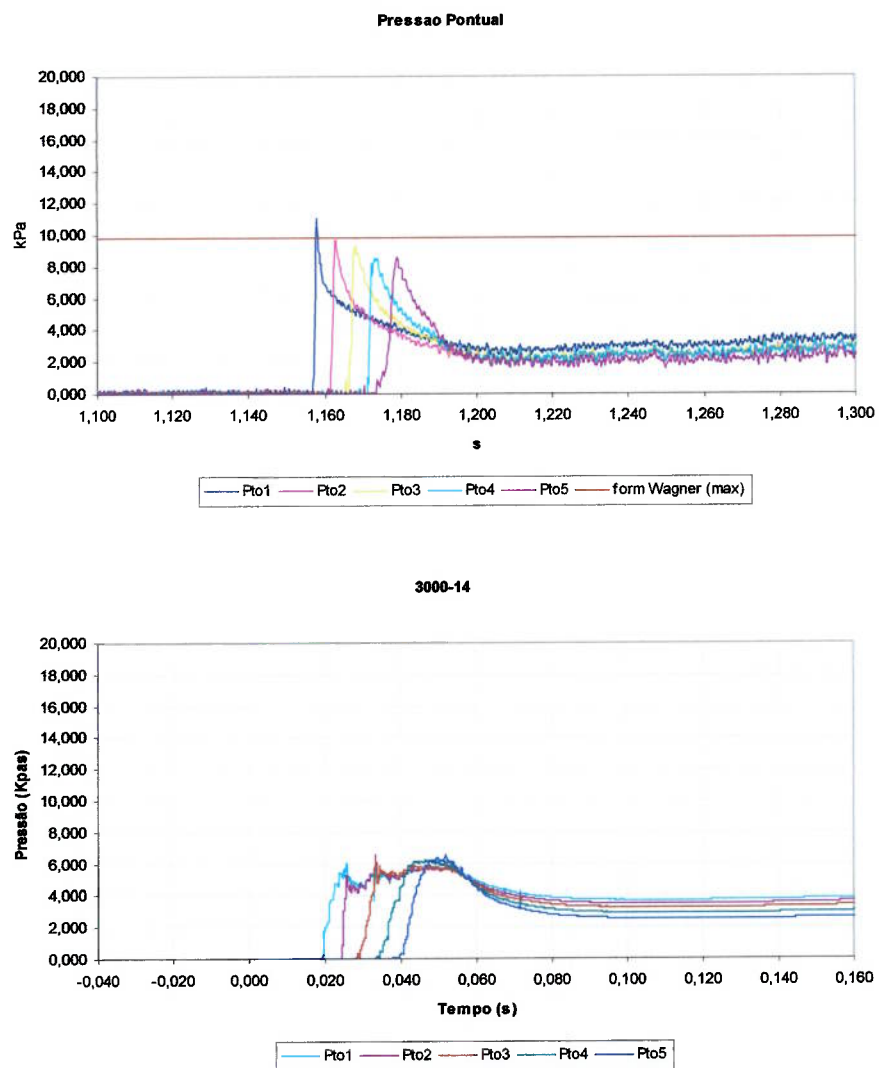


Figura 4.22: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$

4.4.6 Modelo de Cunha de ângulo de *deadrise* $\beta = 45^\circ$

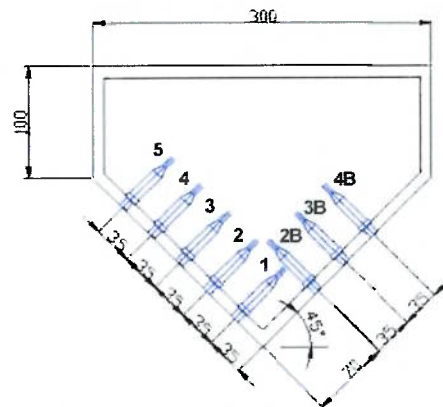


Figura 4.23: Posição dos transdutores de pressão

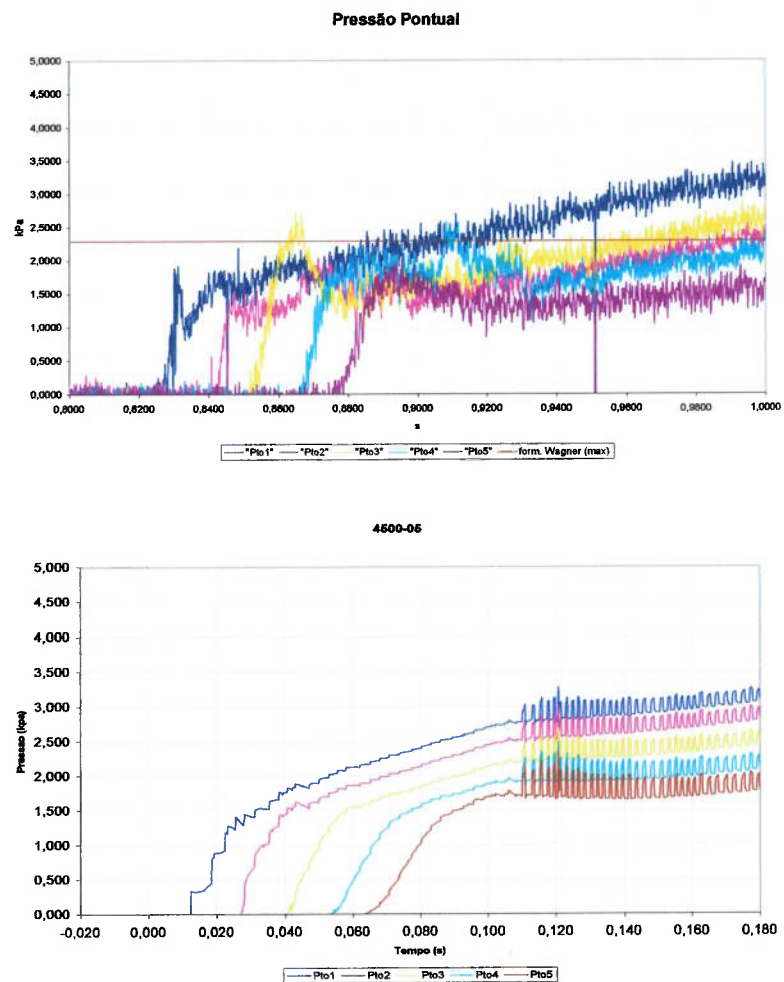


Figura 4.24: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,15 \text{ m/s}$

4.4.7 Modelo de Cunha de ângulo de deadrise $\beta=60^\circ$

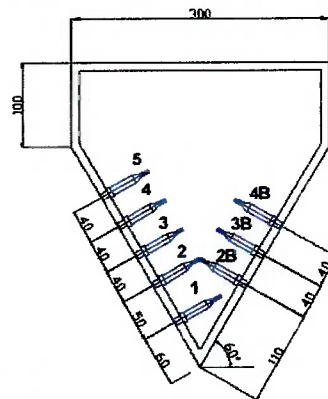


Figura 4.25: Posição dos transdutores de pressão

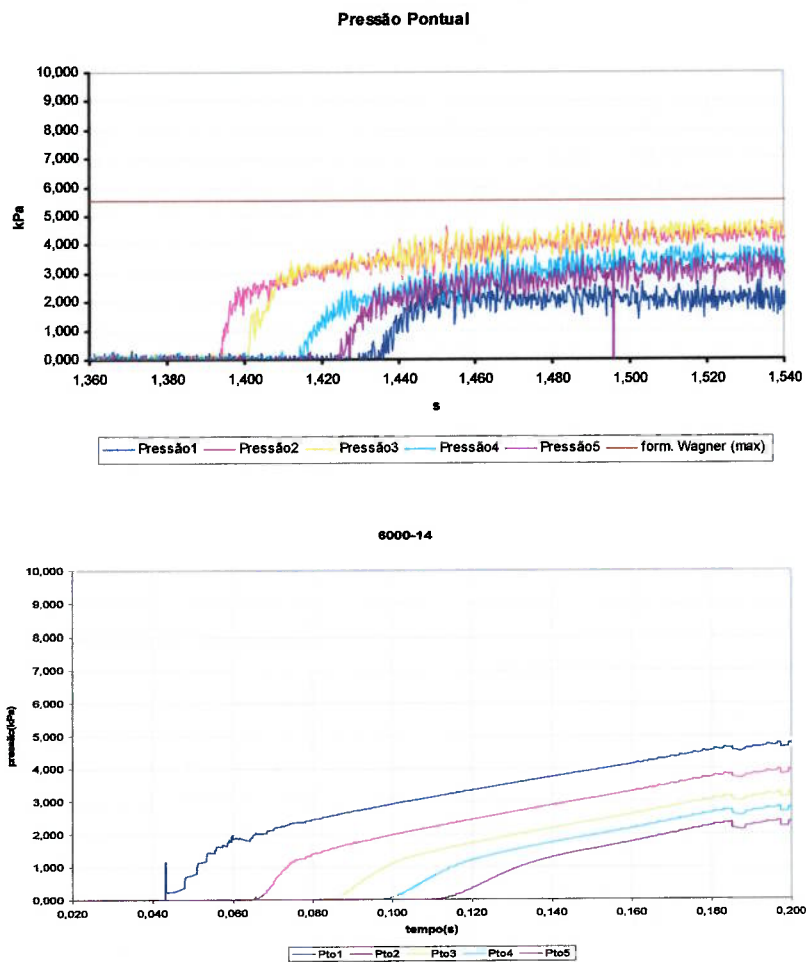


Figura 4.26: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,14$ - $V_{imp} = 1,69$ m/s

4.4.8 Modelo de Cilindro

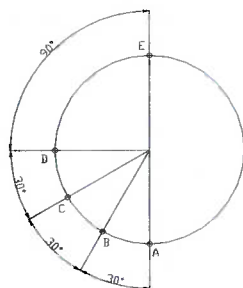
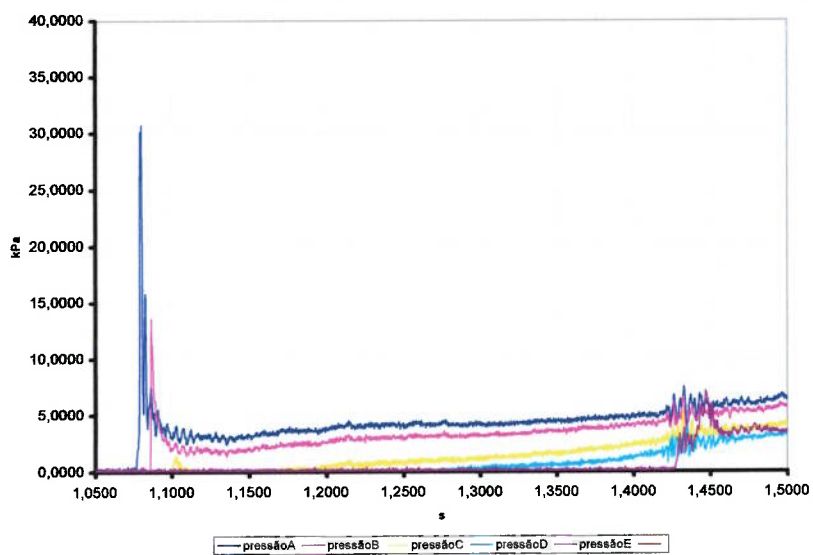
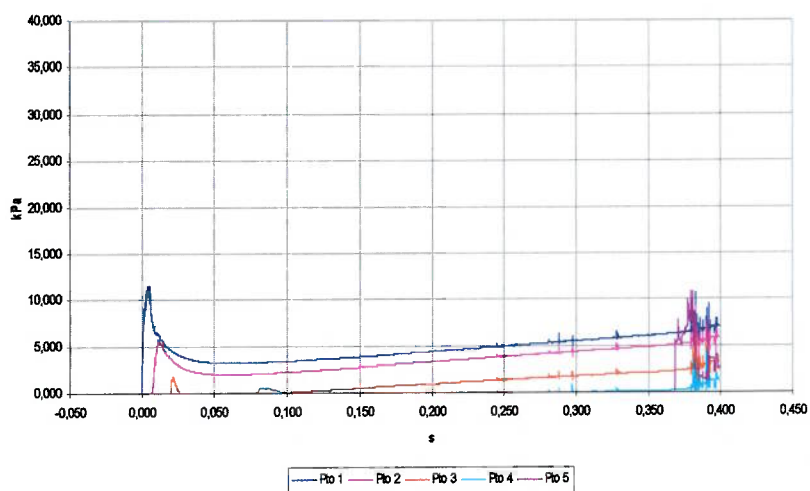


Figura 4.27: Posição do sensores



cilindro 1,49

Figura 4.28: Impacto – Cilindro – $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,49 \text{ m/s}$

4.5 Análise e Discussões dos Resultados.

As figuras 4.20 a 4.28 apresentam comparativos de alguns resultados experimentais e numéricos de série temporal de pressão pontual nos instantes de impacto na água. Os gráficos apresentam boa concordância qualitativa dos resultados, com maior diferença no caso do impacto da cunha de $\beta=15^\circ$ e em menor grau, na cunha de $\beta=30^\circ$. O método numérico detectou os picos de pressão de impacto nos modelos de cunha de $\beta=30^\circ$ e no cilindro, e picos na cunha de $\beta=15^\circ$ nos sensores superiores e também mostrou a não ocorrência de pico no caso da cunha de $\beta=60^\circ$. Já no caso da cunha de $\beta=45^\circ$, o ensaio experimental registrou um pequeno pico de pressão, enquanto que o método numérico registrou uma elevação abrupta da pressão, porém sem um pico definido. Quantitativamente, o método numérico apresenta resultados de pressão próximos dos valores experimentais nos casos de cunha de $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$, divergindo para os casos de cunhas de $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$.

Com relação ao impacto no cilindro, o comportamento das curvas experimentais e numéricas de pressão apresentam um pico pronunciado de alta frequência seguido de um atenuamento rápido até a pressão hidrostática, nos picos próximos à base do cilindro, de acordo com os resultados de Ming & Li (1997). Os resultados de série temporal também detectaram um pico de pressão no sensor de posição E, que corresponde ao efeito da água cobrindo a parte superior do cilindro após a imersão completa deste.

Um fato observado é que os resultados numéricos não apresentaram um pico pronunciado de alta frequência como os verificados nos resultados experimentais,

porém na prática, por ter duração muito pequena, da ordem de milésimos de segundo, estes picos não causam carregamento nas estruturas marítimas. A carga de *slamming* é devido ao efeito da pressão no tempo, ou seja, a integração da pressão no tempo, como verificado por Shibue et. al. (1994).

Os resultados experimentais e numéricos demonstraram o efeito do ângulo de *deadrise* β para uma mesma velocidade de impacto. A figura 4.29 ilustra a pressão pontual adimensional obtida experimentalmente no sensor na posição mais inferior da cada cunha para uma mesma faixa de velocidade de impacto, em torno de $V_{imp}=1,90\text{m/s}$. O pico de pressão é nítido para cunhas de $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$, sendo menor para este último, quase imperceptível para $\beta=45^\circ$ e desaparece para a cunha de $\beta=60^\circ$, cujo sensor praticamente registra apenas a pressão hidrostática.

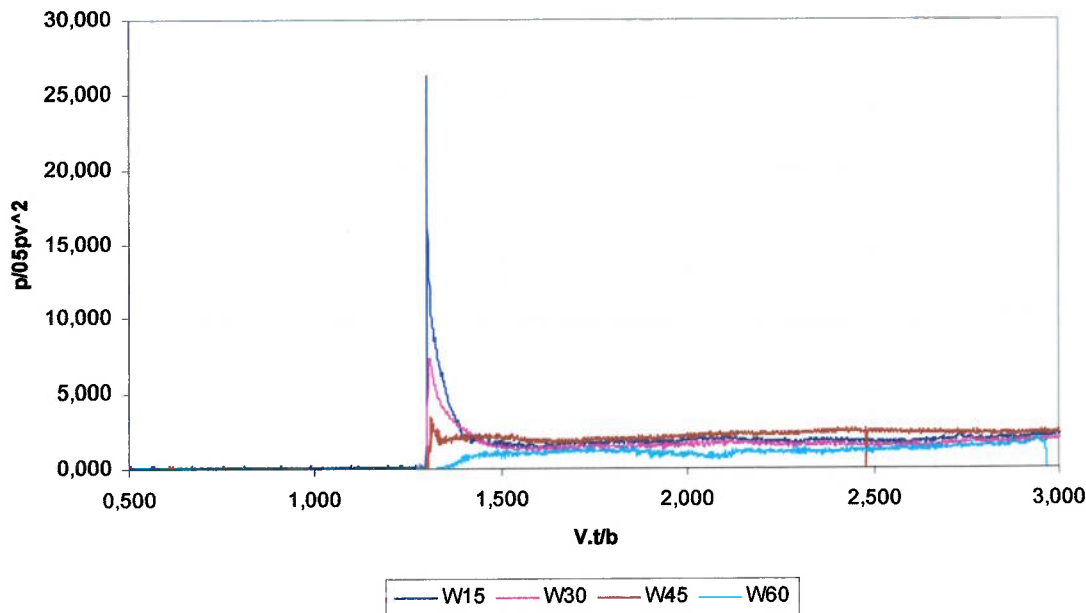


Figura 4.29: Pressão pontual em função do ângulo β para $V_{imp} = 1.90$ m/s

Comparando-se os resultados de pressão com a máxima pressão esperada pela fórmula de Wagner, equação (5) indicada juntamente com as curvas medidas

experimentalmente, pode-se verificar que os resultados experimentais são concordantes com a fórmula de Wagner para ângulos de $\beta=15^\circ$, figura 4.20, e $\beta=30^\circ$, figura 4.22, sendo nitidamente inferiores à fórmula de Wagner para ângulos de *deadrise* maiores, $\beta=45^\circ$, figura 4.24, e $\beta=60^\circ$, figura 4.26. Resultados semelhantes também foram obtidos por demais pesquisadores e são explicados hipótese assumida na fórmula de Wagner onde é feita a aproximação por placa plana, o que fornece bons resultados para valores de β pequenos e superdimensionados para β grandes.

Observando-se a figuras 4.20, representando a série temporal de pressão de impacto simétrico da cunhas de $\beta=15^\circ$, as pressões de impacto medidas nos pontos P1 a P5, percebe-se que os resultados mostram séries temporais onde, após um aumento brusco no instante inicial do impacto, a pressão decai rapidamente para valores muito menores. As séries temporais registradas nos diferentes pontos são muito semelhantes. Associado a esta distribuição de pressão ao longo da envergadura da cunha, conhecido como distribuição de pressão do tipo Wagner, temos um acentuado pico de pressão ocorre na base do spray (*spray root*), que se desloca na direção da quina lateral da cunha à medida que o modelo imerge. A figura 4.30 ilustra a distribuição de pressão teórica de Wagner, equação (4), para a cunha de $\beta=15^\circ$, comparada com os resultados numéricos e experimentais para a $V_{imp}=1,32$ m/s. Os resultados mostram boa coerência com a distribuição teórica, apesar do pico de pressão na raiz do *spray* do método numérico ser inferior ao esperado.

Na Figura 4.22, cunha de $\beta=30^\circ$ em impacto simétrico, o comportamento das pressões medidas apresentam características semelhantes ao do caso anterior (Figura 4.20, cunha de $\beta=15^\circ$), exceto a magnitude do pico, que é muito inferior para $\beta=30^\circ$.

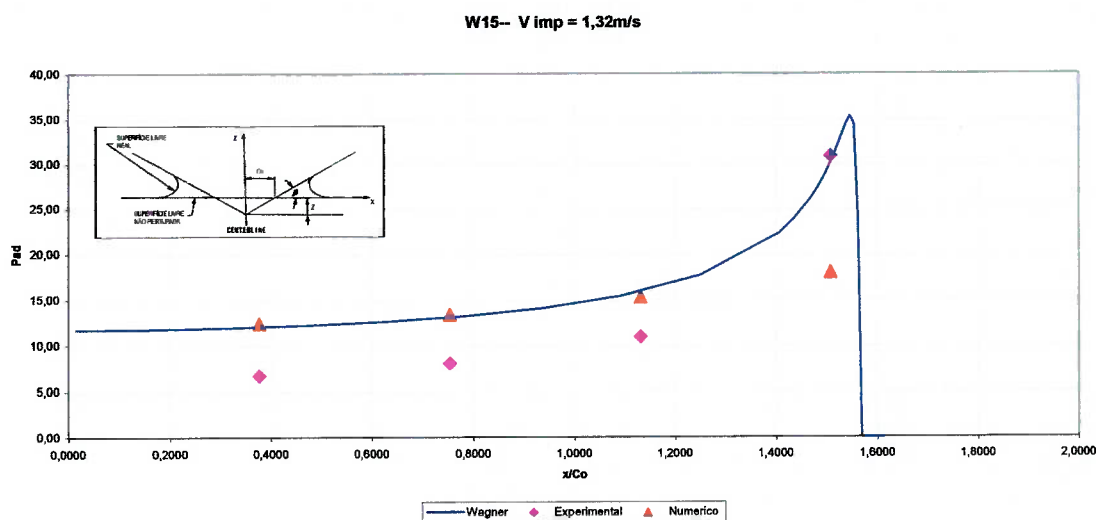


Figura 4.30: Distribuição de pressão $\beta = 15^\circ - V_{imp}=1,32\text{m/s}$

A figura 4.31 mostra a distribuição de pressão teórica, experimental e numérica para a cunha de $\beta=30^\circ$ para a velocidade de impacto de $V_{imp}=1,53\text{ m/s}$. Os resultados obtidos acompanham a distribuição teórica de Wagner, porém apresentando menores valores de pressão. A distribuição de pressão do tipo Wagner ocorre em cunhas com ângulo de *deadrise* pequenos, e os resultados para as cunhas de $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$ estão de acordo com os publicados pelo Takemoto (1984a, 1984b) e resultados previstos pela formulação de Wagner (1931).

Os resultados de série temporal para cunha de $\beta=45^\circ$ são mostrados na Figura 4.24. Neste caso, $\beta=45^\circ$, o pico de pressão devido ao impacto é pouco perceptível, caracterizando uma distribuição uniforme, o que está de acordo com os resultados de Cheng (1995). Além disso, vale ressaltar que para os pontos distantes ao pico da cunha, tais como P4 e P5, verifica-se claramente o efeito do esforço hidrostático. A figura 4.32 a distribuição de pressão teórica, experimental e numérica para a cunha

de $\beta=45^\circ$ para a velocidade de impacto de $V_{imp}=1,54$ m/s. Neste caso tanto a distribuição de Wagner quanto os resultados obtidos mostram a ausência de um pico pronunciado de pressão e os resultados numérico e experimental divergem mais da distribuição teórica na região da raiz do *spray*.

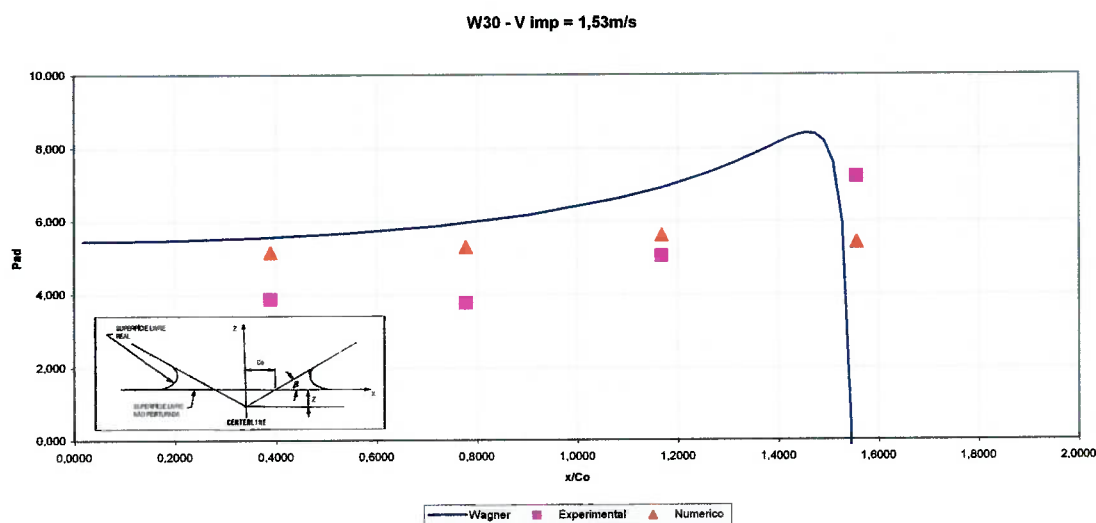


Figura 4.31: Distribuição de pressão $\beta = 30^\circ - V_{imp}=1,53$ m/s

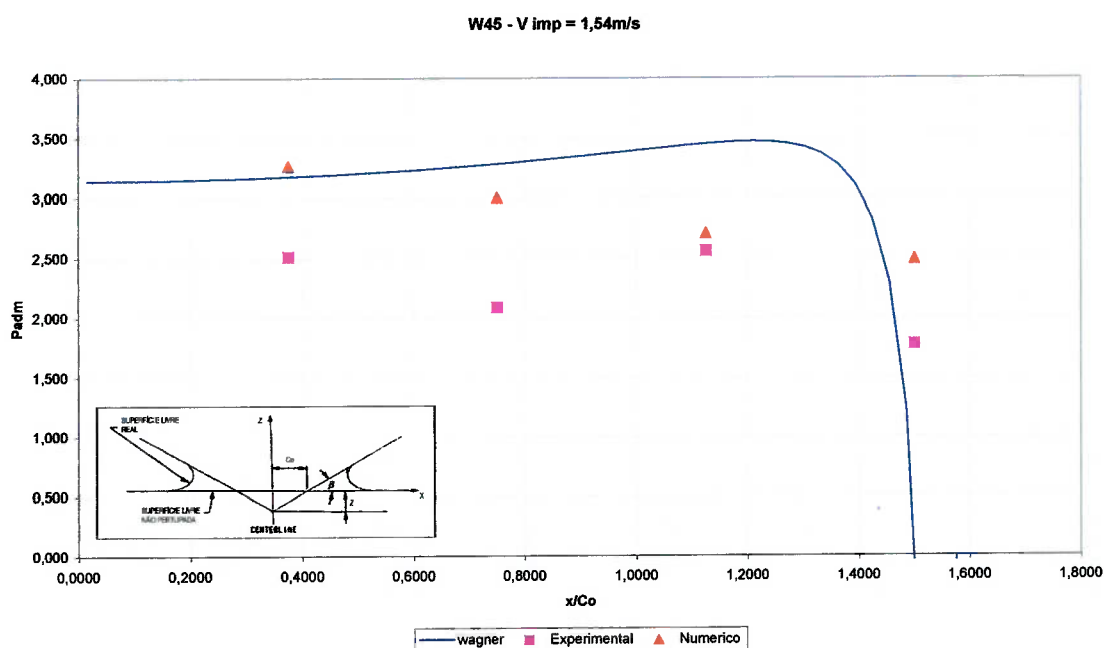


Figura 4.32: Distribuição de pressão $\beta = 45^\circ - V_{imp}=1,54$ m/s

O efeito do esforço hidrostático é ainda mais acentuado, conforme o esperado, para cunha de $\beta=60^\circ$, Figura 4.24. Neste caso, tendo em vista que o ângulo de *deadrise* é relativamente grande, o efeito de impacto é pouco perceptível: o aumento da pressão no instante inicial do impacto ocorre de uma forma muito mais suave e a distribuição da pressão experimental e numérica ao longo da envergadura da cunha se aproxima da distribuição hidrostática.

A Figura 4.33 mostra o valor de pico das pressões de impacto adimensionais medidas nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas com cunhas de $\beta =15^\circ$, 30° e 45° e a figura 4.34 ilustra o caso do impacto do cilindro. Os casos de $\beta =60^\circ$ foram descartados porque as pressões registradas aumentam suavemente com o tempo, sem picos definidos. Como já observado anteriormente, a ausência de pico de pressão de alta frequência nos resultados numéricos fez com que estes resultados para a cunha de $\beta =15^\circ$ e o cilindro ficassem bem abaixo dos valores experimentais. De acordo com os resultados, o coeficiente de pressão mantém-se praticamente constantes para as cunhas de $\beta =30^\circ$ e 45° , concluindo-se que o valor do pico da pressão de impacto é proporcional ao quadrado da velocidade, o que é de se esperar pela lei de escala (número de Froude). Entretanto, para a cunha de $\beta =15^\circ$ e para o cilindro, o coeficiente de pressão determinados experimentalmente tendem a diminuir com o aumento da velocidade (número de *Froude*), enquanto que os valores numéricos se mostraram quase constantes.

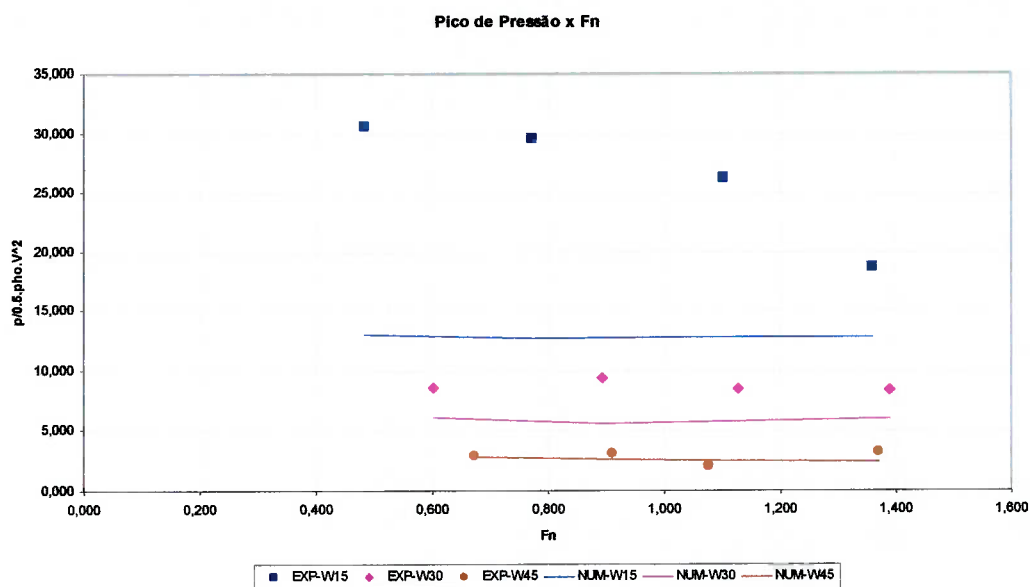


Figura 4.33: Comparativo do pico de pressões em função da velocidade.

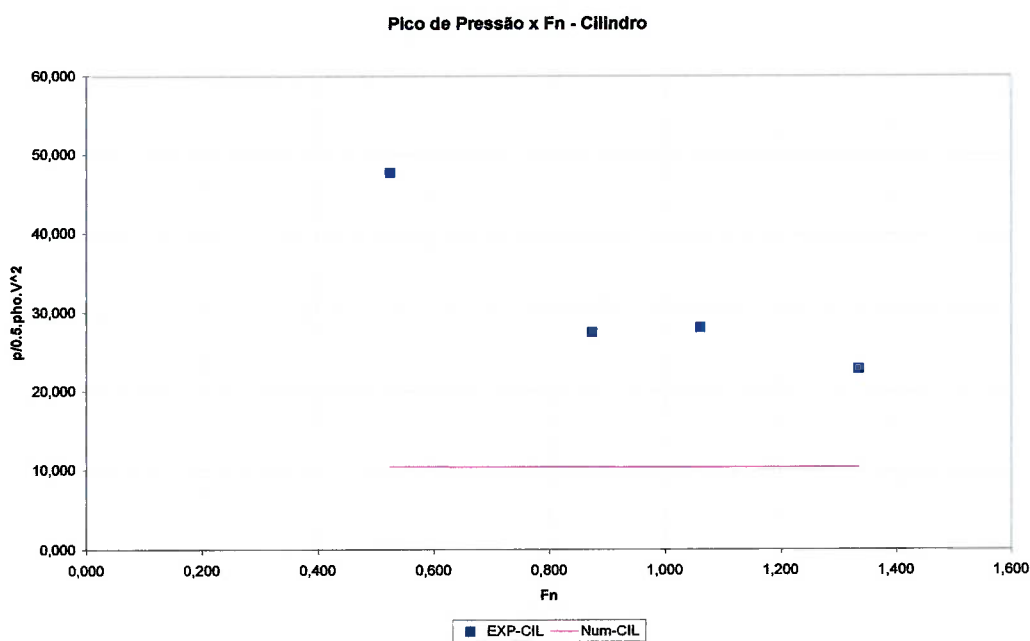


Figura 4.34: Comparativo do pico de pressões em função da velocidade.

A figura 4.35 ilustra os resultados experimentais do coeficiente de *Slamming*, CS, para diferentes velocidades de impacto, os resultados indicam um valor de CS entre de 4,15 a 3,12 com razoável dispersão típica de ensaios dinâmicos.

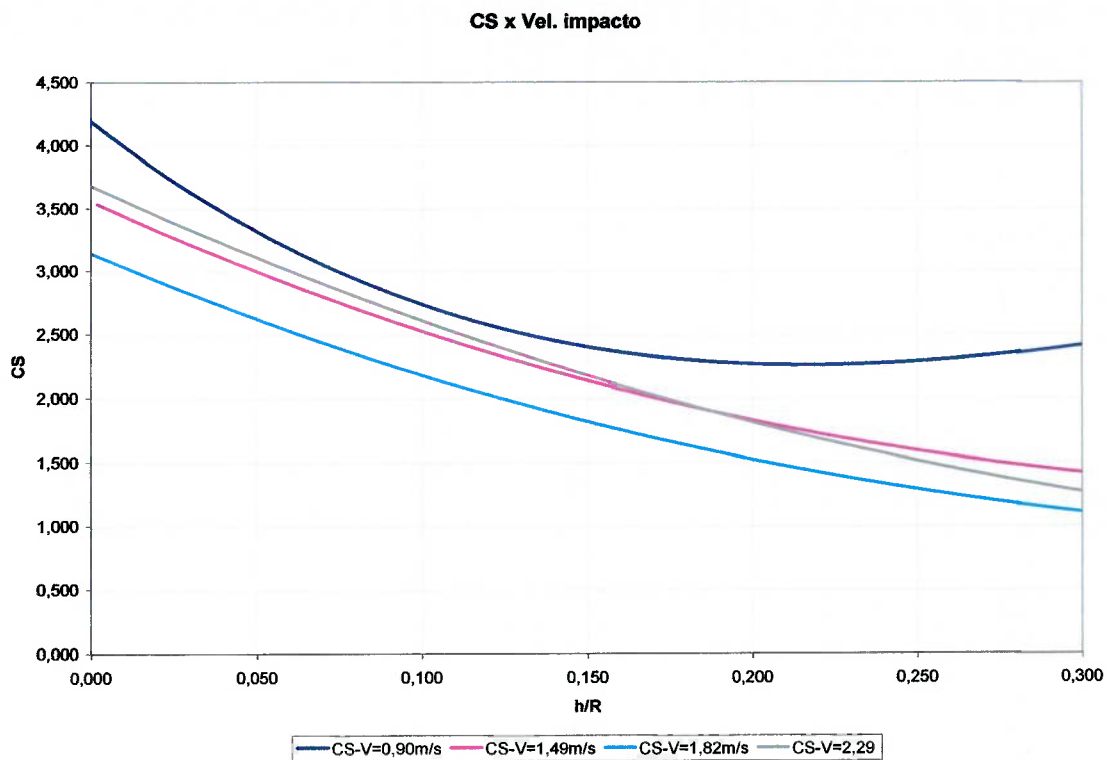


Figura 4.35: Coeficiente de *Slaming* em função da velocidade de impacto.

No caso do impacto de cilindros, pode-se observar também a ocorrência do segundo pico, que é devido ao impacto da água cobrindo o cilindro após a imersão. Ao contrário do pico de impacto inicial, que é um esforço localizado, este segundo resulta em cargas elevadas em toda extensão da superfície do cilindro.

5 Conclusões

Com os presentes resultados é possível listar as seguintes conclusões:

- a) O aparato experimental desenvolvido se mostra adequado às funções propostas a ele. Permitindo o lançamento de modelos instrumentados de diferentes seções e a alturas de quedas exigidas.
- b) Os ensaios experimentais objetivando a validação do aparato experimental mostraram boa concordância dos resultados de pressão do modelo de cunha de $\beta=45^\circ$ com resultados publicados e embora se tenha obtido valores de pico de pressão inferiores aos resultados publicados no caso do cilindro, o Coeficiente de *Slamming* obtido mostrou concordância.
- c) As vantagens do método numérico para obtenção de resultados ficaram de forma bem evidente comparado ao método experimental. O tempo de entre a preparação de dados e obtenção de resultados foi de três meses contra aproximadamente um ano do método experimental. O custo parcial de material, contando-se apenas o material adquirido, foi de aproximadamente R\$ 13000,00 contra o custo de um microcomputador, não adquirido, utilizado para o método numérico.
- d) Os resultados numéricos confrontados aos experimentais não apresentaram os picos de mais alta frequência, que apresentam as pressões mais elevadas, e que ocorrem em cunhas de pequeno *deadrise* e nos pontos próximos à base do cilindro. Embora este fato não tenha grande relevância uma vez que estes picos de pressão não tenham efeito prático.

- e) Nos casos de impacto de cunha, os resultados de pressão experimental e numérico seguem a distribuição de Wagner e atingem valores de pressões de impacto da ordem dos previstos pela fórmula de Wagner, para ângulos de *deadrise* pequenos, no presente caso, até $\beta=30^\circ$, e para ângulos maiores a fórmula de Wagner se revela cada vez mais conservadora a medida em que o ângulo de *deadrise* aumenta.
- f) Da análise dos resultados de picos de pressão determinados experimentalmente para a cunha de $\beta=15^\circ$ e para o cilindro, na forma adimensional, mostraram que estes não se mantiveram constantes. Ao invés disso, são decrescentes com o aumento do número de Froude, ou aumento de velocidade de impacto. Os resultados numéricos não demonstraram este comportamento, devendo, portanto haver maior investigação a este fato.
- g) Nos ensaios de impacto no cilindro, verificou-se a ocorrência do segundo pico. Como na ocasião da realização dos testes de validação do ensaio do cilindro, chegou-se a testar as placas laterais solidárias e observando-se a ocorrência de uma pressão de segundo pico de magnitude igual ao primeiro pico, há indícios de que o segundo pico é tão importante quanto o primeiro, no caso do cilindro, devendo ser investigado.

Considerações Finais

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento de um aparato experimental e alguns resultados experimentais, obtidos por este, do *slamming* de modelos nas formas de cilindro e cunha de ângulo de *deadrise* $\beta = 15, 30, 45$ e 60 graus. A

pesquisa foi dividida em duas partes: A primeira é o desenvolvimento do aparato experimental, partindo dos requisitos e primeiras concepções à configuração final, buscando referências e considerando as restrições particulares. A segunda parte da pesquisa foram os ensaios que foram divididos em duas partes: ensaios experimentais e simulações numéricas. O objetivo da primeira parte é a validação dos resultados obtidos no presente trabalho comparando-os com resultados experimentais já publicadas. A segunda foi verificar a qualidade dos resultados numéricos sendo corroborados pelo ensaio experimental.

Como trabalho proposto para a continuidade desta pesquisa, tem-se:

- Estudo do impacto assimétrico de cunhas;
- Estudo dos esforços da imersão total do cilindro;

São investigações inéditas tanto a nível nacional quanto internacional. A versatilidade do aparato experimental desenvolvido já permitiu alguns ensaios nesta direção.

Anexos

A1. Resultados Experimentais

As posições dos sensores são ilustradas nos respectivos casos apresentados no capítulo 5. O parâmetro β é o ângulo de *deadrise* dos modelos de cunha.

A1.1 Modelo de Cunha de 15° .

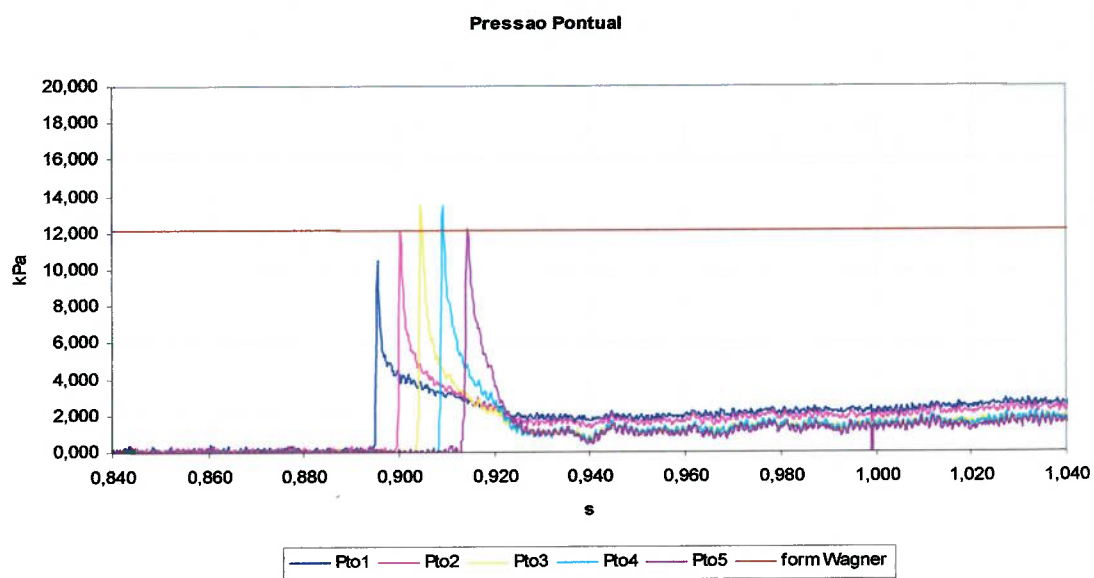


Figura A1.1: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 0,83\text{m/s}$

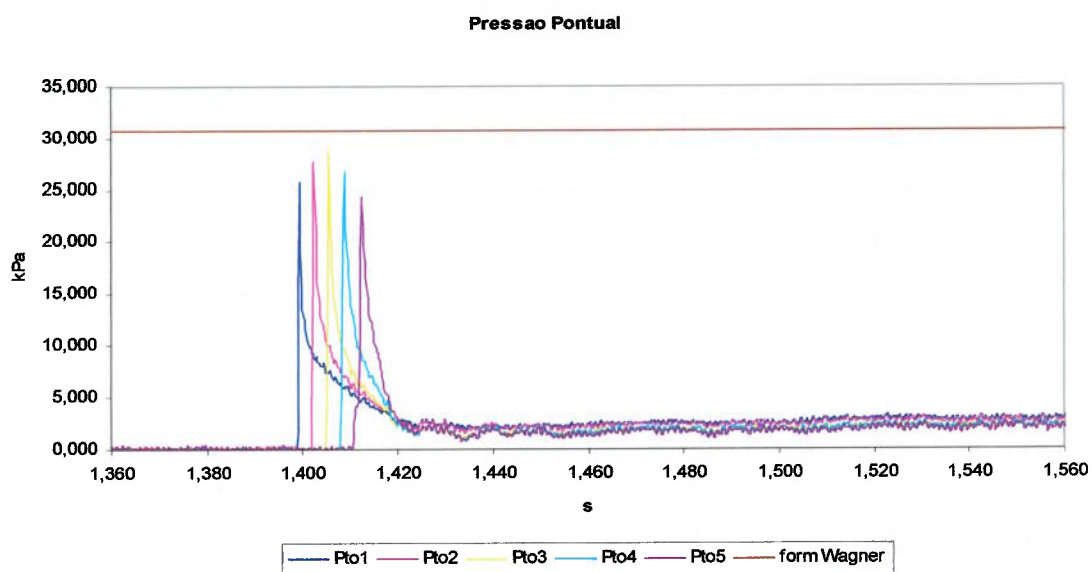


Figura A1.2: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,11\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,32\text{m/s}$

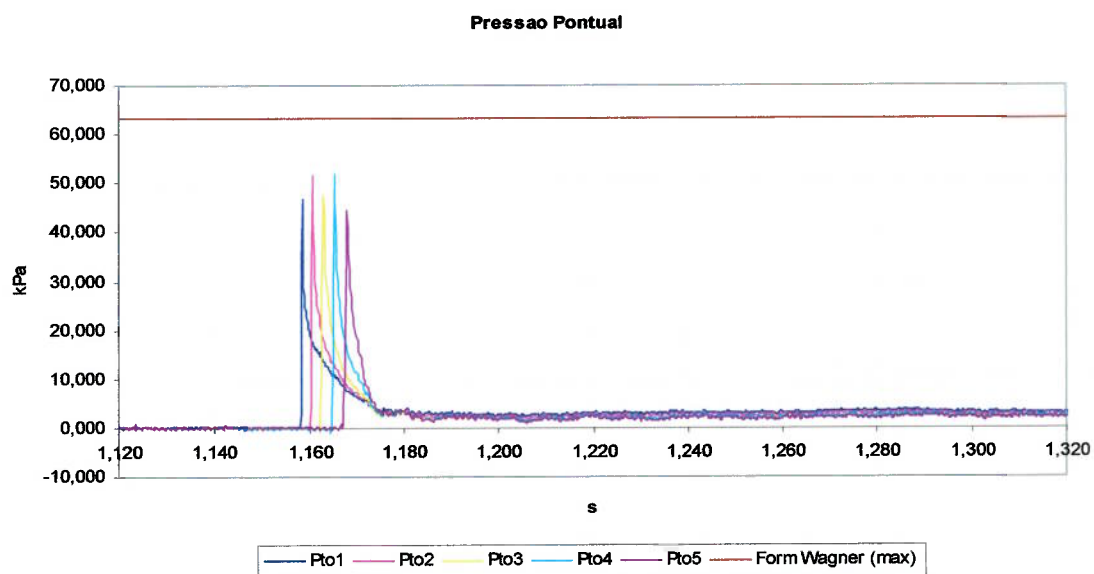


Figura A1.3: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,22\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,89\text{m/s}$

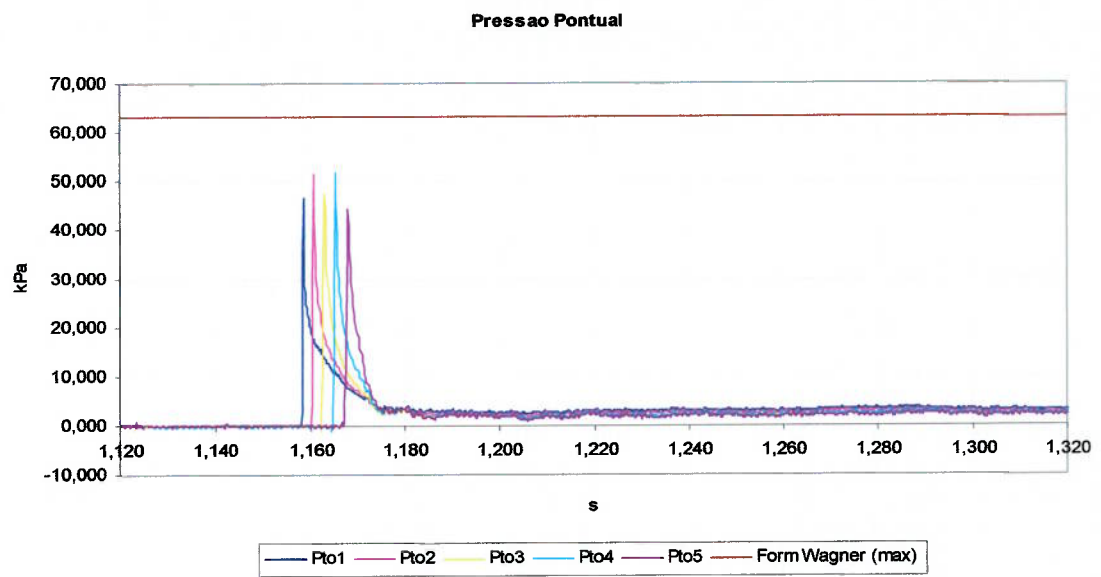


Figura A1.4: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=15^\circ$ - $\Delta h=0,33\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,33\text{m/s}$

A1.2 Modelo de Cunha de 30°

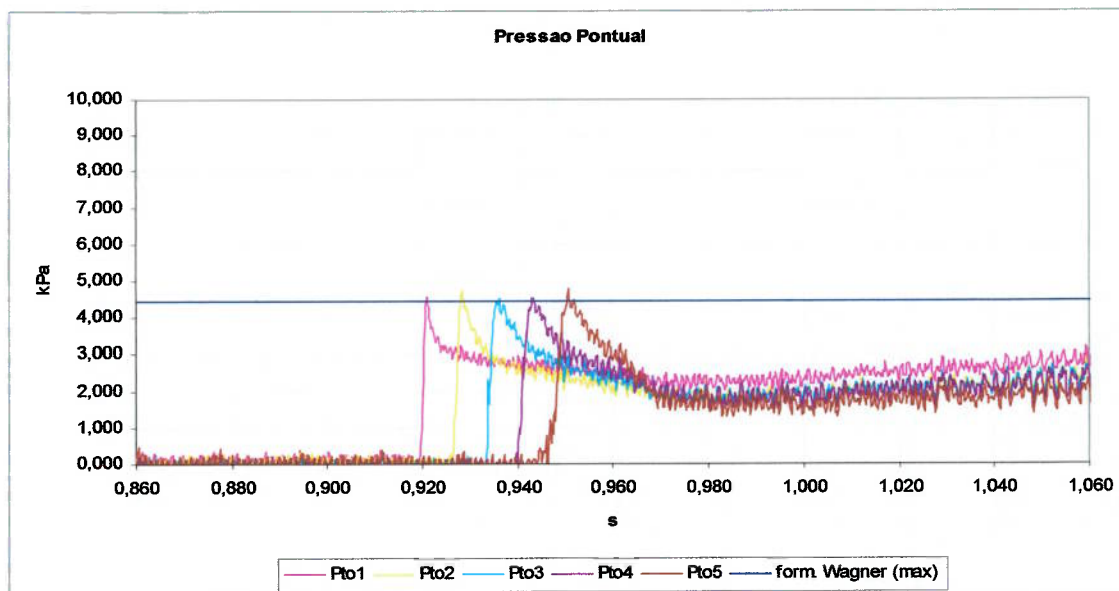


Figura A1.9: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,06\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,03\text{m/s}$

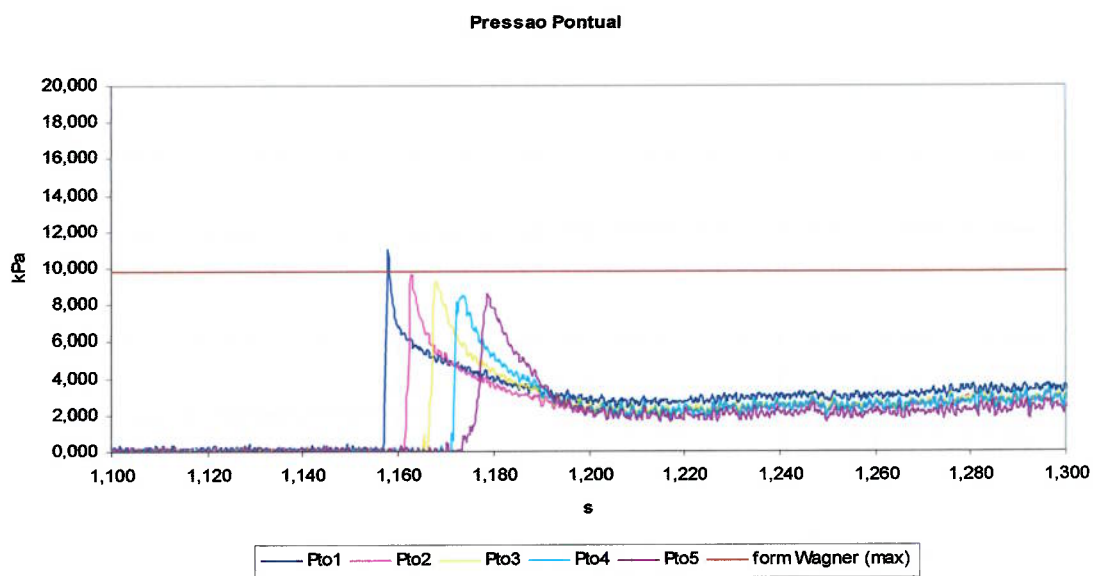


Figura A1.10: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,53\text{m/s}$

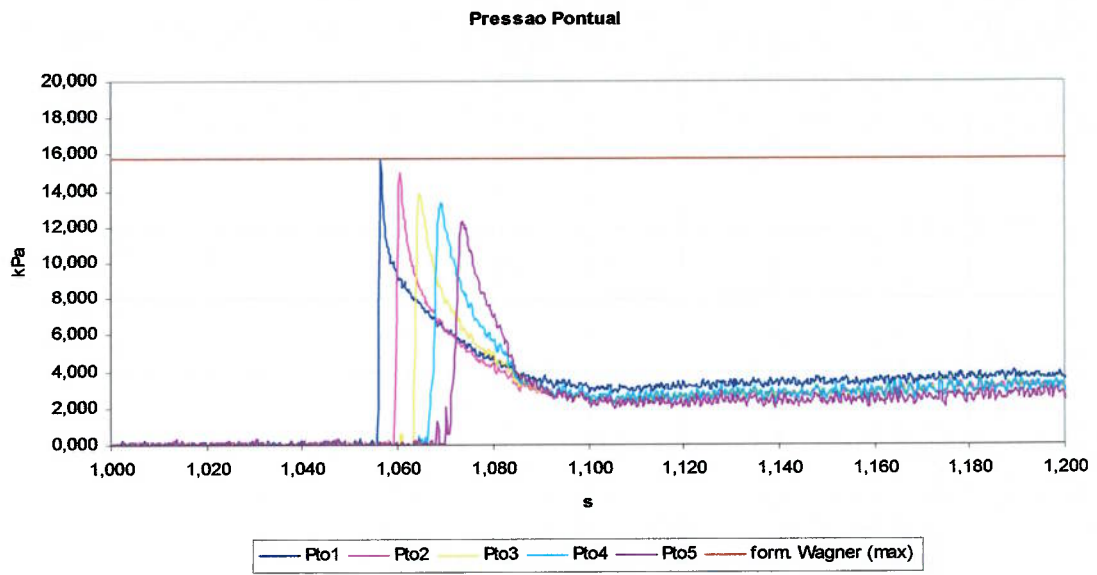


Figura A1.11: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,22\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,94\text{m/s}$

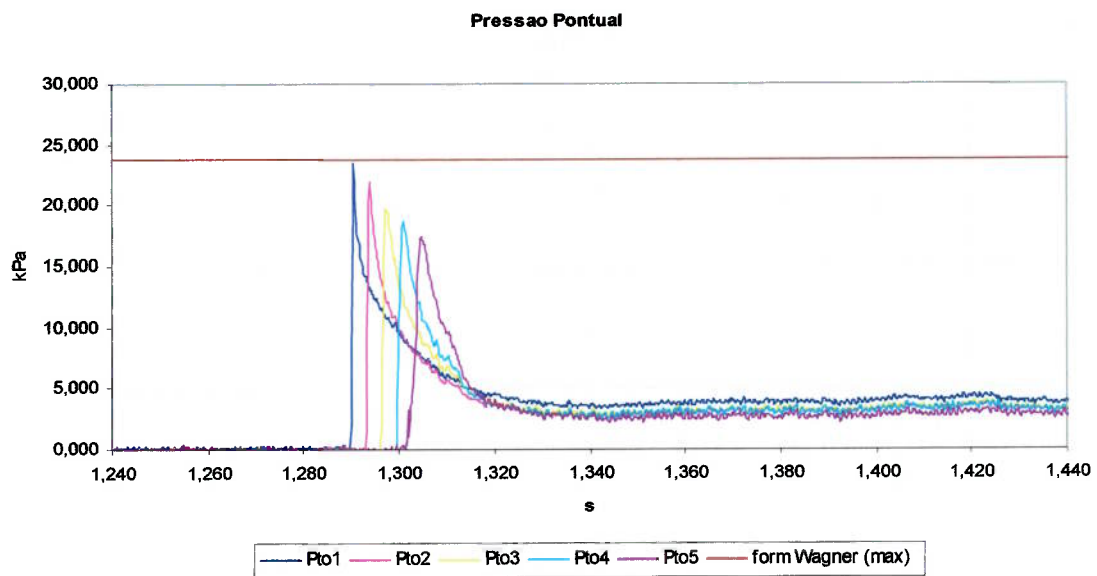


Figura A1.12: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=30^\circ$ - $\Delta h=0,34\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,38\text{m/s}$

A1.3 Modelo de Cunha de $\beta = 45^\circ$

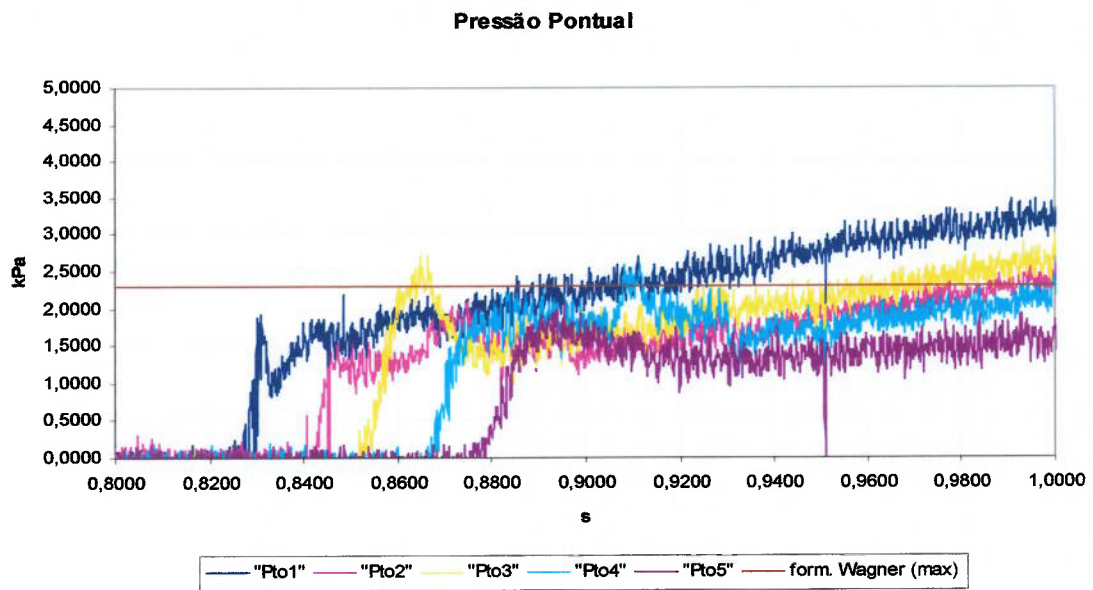


Figura A1.19: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,15\text{m/s}$

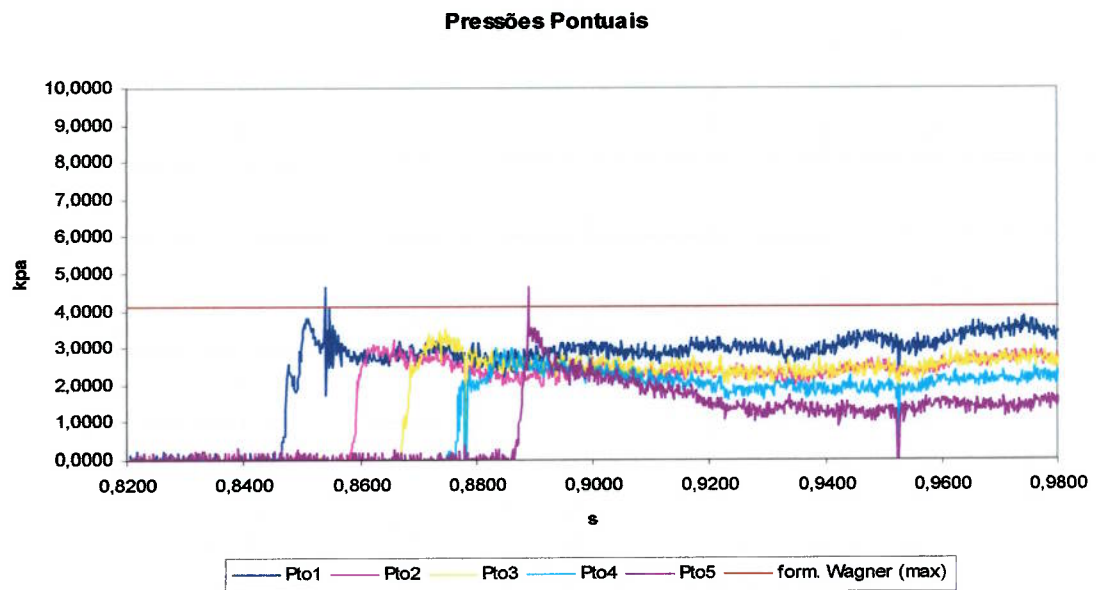


Figura A1.20: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,13\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,54\text{m/s}$

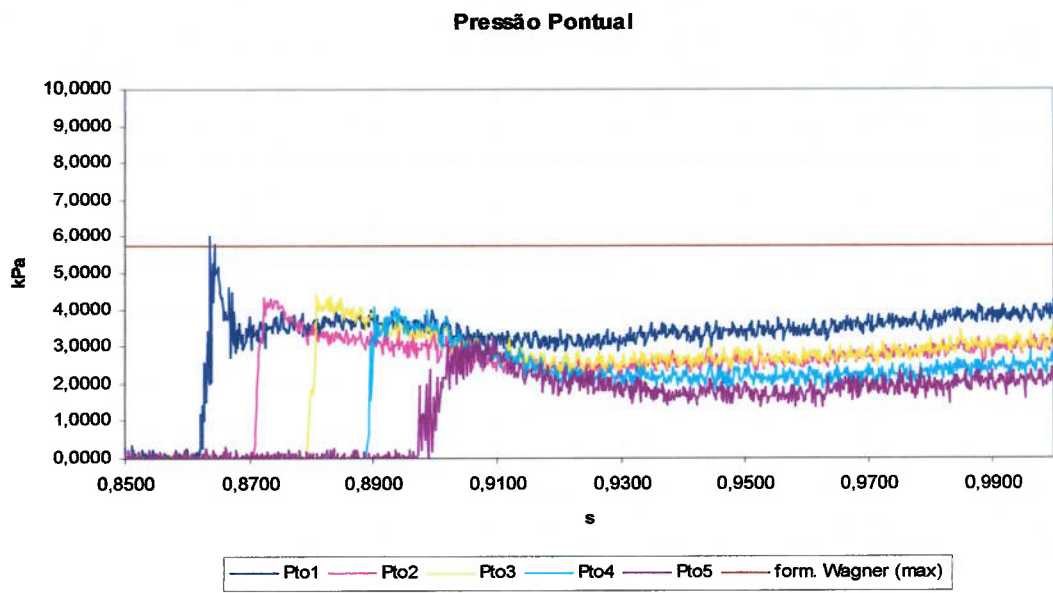


Figura A1.21: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,82\text{m/s}$

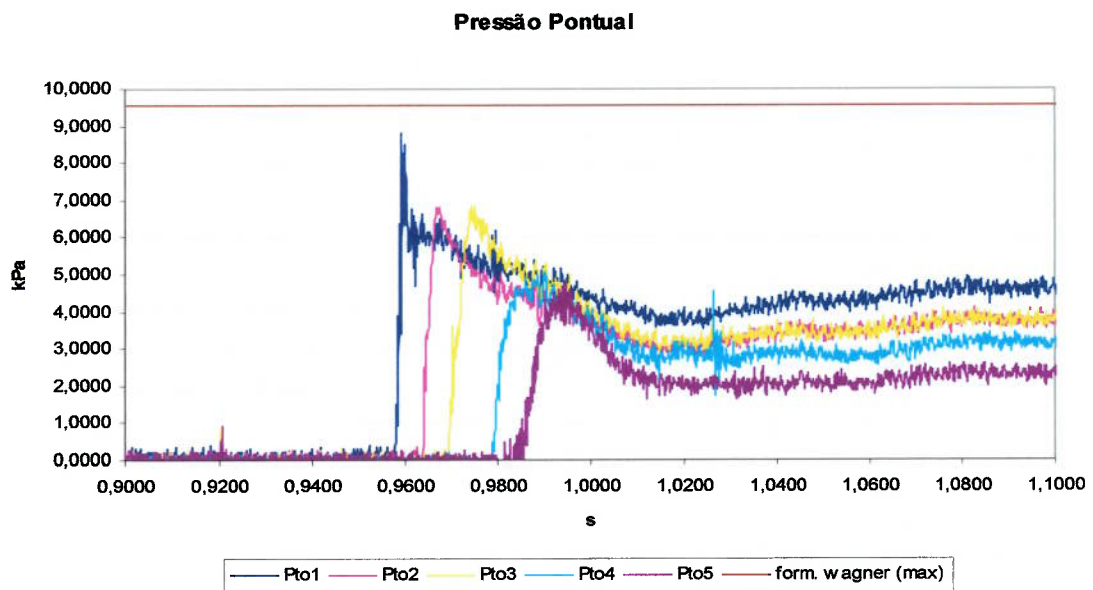


Figura A1.22: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=45^\circ$ - $\Delta h=0,32\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,35\text{m/s}$

A1.4 Modelo de Cunha de 60°.

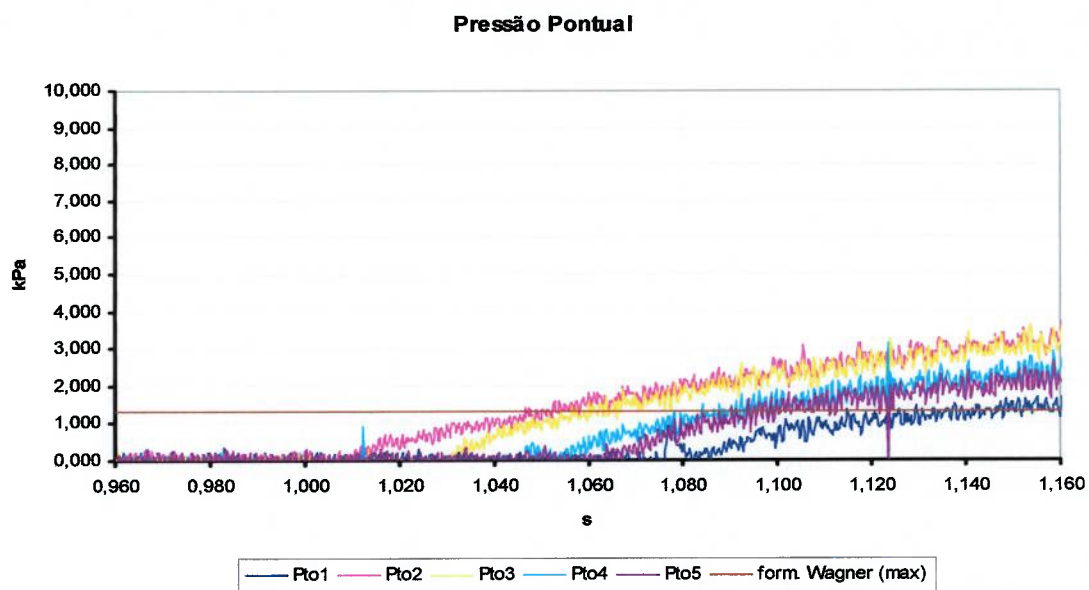


Figura A1.31: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,07\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,21\text{m/s}$

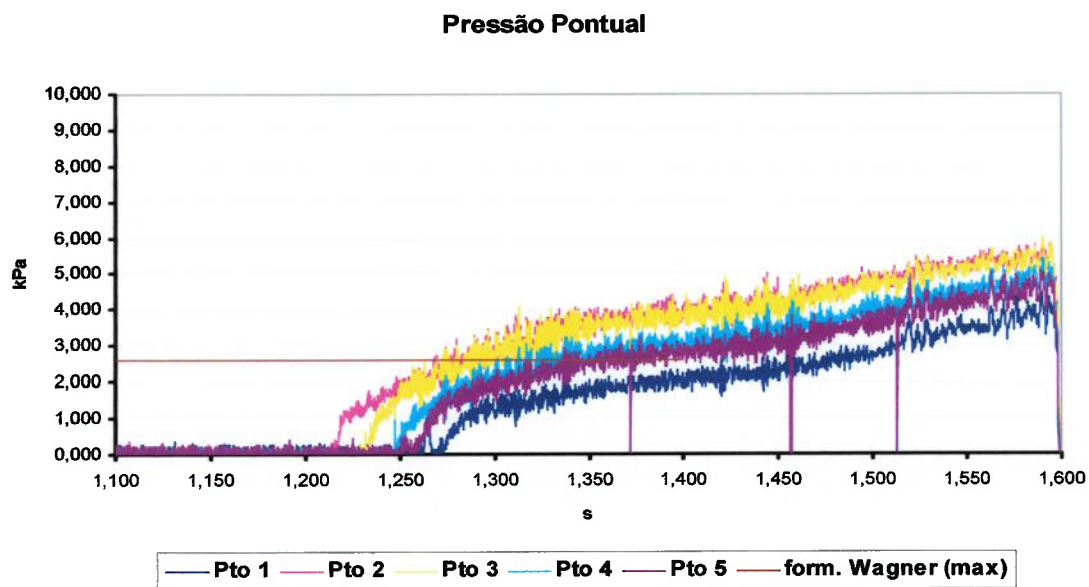


Figura A1.32: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,69\text{m/s}$

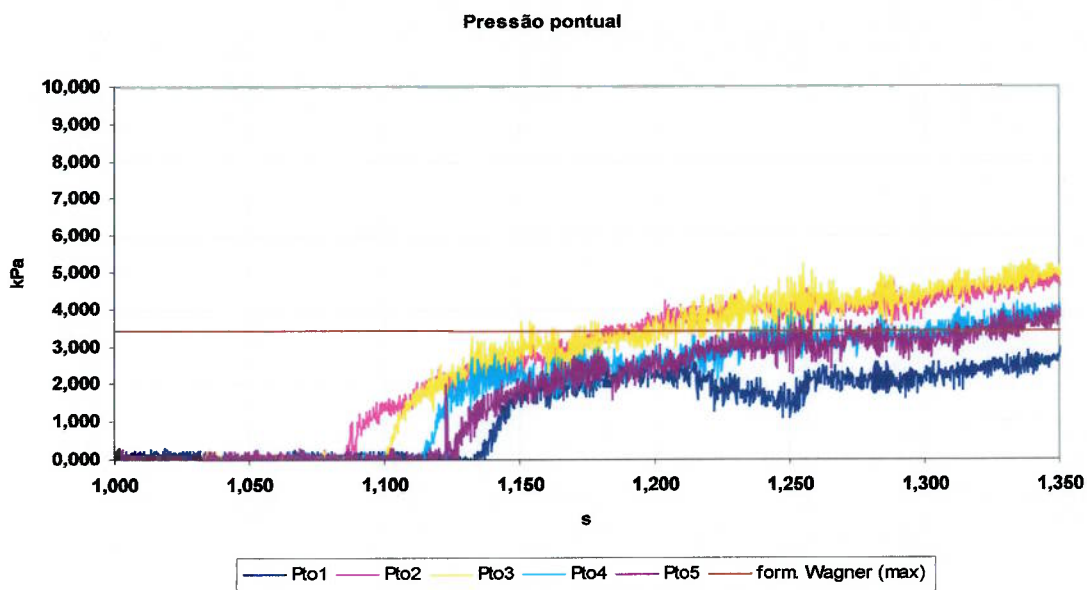


Figura A1.33: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,94\text{m/s}$

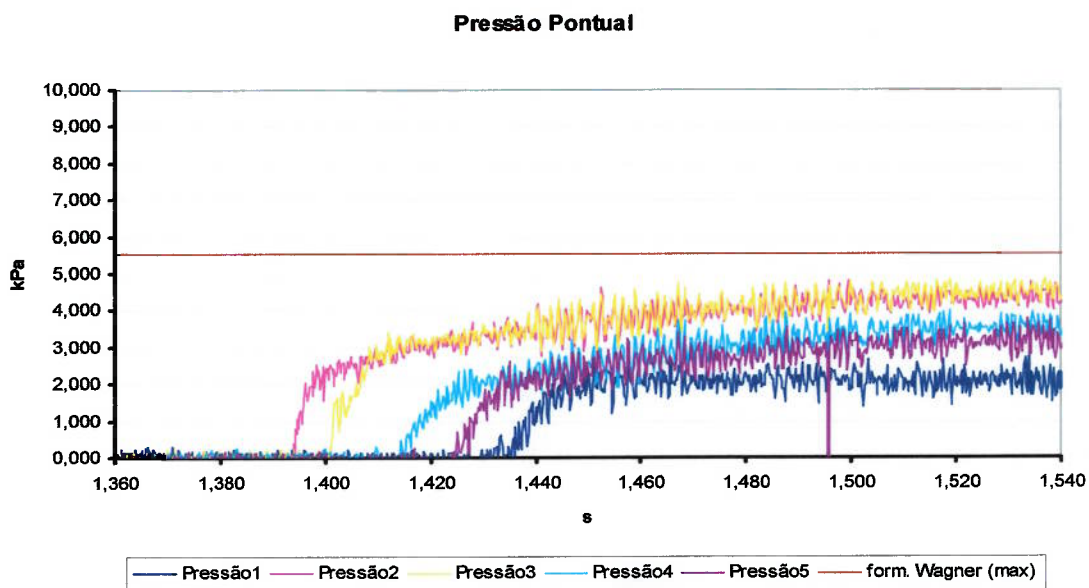


Figura A1.34: Impacto simétrico – Cunha de $\beta=60^\circ$ - $\Delta h=0,31\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,46\text{m/s}$

A1.5 Resultados para o modelo de Cilindro

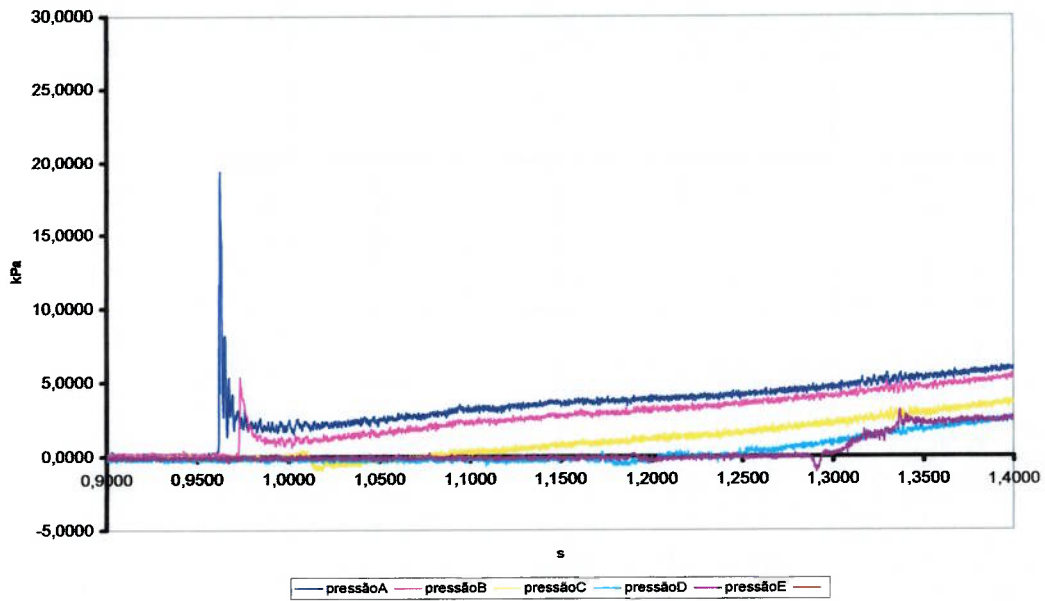


Figura A1.43: Impacto Cilindro - $\Delta h = 0,05\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 0,90\text{m/s}$

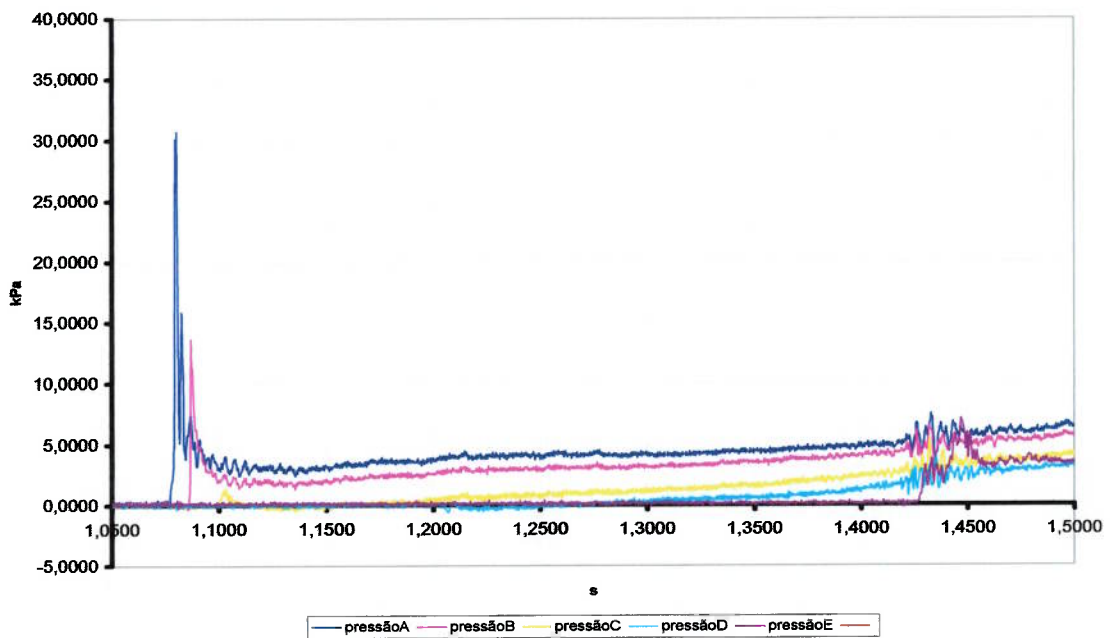


Figura A1.44: Impacto Cilindro - $\Delta h = 0,14\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,49\text{m/s}$

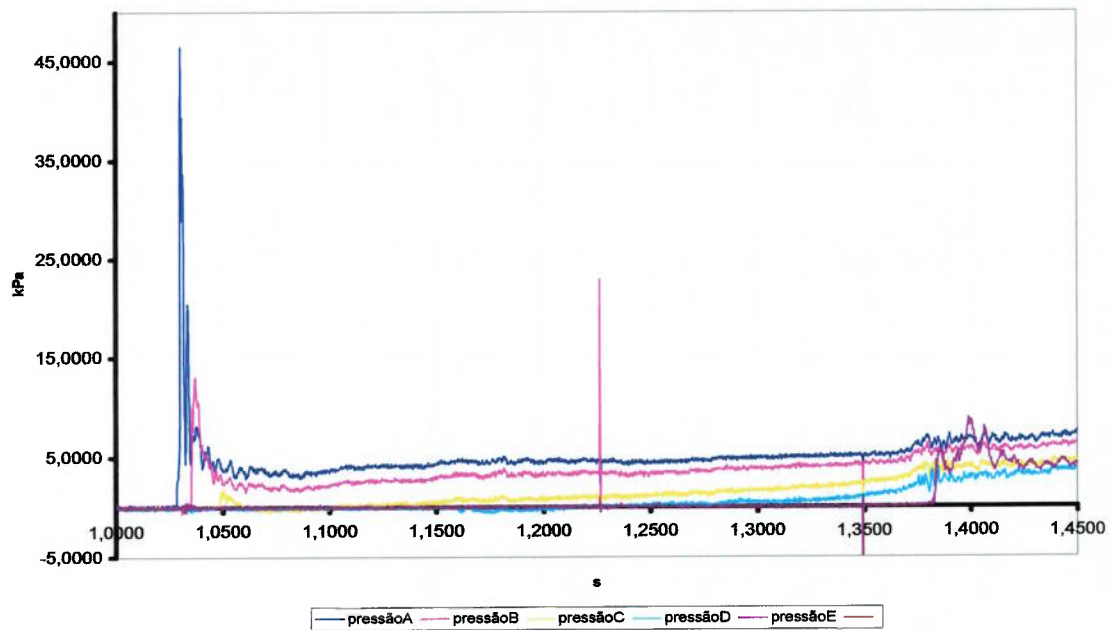


Figura A1.45: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,20\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 1,82\text{m/s}$

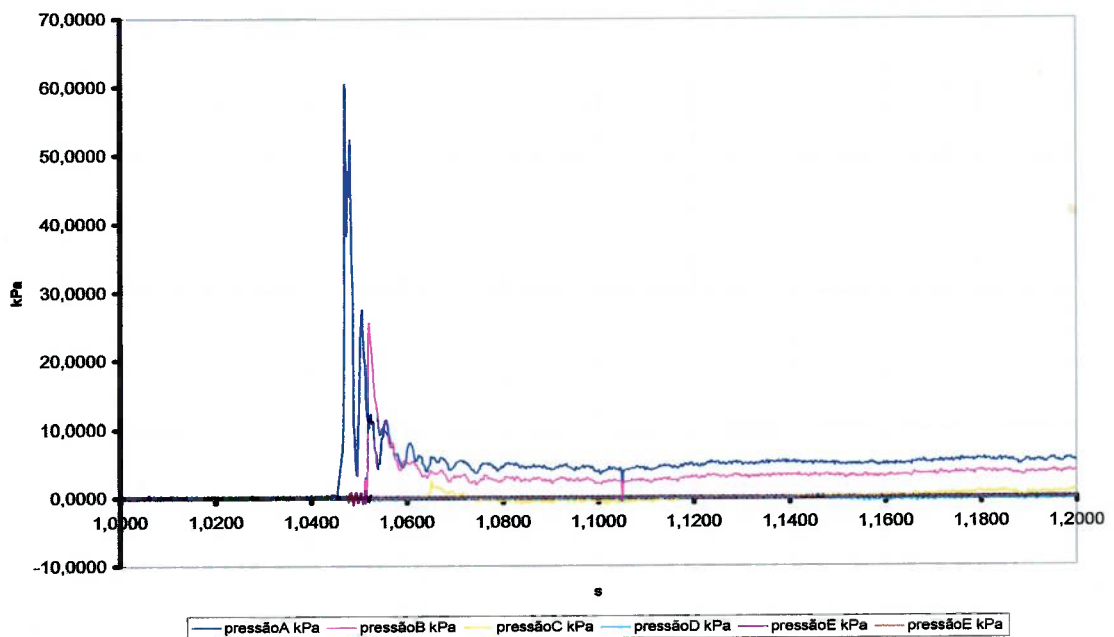


Figura A1.46: Impacto Cilindro - $\Delta h=0,32\text{m}$ - $V_{\text{imp}} = 2,29\text{m/s}$

A1. Fotos do Aparato Experimental

Figura A2.1: Detalhe do carro deslizante do lançador.

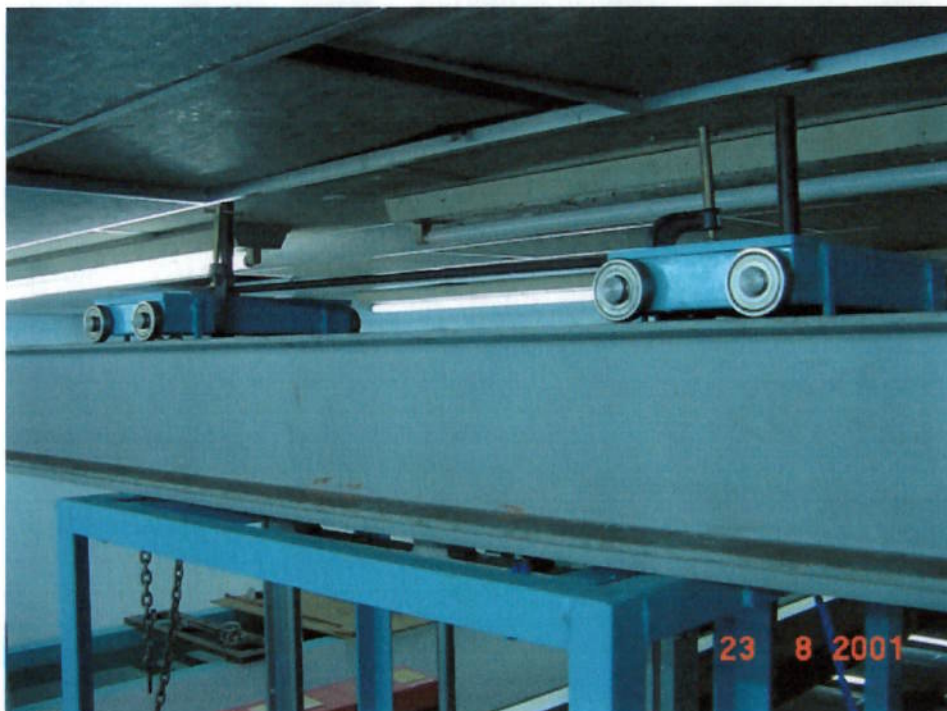


Figura A2.2: Detalhe dos carros rolantes do lançador sobre o pórtico.

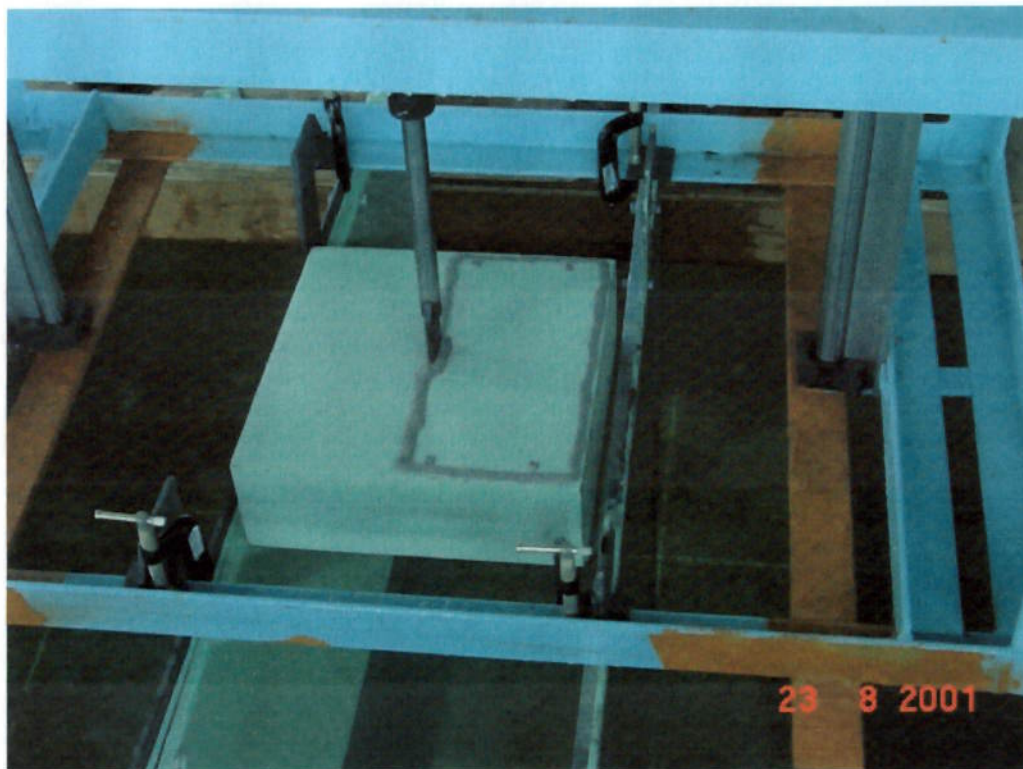


Figura A2.3: Protótipo do modelo de cunha entre os painéis: Vista de cima.

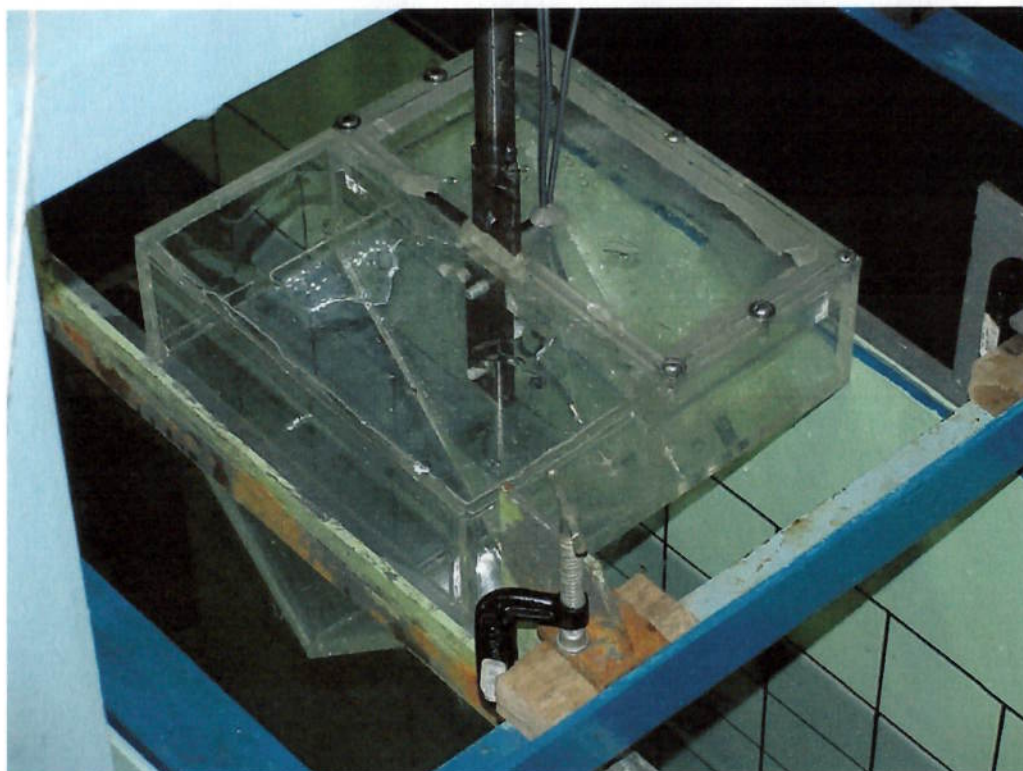


Figura A2.4: Modelo de cunha $\beta = 45^\circ$ em posição de lançamento.



Figura A2.5: Modelo de cilindro na ocasião do teste com placas solidárias.



Figura A2.6: Caixa de Observação



Figura A2.7: Caixa de Observação vista por cima.

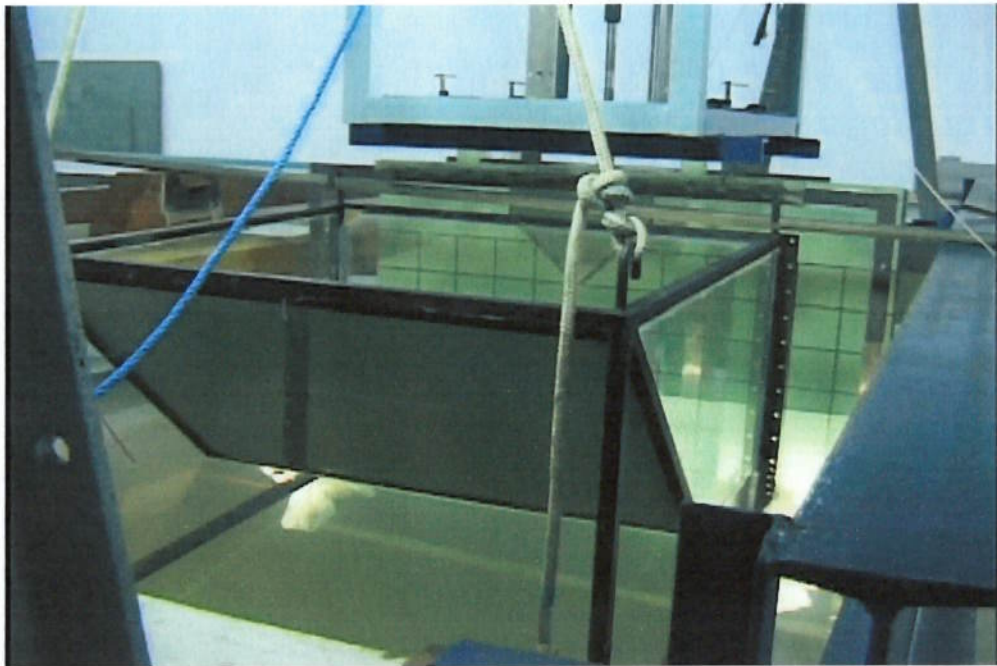


Figura A2.8: Caixa de observação e os painéis móveis.



Figura A2.9: Iluminação de superfície.

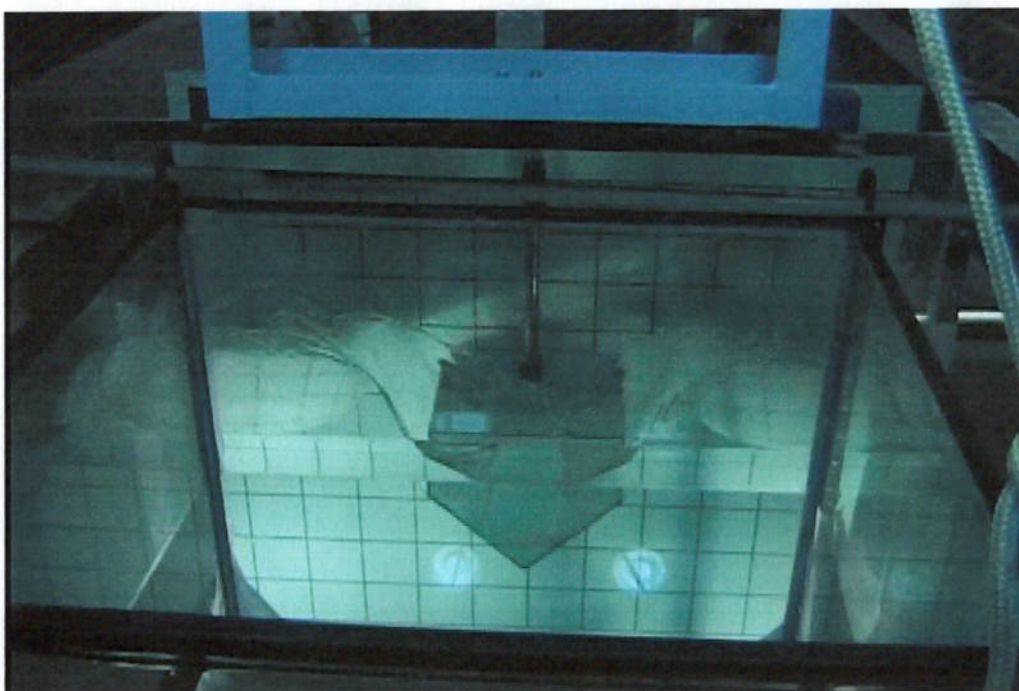


Figura A2.10: Teste de filmagem com o protótipo do modelo visto em ângulo obliquo.

Referências

- Arai M., Cheng L.Y. and Inoue Y. (1994) Journal of the Society of Naval Architects of Japan V-176, "A Computing Method for the Analysis of Water Impact of Arbitrary Shaped Bodies"
- Arai M., Cheng L.Y. and Inoue Y. (1995) Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.177, "A Computing Method for the Analysis of Water Impact of Arbitrary Shaped Bodies (2nd Report) - Application for the Optimization of Horizontal Members of Offshore Structures"
- Arai M. & Cheng L.Y. (1997) Journal of the Kansai Society of Naval Architects, No. 227, "A Method for the Optimal Design of Bow Sections Considering Slamming Behaviors"
- Arhan M. and Deleuil G. (1978) OTC 3107, "Experimental Study of the Impact of Horizontal Cylinder on a Water Surface"
- Campbell I.M.C. and Weynberg P.A. (1980) Welfson unit for Marine Technology and Industrial Aerodynamics - University of Southampton Report 440-1980, "Measurement of Parameters Affecting Slammning"
- Chapman D.R. (1979) - AIAA Journal, V-17, "Computational Aerodynamics Development and Outlook"
- Chan E.S. (1993) 3rd ISOPE 1993 Singapore, "Extreme Wave Action on Large Horizontal Cylinders Located Above Still Waterlevel"

- Cheng L.Y. (1995) Tese de Doutorado apresentada a Yokohama National University, "Evaluation of Water Impact Load by Numerical Simulation and Its Application to Ship Design"
- Chuang, S.L. (1966) - Journal of Ship Research V-10, "Experiments on Flat Bottom Slamming"
- Chuang, S.L. (1967) - Journal of Ship Research V-11, "Experiments on Slamming of Wedge Shaped Bodies"
- Chuang S.L. (1973) Naval Ship Research and Development Center Report 4095-1973, "Slamming Tests of Three Dimensional Models in Calm Water and Waves"
- Dalton C. and Nash J.M. (1976) OTC 2500, "Wave Slamming Loads on Horizontal Members of an Offshore Platform"
- Faltisen O., Kjaerland O., Notteit A. and Uinjet T. (1977) OTC 2741, "Wave Impact Loads and Dynamic Response of Horizontal Cylinder in offshore Structures"
- Hagihara K and Matsumoto S. (1980), Journal of the Society of Naval Architects of Japan V-147, "On the Strength of Forward Bottom Structure against Slamming"
- Hagihara K. and Yuhara T. (1974), Journal of the Society of Naval Architects of Japan V-135, "Fundamental Study of Wave Impact Load on Ship Bow – 1st Report"
- Hirt C.W., Nichols B.D. and Homero N.C. (1975) Los Alamos Scientific laboratory Report LA-5852, "SOLA- A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows"
- Isaacson M. and Prasad S. (1993) 3rd ISOPE 1993 Singapore, "Wave Slamming on a Horizontal Circular Cylinder"

- Kamlesh S.V., Rama M.G. and Mirosław G. (2000), *Ocean Engineering* 27, "Motions and Slamming Impact on Catamaran"
- Kumakura Y., Nagano T., Okumoto Y. and Tanida K. (1974) *IHI Engineering Review* V – 14 No. 6, "Stress and Motion Measurement on the Container Ship 'Japan Ace' in Service"
- Lewis G and MacLean W.M. (1968) - *Journal of Ship Research* V-12, "On the Cushioning of Water Impact of Entrapped Air"
- Liaw C.Y., Lam K.Y., Chan E.S., Cheong H.F. and Shankar N.J. (1996) *Engineering Structures* V-18 No.9, "Bifurcation Behaviour and Wave Slamming Force on a Compliant Horizontal Cylinder"
- Maliska C.R. (edição 1995), "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional"
- Miyagi C.H. e Cheng L.Y. (2002) *Sobena* 2002, "Desenvolvimento de um Experimento de Laboratório para Ensaio Bidimensional de Impacto Hidrodinâmico em Corpos Arbitrários"
- Miyamoto T. and Tanizawa K. (1984) *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* V-156, "A Study of the Impact Load on Ship Bow"
- Miyamoto T. and Tanizawa K. (1985) *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* V-158, "A Study of the Impact Load on Ship Bow 2nd"
- Miller B.L. (1978) *Transactions RINA* V-120, "Wave Slamming Loads on Horizontal Circular Elements of Offshore Structures"
- Ming C.L. and Li D.S. (1997) *Applied Ocean Research* 19, "Flow Visualization and Pressure Characteristics of a Cylinder for Water Impact"

- Nichols B.D. and Hirt C.W. (1981) *Journal of Computing Physics* No. 33, "Volume of Fluid Method (VOF) for Dynamic Free Boundaries".
- New A.P., Lee T.S. and Low H.T. (1993), 3rd ISOPE 1993 Singapore, "Impact Loading and Water Entrance Characteristics of Prismatic Bodies"
- Pegg N.G., Gilroy L.E. and Cumming D.W. (1991) *Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*, "Load, Motion and Structural Response Trial of the SWATH Vessel 'Frederick G. Creed'"
- Rosenfeld M., Kwak D. and Vinokur M. (1991) *Journal of Computer Physics*, V-94, "A Fractional Step Solution Method for the Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equation in Generalized Coordinate Systems"
- Rubbert P.E. (1988) *Computer Fluid Dynamics*, "On the Continued Growth of CFD in Airplane Design"
- Sarpkaya T. (1978) OTC 3065, "Wave Impact Loads on Cylinders"
- Shibue T., Ito A. and Nakayama E. (1994) *Hydroelasticity in Marine Technology*, Faltinsen et al. Eds, "Structural Response Analysis of Cylinders under Water Impact"
- Takemoto H. (1984) *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* V-156, "Water Impact test of a Wedge with Rectangular Plates and its Analysis"
- Takemoto H. (1984) *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* V-156, "Some Considerations on Water Impact Pressure"
- Thompson J.F., Warsi Z.U.A. and Mastin C.W. (edição 1985) "Numerical Grid Generation – Foundations and Applications"
- Verhagen, J.H. (1967) - *Journal of Ship Research* V-11, "The Impact of a Flat Plate on a Water Surface"

- Vinokur M. (1989) - Journal of Computer Physics, V-81, "An Analysis of Finite Difference and Finite Volume Formulations of Conservations Laws"
- Von Karman T. (1929) NACA TN321, "The Impact on Seaplane Float during Landing"
- Wagner H. (1931) NACA TM622, "Landing of Seaplanes"
- Xiaoming M., Yuming L., Dick K.P.Y. (1999), Applied Ocean Research 21, "On the Water Impact of General Two-dimensional Sections"
- Yamamoto Y., Iida K., Fukasawa T., Murakami T., Arai M., and Ando A. (1984) Journal of the Society of Naval Architects of Japan V-155, "Analysis of Structural Damages of the Fore Body of a Container Ship due to Slamming"
- Zhao R., Faltinsen O. and Aarsnes J. (1997) 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, "Water Entry of Arbitrary Two-Dimensional Sections with and Without Flow Separation"

Apêndice: Sumário de referências de ensaios experimentais

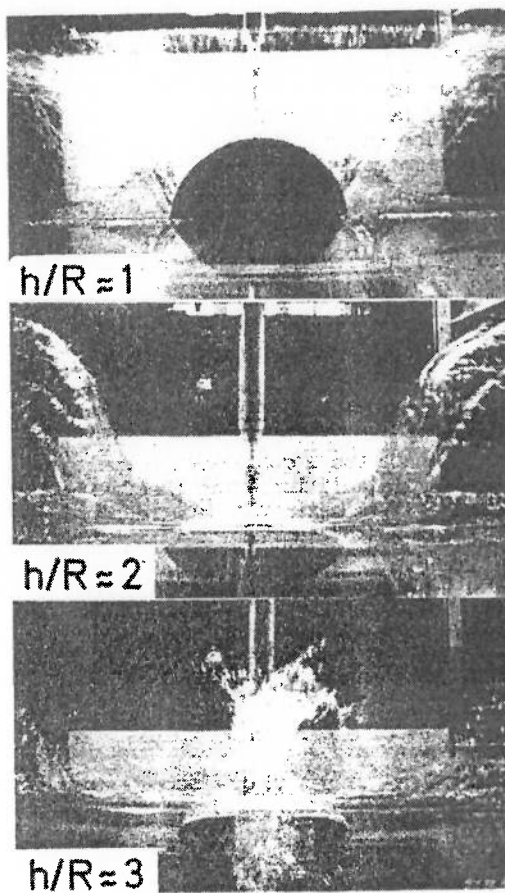
A. Flow Visualization and Pressure Characteristics of a Cylinder for Water Impact

- Autores: Ming-Chung Lin e Li-Der Shieh
- Publicação: Applied Ocean Research (1997)
- Sumário: Estudo do impacto hidrodinâmico de um cilindro usando sistema digital de imagem com um sistema de aquisição de dados para medir simultaneamente a pressão de impacto e informações do campo de escoamento. As características do escoamento são observadas por meio de partículas plantadas e de um rastreador de velocidade. Resultados de pressão são comparados com valores teóricos e experimentais.
- Modelo: Cilindros de Acrílico de diâmetro 20 e 30 cm e $L = 20$ cm com 12,5 kg.
- Acelerômetro Kyowa ASW20A
- Pressure Gage Kyowa PGM2KC - ϕ 5.5mm com f_n de 24kHz
- Conclusões: Resultados experimentais indicam que os primeiros estágios do impacto do cilindro causam mudanças na superfície livre e podem ser divididas em 3 fases: espalhamento, levantamento e separação. A pressão de impacto ocorre apenas na fase de espalhamento. Os resultado experimentais são compatíveis com os cálculos teóricos por Wagner, exceto na pressão de pico.

B. Water Impact Loads on Dynamic Response of Horizontal Circular Cylinder in Offshore Structures.

- Autores: O. Faltinsen; O. Kjoerland; A. Nottvert e T. Vinje
- Publicação: Offshore technology Conference 1977
- Sumário: Apresentação de resultados experimentais de modelos e cálculos numéricos de cargas devido a impacto hidrodinâmico em cilindros rígidos horizontais. Estimativa do coeficiente de Slamming C_s . Apresentação de resultados de cilindros elásticos representando treliças de plataformas.
- Modelo: Cilindros 2D (Al) de rigidez infinita diâmetro 20 a 35 cm, com $L=30$ a 40 cm. (ensaio de impacto)
- Conclusões: O coeficiente C_s é numericamente estimado em 3,1 para cilindros no momento do impacto, experimentalmente chegou-se a valores de 4,1 a 6,4. C_s é função da submersão, forças de flutuação são importantes. Experimentos indicaram que a força é função do número de Froude.

- Aparato:



C. Wave Slamming on Horizontal Circular Cylinder

- Autores: M. Isaacson e S. Prasad
- Publicação: 3th ISOPE (1993)
- Sumário: Estudo de cargas de impacto devido a ondas interagindo com cilindros horizontais localizados próximos a superfície livre, com resultados experimentais comparados a simulação numérica, incluindo análise da resposta dinâmica.
- Modelo: Cilindro de PVC de diâmetro 4,2 cm e $L = 30$ cm .
- Tanque de ensaio: 40 x 0,62 x 0,55 m
- Aparato:

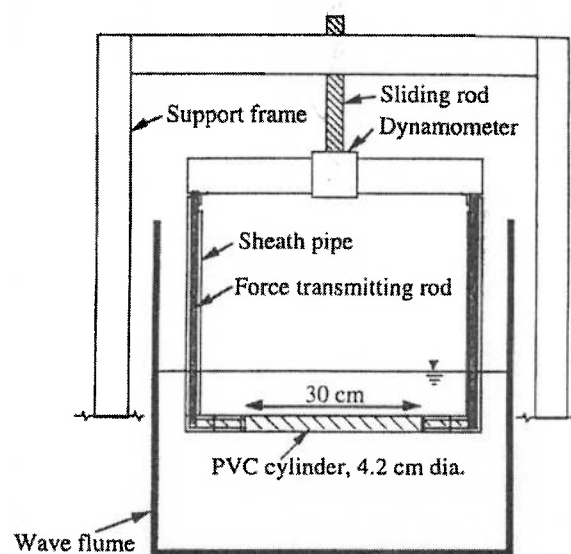


Fig. 5 Sketch of the experimental setup.

- Conclusões: Os experimentos foram conduzidos de modo a se determinar o máximo coeficiente de slammnig C_{s0} e coeficiente impulsivo C_i . Resultados dos testes com ondas de vários períodos e

alturas diferentes com elevações diferentes do cilindro levaram a uma considerável dispersão dos valores dos coeficientes. C_{so} teve variação de valores entre 3,04 a 7,79. Considerando uma correção para os efeitos de flutuação, resposta dinâmica e inclinação da SL, o valor médio obtido foi 4,29.

D. Extreme Wave Action on Large Horizontal Cylinders Located Above Still Water Level.

- Autores: Soon Chan
- Publicação: 3th ISOPE (1993)
- Sumário: Resultados de um estudo experimental da ação de ondas chocando-se em um cilindro horizontal de diâmetro grande. Registrou-se picos de pressão na faixa entre $4\rho C^2$ a $33\rho C^2$ (C - velocidade de crista da onda). Os valores mais altos foram registrados quando o perfil da onda incidente era concêntrico ao cilindro.
- Modelo: Cilindro de PVC de diâmetro 21,6 cm e $L = 29$ cm .
- Transdutor de pressão: PDCR200 - ϕ 5.5mm com f_n de 100kHz
- Tanque de ensaio: 38,5 x 0,90 x 0,60 m
- Conclusões: Teorias desenvolvidas de impacto de ondas relativas a cilindros finos em relação as dimensões da onda não são aplicáveis. Componentes da forças de impacto horizontais aparentam ter tão dominantes quanto as componentes verticais. Nos casos analisados, as mais críticas situações quanto a força ocorreram quando uma frente de onda concâva converge para o cilindro, sendo concêntrica a ele, deixando muito pouco ar preso no impacto, neste caso a pressão é altamente impulsiva sobre uma larga porção do cilindro, de aproximadamente 90° . Picos de pressão atingem de $4\rho C^2$ a $33\rho C^2$ em escala de tempo de $0,001T$ (T – período de onda). O máximo valor da

força de impacto foi $8,6\rho C^2R$ por unidade de comprimento, o que é muito elevado comparado aos valores de coeficientes de Slamming para cilindros finos.

- Aparato:

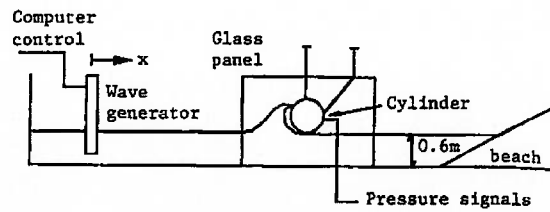


Fig. 1 Layout of experiment.

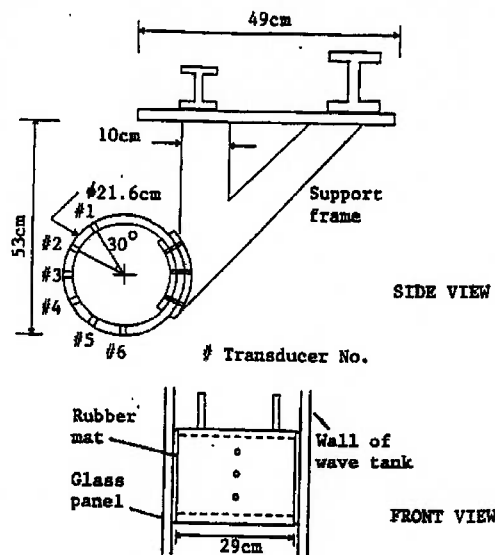


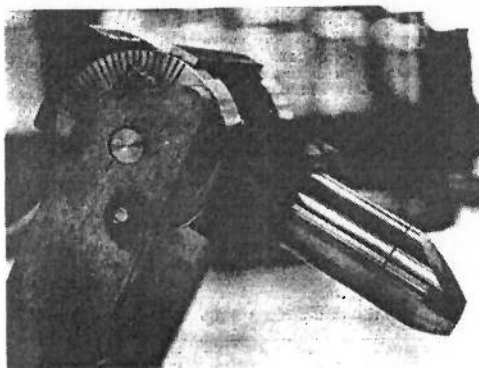
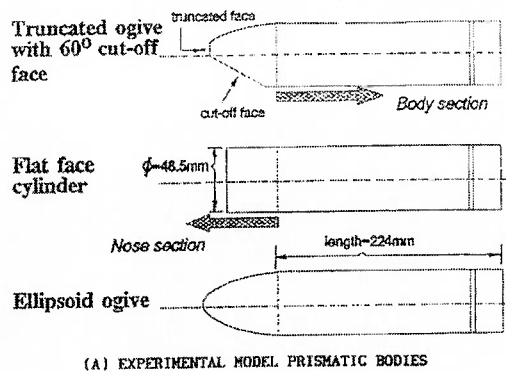
Fig. 2 The cylinder model

E. Impact Loading and Water Entrance Characteristics of Prismatic Bodies

- Autores: New, A. P.; Lee, T.S. e Low H.T.
- Publicação: 3th ISOPE (1993)
- Sumário: Estudo do impacto e características hidrodinâmicas da penetração de corpos prismáticos na água, com variação de forma e ângulo de entrada. Ensaio experimental com lançador de ar comprimido e corpos em formato de projéteis. Registro de imagens, coeficiente de impacto C_i , formação de spray e ocorrência de cavitação.
- Modelo: Corpos prismáticos com nariz de diferentes configurações com $\phi = 48,5$ mm e $L_{\text{corpo}} = 224$ mm. Nariz de configuração elipsóide, face chata e truncada com corte reto.
- Acelerômetro de quartz triaxial PLB 306A06 com capacidade de medição em 3 eixos montado no dentro do nariz.
- Conclusões: Foram levantados coeficientes de impacto máximo para cada modelo de nariz e diferentes ângulos de entrada. Constatou-se nos experimentos, fenômenos como espalhamento (espirro), cavidade de ar acoplada. O acelerômetro detecta a força de desaceleração na direção dos 3 eixos axiais determinando-se o coeficiente de impacto C_i . Dos resultados, observou-se (1) O carga de impacto é linearmente dependente do ângulo de entrada com a vertical. (2) A carga de impacto varia inversamente com o cubo do diâmetro. (3) A carga de impacto reduz com o aumento de L/d (razão L- diâmetro). (4) Cargas de impacto são

proporcionais ao quadrado da velocidade, a área da superfície do espalhamento e a cavidade formada.

- Aparato:

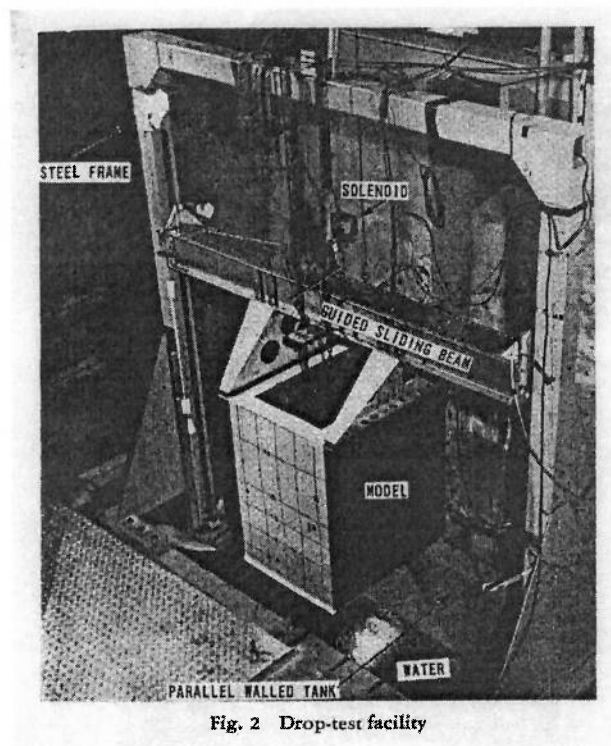


F. Experiments on Slamming of Wedge Shaped Bodies

- Autores: Sheng-Lun Chuang
- Publicação: Journal of Ship Research V-11-3 (1967)
- Sumário: Ensaios experimentais de Slamming de corpos rígidos através da queda de modelos de aço de fundo chato e fundo em cunha. Altura de queda de 76,2 a 190,5 mm.
- Modelo: 6 Corpos de aço com fundo plano e fundo em cunha com ângulos de elevação de 5° a 15° , assumidos rígidos com dimensões 508 x 673,1 mm (plano) e 508 x 508 (cunha). Peso: 116 kg
- Pressure gages: Kistler Mod 6.03
- Acelerômetros: Endevco Mod 2225
- Conclusões: Comparando resultados experimentais aos obtidos pela fórmula de Wagner, verificou-se a diferenças devido ao ar preso entre o modelo e a superfície livre. Dos experimentos obteve-se as conclusões:
(1) Durante a queda do corpo de ensaio de fundo chato, o primeiro pulso positivo de pressão ocorre no instante quando o ar é preso momentaneamente entre o corpo e a água. (2) no instante do impacto, apenas o modelo de fundo chato e a cunha de 1° aprisionaram quantidade de ar considerável. Cunhas de ângulos superiores a 3° não aprisionam muito ar. (3) o histograma de pressão no ponto da quilha da cunha apresenta comportamento um pouco diferente daqueles a certa

distância da quilha. (4) Ensaios permitiram estimar a máxima pressão de *Slamming*.

- Aparato:



G. Water Impact Test of a Wedge with Rectangular plates and its Analysis

- Autores: Takemoto, Hiroyasu
- Publicação: Journal of Naval Architects of Japan V 156 (1984)
- Sumário: Ensaio experimentais de impacto na água com cunhas com o objetivo de estar a lei de escala da pressão de impacto e a resposta de um painel à pressão de impacto hidrodinâmico.
- Modelo: Modelo de aço (espess. 6 mm) com fundo em cunha com ângulos de elevação de 4° , com dimensões 962 x 600 mm (projetada).
- Pressure gages: Kyowa Mod PS-2 e PS-5; San-ei 6L6;
- Strain gage: Yokogawa 3126
- Aparato:

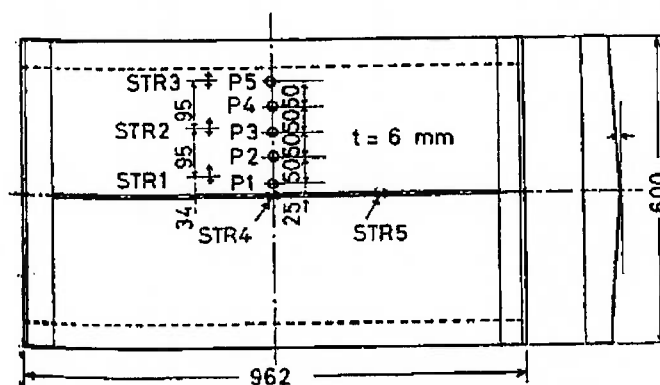


Fig.1 Wedge model and gage locations

- Conclusões: Dos resultados experimentais, o pico de pressão adimensional é afetada pela distância à quilha do modelo, quanto maior a distância, maior o pico, porém com o máximo valor aproximando-se aos da fórmula teórica de Wagner, indicando que o impacto hidrodinâmico da cunha deve seguir a teoria de Wagner. A análise por

elementos finitos de um painel aplicando a pressão teórica de Wagner, como carga externa resultou em concordância com os resultados experimentais. A análise indicou que a resposta do painel para a pressão do impacto móvel é aproximadamente de $1/2$ a $1/3$ aos do impacto estacionário.