
**ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

IGOR BERNARDES OLIVEIRA

**MONTAGEM DE LABORATÓRIO PARA O ESTUDO DE *SLOSHING* E
ANÁLISE DE PRESSÃO NA PAREDE DE TANQUES DE
ESTRUTURAS FLUTUANTES.**

**SÃO PAULO
2015**

IGOR BERNARDES OLIVEIRA

**MONTAGEM DE LABORATÓRIO PARA O ESTUDO DE *SLOSHING* E
ANÁLISE DE PRESSÃO NA PAREDE DE TANQUES DE
ESTRUTURAS FLUTUANTES.**

**Trabalho de Formatura em Engenharia
de Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas
e de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo**

Orientador: Prof. Dr. Cheng Liang Yee

SÃO PAULO

2015

DEDICATÓRIA

Agradeço aos meus pais pelo incentivo e apoio incondicional, pela fé e confiança demonstradas

Ao meu professor orientador pela paciência e competência, por me apoiar tanto com assuntos acadêmicos quanto pessoais

Ao amigo e companheiro de estudo Rubens Amaro pela ajuda ao compartilhar tempo e conhecimento na montagem do trabalho

A esta universidade e ao Tanque de Provas Numérico da USP por incentivarem a pesquisa

A ANP por ter proporcionado uma bolsa de estudo e por apoiar a pesquisa dentro da universidade

E a todos que fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado

RESUMO

Esse trabalho apresenta o projeto de um modelo físico para análise de *sloshing*, montagem do laboratório e descrição de seus componentes. Muitos avanços ocorreram no desenvolvimento de técnicas de simulação numérica, porém ainda há a necessidade de validar os métodos numéricos com modelos físicos, objetivo final do estudo. O sistema para o ensaios consiste basicamente de uma mesa oscilante (hexapode) de 6 graus de liberdade, um tanque prismático de escala 1:30 feito de acrílico, sensores e sistema de aquisição de dados., Os movimentos são controlados por um *software* do hexapode e a pressão na parede do tanque é medida com sensores piezoelétricos, sendo que a leitura e plotagem dos gráficos de pressão em função do tempo é feita também por um programa. Os experimentos se agrupam em diferentes parâmetros, diferentes preenchimentos do tanque, tipos de movimentos, frequência, amplitude, e ao final serão mostrados os resultados.

ABSTRACT

This term paper presents the design of a physical model for sloshing analysis, laboratory assembly and description of its components. Many advances have occurred in the development of a numerical simulation technique, but there is still the need to validate these numerical methods through physical experiments, which is the goal of this study. The experimental system is basically consisted of an oscillating table (hexapod) with 6 degrees of freedom, a 1:30 scale prismatic tank made of plexiglass, pressure sensors and a data acquisition system. The motions of the hexapod are controlled by the hexapod's software, the pressure on the tank wall is measured by piezoelectric sensors and pressure time histories are generated by using another software. The experiments are grouped into different parameters, different fills levels, types of movements, frequency, amplitude, and the results will be shown in the end.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3	CONSTRUÇÃO DO LABORATÓRIO	6
3.1	A MESA	7
3.2	O TANQUE	9
3.3	OS SENSORES E SISTEMA DE AQUISIÇÃO	10
3.4	DADOS EXTRAS	12
4	RESULTADOS OBTIDOS	13
4.1	CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CICLOS	13
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS.....	17
5	CONCLUSÃO.....	20
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	21

1 INTRODUÇÃO

Com a mudança do contexto ambiental mundial da redução da emissão de gás de efeito estufa a demanda por LNG (*liquefied natural gas*) cresceu, sendo esse o novo protagonista dessa nova era energética. Deixou de ser um complemento à extração do petróleo para ser o alvo da própria perfuração e produção, porém entraves técnicos como o fenômeno de *sloshing* dificultam a estocagem e o transporte, além do desafio tecnológico de se construir embarcações de grandes dimensões.

Sloshing é caracterizado por ser o movimento violento de um determinado líquido dentro de um recipiente e pode causar impactos e picos de pressão na parede do tanque. Em FLNGs (*Floating liquefied natural gas*) e em cargueiros durante estocagem do LNG o próprio movimento da embarcação gera um distúrbio na enorme quantidade de líquido presente, e caso haja um dano na parede do tanque, os efeitos podem ser devastadores. Um dos acidentes famosos aconteceu em 1970, com o cargueiro de LNG “ArcticTokyo” (FALTINSEN et al, 1974), ocasionando uma rachadura do tanque. Esse fato mostra a importância de estudos relacionados ao *sloshing*, já que causa danos ambientais (eliminação do gás) além de custar milhões para se reparar o navio.

Dado ao crescente uso do LNG, no caso do Brasil já chegando à 7,1% do consumo de energia e desse total aproximadamente 26% transportado por via marítima, a tecnologia no processo de liquefação do gás e armazenagem evoluiu muito, além da descoberta de 40 Tcf (*Trillion cubic feet*) de gás no poço de Tupi. Primeiramente para liquefazê-lo a temperatura deve manter-se abaixo de -160°C , uma temperatura difícil de manter num volume de um cargueiro que pode carregar até 200.000 m^3 de gás. Sendo essa temperatura muito baixa, a parede dos tanques é projetada para manter o isolamento térmico (caso contrário pode gaseificar e causar explosões), portanto exige um projeto cuidadoso para sua construção, já que a otimização de projetos de novas formas de paredes pode baratear o custo e melhorar o processo. O *sloshing* nesse caso é um perigo em potencial pois os esforços hidrodinâmicos sobre a parede podem causar danos à estrutura do tanque e seus revestimentos.

Existem duas categorias de tanques, chamados de *non-freestanding* (membrana) e *freestanding* (esférico). De acordo com o interesse financeiro, custo-benefício, volume de gás a ser transportado, atenuação do *sloshing*, cada *design* é escolhido. Por exemplo, no caso de tanques membrana, há um melhor aproveitamento do espaço, porém tanques esféricos (ou cilíndricos) são mais baratos. Vários critérios devem ser levados em conta, já que não há uma alternativa otimizada, que garanta tanto grande estocagem e aproveitamento de espaço quanto ao custo baixo e proteção contra o *sloshing*.

Para tal resultado o estudo desse caso se mostra de grande valor. Com estudos experimentais e simulações computacionais o fenômeno de *sloshing* pode ser melhor entendido, já que para cada situação o efeito no volume de LNG se dá de formas diferentes. Caso um resultado seja previsto, com estudos anteriores sobre o caso, problemas futuros podem ser evitados, consequentemente milhões de reais são economizados. Para isso a simulação precisa ser executada reproduzindo comportamentos muito próximos à realidade.

1.1 OBJETIVO

Há muitas décadas o fenômeno de *sloshing* é conhecido e demanda muita atenção devido ao interesse acadêmico quanto prático, e seu resultado não reflete somente no transporte de LNG, mas em muitas outras aplicações de engenharia. Nesse contexto esse trabalho se propõe a demonstrar a construção de um laboratório para o estudo físico do *sloshing*, e como objetivo final validar métodos computacionais.

Se comparados com experimentos físicos os estudos computacionais demandam menos tempo, dinheiro e material para serem realizados, porém devido à preocupação com a credibilidade dos resultados seus métodos devem ser validados. Esse estudo tem como objetivo validar dados numéricos, melhorar seu desempenho, precisão e confiabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fenômeno de *sloshing* em cargueiros de LNG já foi muito estudado, principalmente após a década de 1970, com o avanço do uso do gás. Dentre os pesquisadores temos Faltinsen et al (1974). Em suas pesquisas apresentam a parte experimental do processo, com comparações entre os tanques *freestanding* e *non-freestanding*, além da comparação das pressões causadas pelo *sloshing* entre tanques pouco cheios e muito cheios.

Navios LNGs transportam gás natural perto da pressão atmosférica, numa temperatura de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ (que o torna líquido), sendo que para manter essa temperatura a carga líquida é separada do casco do navio por um sistema de isolamento, que sustenta toda a carga. Os tanques (os navios tipos membrana chegam a ter cinco tanques) são preenchidos até uma capacidade de 98% no começo do transporte, sendo que se perde uma pequena parte (máximo aceitável de 0,15% por dia) desse volume devido à gaseificação do LNG.

Entende-se que há diferença entre o movimento de *sloshing* entre baixo e alto preenchimento de líquido nos tanques. Com alto preenchimento tem-se a formação de ondas estacionárias (mesma amplitude porém em diferentes direções) e em baixo preenchimento forma-se ondas progressivas (transferem energia) e consequentemente causam maiores impactos de pressão na parede.

Kim et al (2006) fizeram a comparação entre o estudo da parte numérica, feita com elementos finitos e a parte experimental, feita com o uso de um modelo de escala 1/70 do tamanho real feito de acrílico, mesa oscilante com seis graus de liberdade, sensores de pressão piezoelétricos (levou-se em consideração a escala da área do sensor, frequência natural, sensibilidade de aceleração, intervalo de medida e taxa de amostragem).

Arai et al (1992) propuseram um método numérico para simular *sloshing* 3D, levando em estruturas internas no tanque, com a posterior comparação com modelos experimentais. Koshizuka e Oka (1996) propuseram o método MPS (*Moving Particle Semi-implicit Method*), que simula o escoamento de um fluido incompressível. Atualmente uma implementação do método feita no Tanque de Provas Numéricas (TPN) da USP (TSUKAMOTO, 2006) é capaz de simular escoamentos viscosos e multifásicos, além da interação deste com sólidos rígidos e elásticos.

Cheng e Arai (2005) modelaram a simulação do impacto hidrodinâmico em tanques de formato trapezoidal e tanques de proa usando a técnica de diferenças finitas, e o mesmo método foi aprimorado para estudar o esforço do impacto hidrodinâmico devido ao *sloshing* em tanques com geometria típica de um navio de LNG (ARAI et al, 2006).

Repalleet al (2010) fizeram experimentos com a diferentes taxas de amostragem no caso de *sloshing*. Mesmo com excitação harmônica simples em uma direção a pressão de impacto varia significativamente e é muito aleatório, portanto há a necessidade de se escolher um tamanho de amostras expressas na forma de duração mínima para a gravação da pressão.

Taxa de amostragem é a quantidade de amostras de um sinal analógico coletadas em uma determinada unidade de tempo, para conversão em um sinal digital. Sendo uma frequência, é comumente medida em Hertz (Hz). Amostras são os valores de um sinal analógico medidos em um determinado instante. O processo de captura das amostras é chamado taxa de amostragem de sinal. Quanto maior for a taxa de amostragem mais medidas do sinal serão realizadas em um mesmo intervalo de tempo, e assim, maior será a fidelidade do sinal digital em relação ao sinal analógico. É portanto, assim como a quantização, uma propriedade que define a fidelidade da conversão.

O experimento de Repalleet al (2010) foi feito com 20% de altura de líquido, movimento de sway e uso de transdutores. Foi feito uma leitura inicial das pressões com o tanque parado, para uma futura correção e posteriormente feita a leitura da curva de pressão. Dessa curva podemos retirar o pico de pressão, tempo de ascensão (do começo da leitura até o pico de pressão) e o tempo de declínio (do pico de pressão até próximo à base), sendo que o impulso é a área abaixo da curva.

Um conjunto específico de experiências foi desenvolvido para explorar o papel da taxa de amostragem e da duração do ensaio em escala reduzida, de 100, 80, 60, 40, 20 kHz. Foi mostrado que a taxa de amostragem tem uma forte influência em determinadas medições como: pressão máxima (20 kHz mede menores pressões); tempo de ascensão (80 KHz tem o maior tempo de ascensão, que pode ocorrer por eventos aleatórios como jatos de água; tempo de declínio (jatos de água e apresamento influenciam muito, e observa-se que devemos tratar com taxas acima de 40 KHz pois esses eventos ocorrem num tempo muito curto) e já o impulso é o

menos dependente pois é alterada uma pequena porção da área abaixo da curva de pressão, mesmo o tempo de declínio sendo afetado.

Considerou-se que 40 kHz é suficiente para capturar qualquer evento e se mais sensores forem utilizados é possível diminuir a amostragem, no entanto os autores não recomendam que a frequência de amostragem seja menor do que 20 kHz. A variação do resultado para diferentes durações do teste foi menor que 6% para 10 minutos, 20 minutos e 30 minutos.

Em um estudo mais aprofundado do caso experimental do *sloshing* com impacto hidrodinâmico nas paredes em tanque 2D, Colagrossi et al (2004) realizaram ensaios sob diferentes circunstâncias: diferentes alturas de preenchimentos de líquido, períodos, amplitudes de impacto; além da comparação numérica baseada no método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*). Foi-se reduzida a complexidade do tanque com o uso de um aquário retangular 2D, sendo a largura de 0,1 metro e altura e comprimento de 1 metro, e foi-se forçado um movimento de sway com seus respectivos períodos e amplitudes.

O tanque foi equipado com 12 sensores de pressão nas paredes laterais e no teto do aquário para a medição do impacto; os testes foram acompanhados com câmeras de baixa e alta velocidade (23 Hz e 4000 Hz) situando as câmeras à frente do tanque, com o cuidado de minimizar erros de perspectiva da imagem, além de terem filmado na lateral do tanque para checar o escoamento 2D. Nas fotos foi-se notada a ocorrência da subida de líquido na parede, formação de bolsas de ar e fenômeno de quebra de onda.

Os gráficos da comparação dos resultados numéricos e experimentais mostram que para o período de excitação próximo do período natural do tanque a altura da onda aumenta, podendo até atingir o topo do aquário. Outro evento interessante é o chamado *churchroof* estudado por Peregrine (2003), comportamento quase periódico com dois picos de pressão no mesmo período. O primeiro pico é resultante da desaceleração do tanque (primeiro impacto do líquido com a parede) por efeito de inércia e logo após tem-se o segundo pico, quando a carga que subiu ao teto do tanque volta e atinge a camada de líquido abaixo, causando outro aumento de pressão (por efeito de gravidade).

Quando há formação de quebra de onda ocorre o fenômeno de arraste de ar, que pode afetar o valor e a variação da medição (caso ocorra na área de medição do sensor). Os estudos mostram que nesse caso o primeiro impacto é causado pelo

jato contra a parede e o consequente aprisionamento de ar, que não causa nenhum aumento de pressão, dado ao fato do ar escapar lateralmente pela cavidade. O segundo impacto é devido à abertura dessa cavidade de ar, com muitas bolhas e escoamentos turbulentos, fato que se exemplifica em muita oscilação na curva de pressão. Além dessas investigações foi-se notado que quanto maior a amplitude de onda maior é a discrepância na altura de onda medida.

De acordo com Maillard e Brosset (2009) há a necessidade de satisfazer a lei de escala com números adimensionais, sendo o número de Froude aquele que governa o movimento do líquido dentro do tanque. Além disso no caso I de LNG a relação de densidade entre água e ar pode afetar os resultados. O fenômeno que governa esse estudo em questão é a razão entre a densidade do líquido e do gás, dado a transferência de momento entre as duas fases durante o impacto com a parede (quanto maior a razão maior a redução da velocidade de impacto, e quanto menor a razão mais gás fica preso e assim menor é a redução da velocidade de impacto), assim tentou-se o estudo com uma mistura de SF₆ e N₂ na água para manter a razão de densidade (porém com uma diferença de compressibilidade). Num modelo real a razão de densidade entre o gás natural e o LNG é 0,004, enquanto a razão entre o ar e água é de 0,0012 num modelo experimental.

De acordo com Choi (2010) para se fazer um estudo experimental com o uso de sensores de pressão inicialmente devemos tomar certos cuidados com a diferença de temperatura entre a água e o sensor e montagem. O choque térmico sofrido pelo sensor ICP (*Inner Circuit Piezoelectric*) pode alterar a leitura da pressão, porém para os piezoelétricos não há diferença. A má montagem é outro caso que pode alterar a leitura da pressão, dado se o sensor não foi colocado ao nível da parede. Como analisado nesse artigo caso a colocação do sensor seja para dentro da parede pode resultar em altos picos secundários, e caso seja montado para fora da parede há a formação de movimentos sinuosos (*wriggles*) no início do pico. Para sinais estáticos, o acoplamento AC e DC alteram o valor medido. Para pressões de impacto, as magnitudes dos sinais são semelhantes.

3 CONSTRUÇÃO DO LABORATÓRIO

A pesquisa envolve a medição de pressão na parede de um tanque de acordo com diferentes níveis de preenchimento, movimentos e amplitudes; o tanque é

capaz de ser preenchido com diferentes tipos e níveis de líquidos e gases e trabalhar com pressões diferentes da atmosférica. O laboratório foi montado para possibilitar o estudo para outros tipos de tanques, portanto exemplifica a versatilidade tanto para tanques de diferentes dimensões, diferentes líquidos e diferentes características de movimentos.

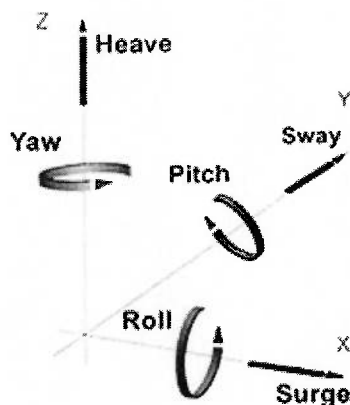
O tanque foi montado sobre uma plataforma que realiza movimentos de 6 graus de liberdade, além de poder ser deslocada com diferentes combinações de frequências e amplitudes. Suas paredes são de acrílico para possibilitar a visualização do interior e sensores de pressão foram acoplados em regiões específicas.

O laboratório se encontra no Tanque de Provas Numérico da USP e para a montagem do laboratório foi-se escolhida a mesa oscilante, o tipo do tanque, os sistema de sensoriamento e sistema de aquisição, e cada componente será descrito na sequência.

3.1 A MESA

Para simular o movimento de sloshing é necessário que haja uma plataforma de movimento, mais conhecido como hexapode, que foi a parte principal para a conclusão do estudo. Na literatura essa plataforma também é conhecida como plataforma de Stewart, que consegue suportar grande carga e gerar movimentos precisos em seis graus de liberdade, como visto na Figura1.

Figura 1 - Os graus de liberdade



Fonte 1 : <http://www.e2mtechnologies.eu/index.php/portfolio/em6-rot-1000/>

No caso em questão a mesa rotativa é uma eM6-400-1500, da marca E2M, com suporte de carga de até 1.500Kg, alcance máximo de 0,3m para movimentos de *surge* e *sway* e de 0,26m para *heave* e *velocidade* máxima alcançada de 0,65 m/s. respeitando estes limites, podemos reproduzir os movimentos máximos associados para cada frequência de estudo, e não forçar o movimento da mesa.

Um sistema integrado foi enviado junto com a plataforma, contendo um *software* de comando que possibilita movimentos periódicos, não periódicos e estocásticos (mas esses dois últimos estão fora do escopo do estudo), definir o eixo de rotação do movimento forçado (pôde ser validado com o posicionamento de laser, e verificar que se manteve estático), gerar gráficos dos movimentos das posições das pernas caso haja a necessidade de validar se o movimento está de acordo com o esperado.

Figura 2- A mesa oscilante



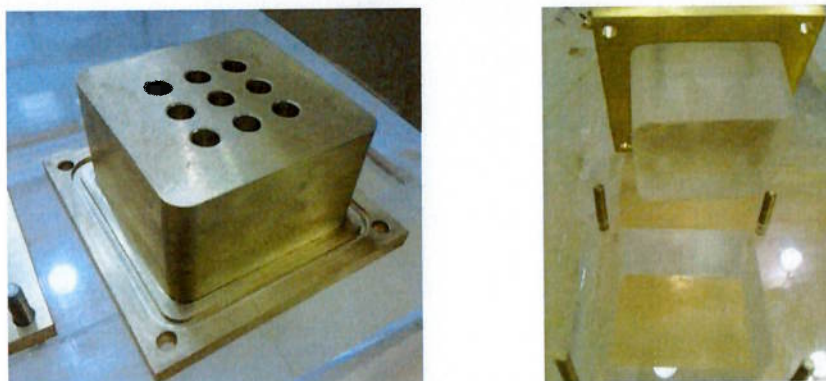
Fonte 2 : Elaborada pelo autor

Como visto anteriormente a plataforma é construída com um vão no meio, e por esse fato foi-se acoplada uma chapa de ferro circular no topo da seção triangular com ajuda de ganchos. A chapa, além de proteger a superfície da mesa e o computador abaixo, permite realizar estudos com outros tanques no futuro mais facilmente, sem interferir na mesa em si, pois possui vários pontos adicionais para a fixação dos tanques.

3.2 O TANQUE

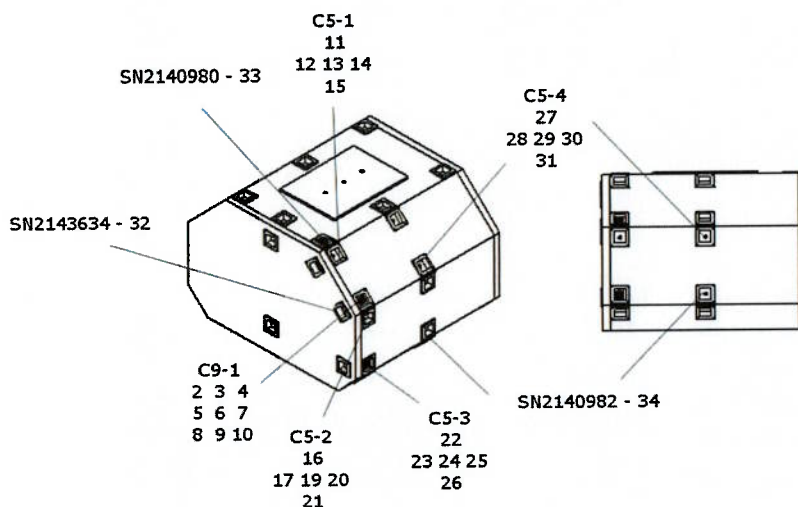
Para o estudo experimental foi-se fabricado um modelo em escala 1:50 de um tanque prismático de acrílico de 3cm de espessura, o suficiente para ser resistente às pressões hidrodinâmicas. Em determinadas pontos das paredes do tanque foram posicionados os sensores, agrupados em bases de latão encaixadas e vedadas na parede, como visto na Figura 3, o que facilita o posicionamento dos sensores ou sua retirada, além de não danificar a o acrílico e prezou-se pelo bom acabamento para que não houvesse interferência. No total são 10 *clusters* com 9 sensores em cada, em lugares mais críticos e 6 clusters com 1 sensor em cada. Na Figura 4 podemos entender melhor o posicionamento e as dimensões.

Figura 3 - O *cluster* de sensor



Fonte 3: Elaborada pelo autor

Figura 4 - O posicionamento dos sensores



Fonte 4: Elaborado por Rubens Amaro

Horizontalmente o tanque é preso por quatro grampos de fixação baixa, um em cada face do tanque, e verticalmente por oito presilhas com parafuso regulador, dois em cada face. Um cuidado a ser tomado quando o tanque for esvaziado é de soltar e prender novamente as travas antes de se iniciar os ensaios, pois com a retirada de água pode haver mudança na dilatação do acrílico e consequentemente gerar uma folga.

Figura 5- A montagem do tanque sobre a mesa

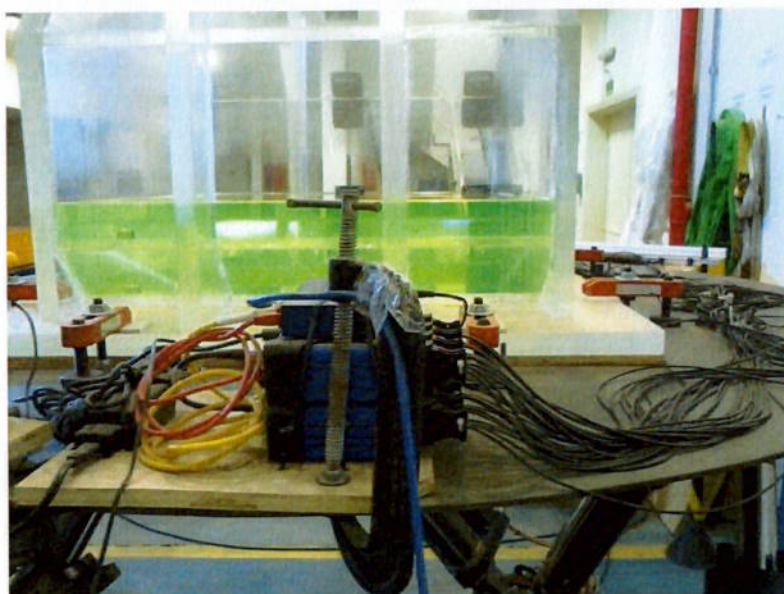


Fonte 5 : Elaborada pelo autor

3.3 OS SENSORES E SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição, utilizado para recepção e envio dos sinais para o *software* de leitura, é composto por dois módulos HBM MX-1601 fixos à chapa de aço e no total são recebidos e enviados sinais de 32 sensores por cabos não muito compridos e fixos de modo a não ocorrer interferência e ruídos de possíveis movimentos bruscos, e conectados com entrada IEPE, e devido ao cuidado com a diminuição dos ruídos não houve a necessidade de se aplicar um filtro nos dados elétricos recebidos.

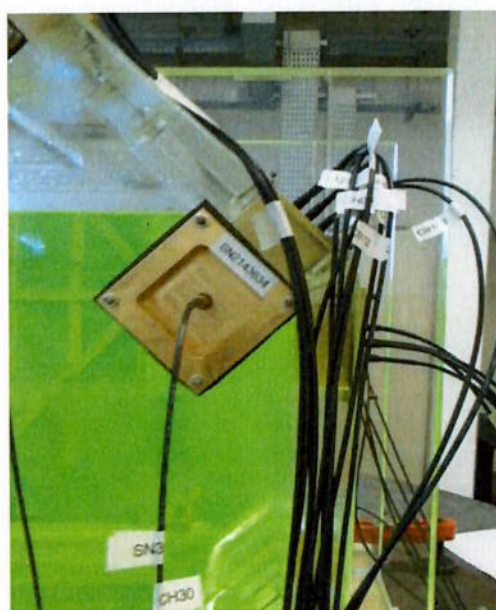
Figura 6 - O sistema de aquisição



Fonte 6 : Elaborada por Rubens Amaro

Para a escolha dos sensores há uma grande restrição, devido ao fato que deve-se buscar um sensor suficientemente pequeno, que meça na faixa de magnitude de pressão do estudo, com uma boa resolução, e que seja compatível com água, gases e também suas misturas. A escolha foi sensores piezoelétricos utilizados do tipo Kistler211B6, com uma faixa de pressão de 50 psi, e são adequados para ambientes com mistura gasosa.

Figura 7 - Visualização mais detalhada do sensor



Fonte 7 : Elaborada por Rubens Amaro

Devido à capacidade de que alguns cristais geram corrente elétrica em resposta a uma pressão mecânica exercida sobre o mesmo significa que esses sensores não são adequados para medir uma força estática, contudo, eles são excelentes em medir as forças de muito curta duração, tais como forças de impacto, pois o sinal elétrico gerado por sensores piezoelétricos cai rapidamente após a força ser aplicada pela primeira vez. Porém há um problema quanto ao contato inicial entre a fase líquida e o sensor, chamado de *drift* térmico, que é causado pela rápida variação de temperatura sofrida, e interfere na aquisição de sinal. Para que esse efeito seja reduzido ou mesmo suprimido deve-se isolar a face de contato de medição do sensor (no experimento em questão foi feito com uma fita adesiva multiuso) e o corpo do sensor (o próprio *cluster* serve como um meio de proteção) para que a troca de calor seja minimizada.

3.4 DADOS EXTRAS

O líquido utilizado é água com corante de caneta marca texto, que causa um efeito interessante, pois delimita a superfície (necessário para fazer filmagens), a alteração na densidade do líquido é irrisória pois a concentração de corante é muito pequena, e caso seja necessário pode ser utilizado com efeito de fluorescência, porém não foi feito nesse estudo.

Figura 8 - A iluminação de LED



Fonte 8 : Elaborada por Rubens Amaro

Ao longo de cada ensaio houve a realização de filmagens. Em cada início há a apresentação dos parâmetros estudados para que não haja confusão para encontrar o gráfico de pressão correspondente à filmagem. Inicialmente os ensaios foram acompanhados por uma câmera de alta velocidade (*slow motion*) porém não havia necessidade de tais imagens no estudo em questão e logo houve a mudança para uma câmera digital HD, que produz vídeos com tamanho de arquivo menor e é mais versátil. No caso da câmera de *slow motion* foi-se tomado o cuidado da iluminação ser feita com lâmpadas de led, pois em gravações com mais de 100 fps (*frames per second*) o vídeo cintilaria com maior intensidade caso fosse filmado com iluminação comum, que pulsa a 50 Hz.

4 RESULTADOS OBTIDOS

O escopo desse estudo é demonstrar a montagem do laboratório, sua metodologia, quais materiais foram utilizados e o porquê, e ao final deixá-lo pronto para cumprir seu propósito que é a validação de resultados computacionais. Devido a esse fato o resultado em si acaba sendo a finalização do laboratório, que já é utilizado para a captação de dados para vários outros estudos de *sloshing*, porém, para complementar serão apresentados certos perfis de pressão captados, como foi feito o estudo inicial da quantidade de ciclos necessários por ensaio e pontos mais críticos.

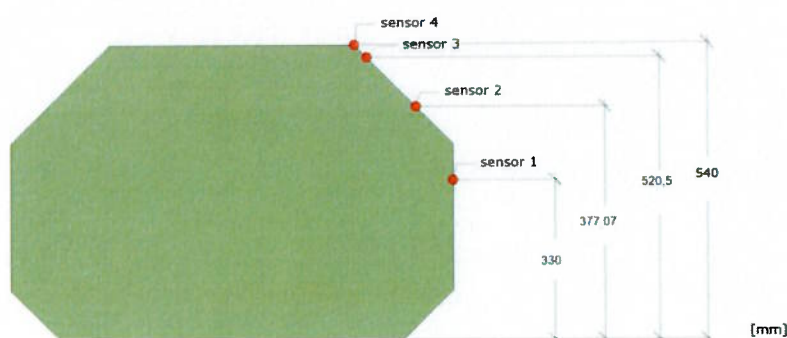
Os parâmetros de estudo analisados são picos de pressão, tipos de movimento (tanto movimentos sobre um eixo de rotação quanto uma combinação de mais de um), frequências (dentro e fora da faixa de frequência natural do tanque), quantidade de ciclos necessários, diferentes níveis de preenchimento no tanque (25% da altura, 50% e 75%). O intuito é fazer uma varredura para cada parâmetro, como é alterado o perfil de pressão para cada mudança e ao final poder comparar e validar resultados.

4.1 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CICLOS

Logo quando se inicia um ensaio deve-se saber quais parâmetros serão analisados, quais os próximos a serem feitos e tentar ser econômico na aquisição, pois o volume de dados pode ser muito grande e dificultar esse processo.

Um dos fatores que ajuda a economizar tempo e volume de memória é o número de ciclos. Para isso é necessário fazer um estudo sobre o número mínimo de ciclos que forneça o mesmo resultado estatisticamente. Dentro deste contexto, um estudo da influência da quantidade de ciclos sobre o histograma de picos de pressão para 4 sensores situados de acordo com a Figura 9.

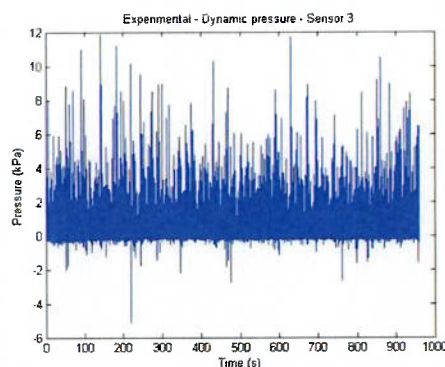
Figura 9 - Sensores utilizados na determinação do número de ciclos



Fonte 9 - Elaborado por Rubens Amaro

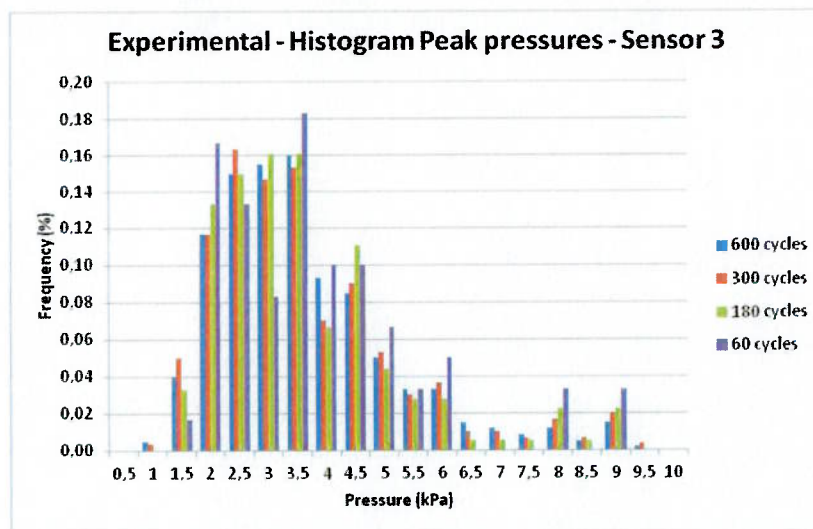
A análise começa com a determinação da quantidade base de ciclos, que é de 600 para a parte experimental e de 200 ciclos para a simulação computacional. Essa diferença é devida à influência externa que o modelo físico sofre, como irregularidades, mudança ambiental, oscilação nos dados, fatos que não ocorrem no caso numérico. O modelo foi submetido a movimentos senoidais regulares e pôde-se ao final construir um histograma base para 600 ciclos. Podemos analisar na Figura 10 a coleta de dados de pressão para o sensor 3, e em seguida a construção do histograma de picos de pressão.

Figura 10 - Gráfico de picos de pressão por tempo



Fonte 10: Elaborado por Rubens Amaro

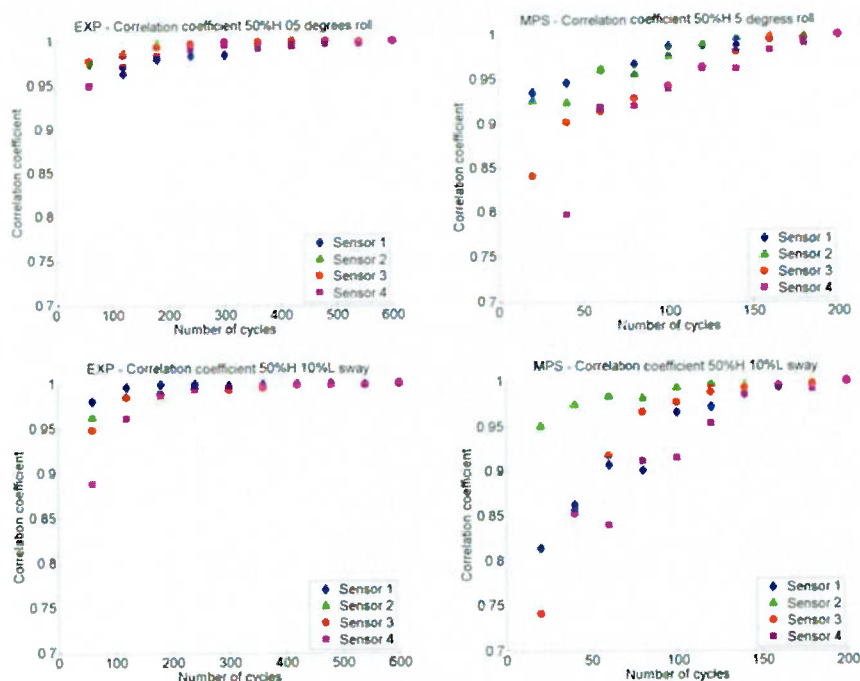
Figura 11 - Histograma de picos de pressão



Fonte 11: Elaborado por Rubens Amaro

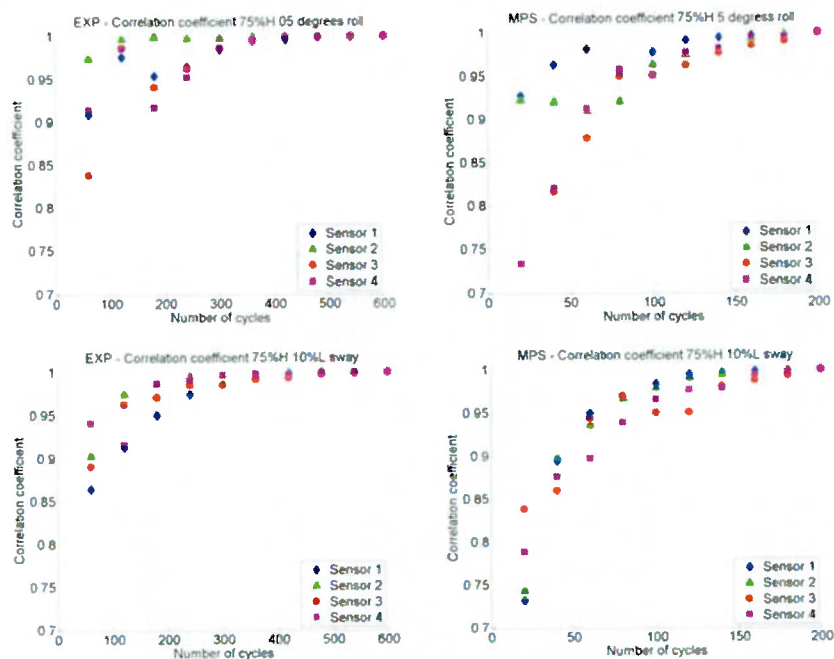
Posteriormente houve a coleta de dados para cada sensor em diferentes quantidades de ciclos. Para a parte experimental houveram 9 coletas, começando com 60 ciclos e terminando com 540 (um aumento de 60 ciclos para cada estudo), e para a parte experimental foi-se seguido a mesma rotina sendo que começa com 20 ciclos e termina com 180. Para cada intervalo um histograma foi construído e correlacionado com o histograma base de 600 ciclos. Pode-se analisar com a Figura 12 e Figure 13, ambos estudos de 50% e 75% de preenchimento respectivamente, para movimentos de 5° de *roll* e 3cm de *sway* que há influência na escolha de número de ciclos totais, e a próxima etapa é a escolha final da quantidade de ciclos.

Figura 12 - Gráficos de correlação entre diferentes números de ciclo para preenchimento de 50% da altura



Fonte 12: Elaborado por Rubens Amaro

Figure 13 - Gráficos de correlação entre diferentes números de ciclo para preenchimento de 75% da altura



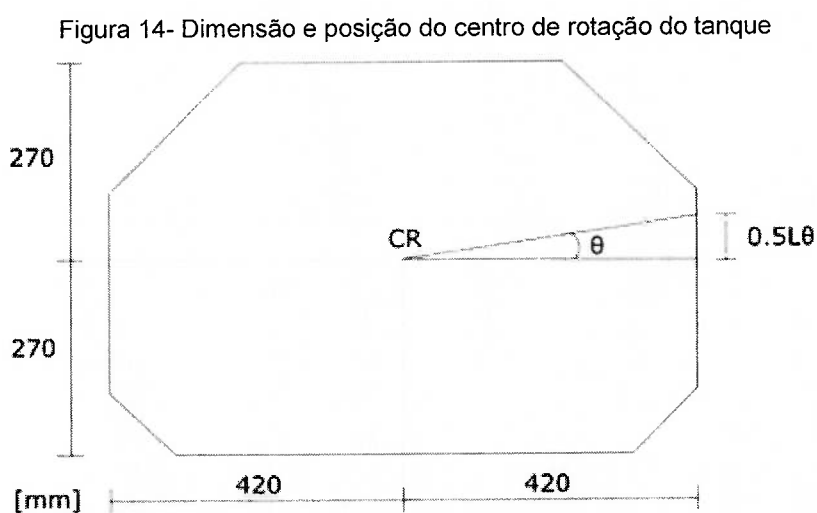
Fonte 13 : Elaborado por Rubens Amaro

Devido ao fato de que ensaios físicos têm maior chance de sofrer influência externas a quantidade optou-se por um coeficiente de correlação mínimo de 0,95, e na análise dos gráficos percebe-se que esse fator é referente ao número 300 ciclos. Para o estudo numérico foi-se adotado um coeficiente acima de 0,85 referente ao total de mínimo de 60 ciclos.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS

Após a montagem do laboratório e determinação do número de ciclos que devem ser realizados para cada caso foi-se possível começar a retirada de dados de pressão para a comparação com o resultado computacional feito por outra equipe. Nesse trabalho serão mostrados resultados iniciais para demonstrar como validações de *sloshing* foram feitas. Para tal deve-se escolher as condições de ensaio e que se comparem aos parâmetros da simulação numérica: tipo de movimento e amplitude, porcentagem de preenchimento do tanque, sensores analisados, eixo de rotação do tanque.

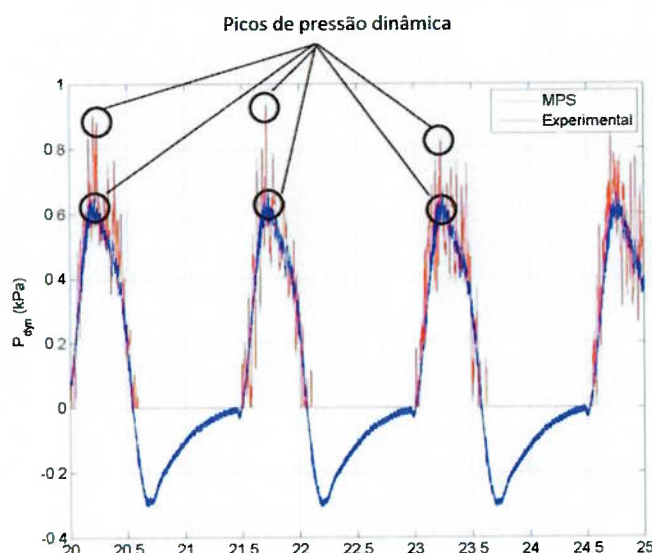
O caso analisado em questão se refere ao movimento de *roll*, com rotação ao redor do eixo longitudinal passando pelo centro de rotação CR, amplitude de rotação θ de 4° , como visto na Figura 14 e níveis de preenchimento de 50% e 75%.



Fonte 14 : Elaborado por Rubens Amaro

Para iniciar a retirada de dados observou-se uma série temporal de picos de pressão como analisado na Figura 15, que demonstra a comparação entre a média de picos de pressão entre o método experimental e numérico.

Figura 15 - Picos de pressão dinâmica



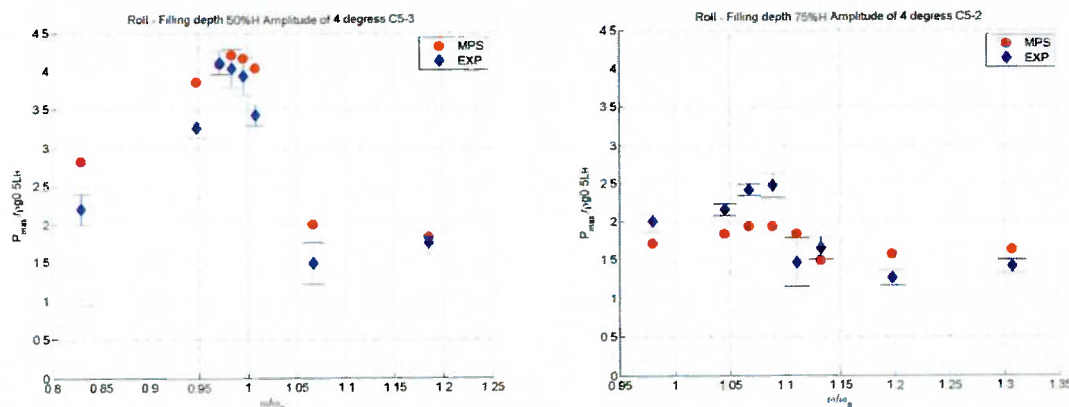
Fonte 15 : Elaborado por Rubens Amaro

Posteriormente foi analisada a curva de Pressão X Frequência, e com isso poder entender também o comportamento em situações próximas à frequência natural do tanque em movimento de *roll*. Foi utilizada a média dos picos de pressão dinâmica dos 5 sensores do cluster C5-2 e C5-3, adimensionalizados para que haja um referencial entre os dados; os valores de pressão foram adimensionalizados pelo deslocamento hidrodinâmico de rotação $\rho g 0.5L\theta$, onde $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ é a densidade da água, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade, $L = 840 \text{ mm}$ é a largura do modelo e $\theta = 0.0698 \text{ rad}$ (4 graus) é a amplitude de rotação. As frequências foram adimensionalizadas pela frequência de ressonância de *roll* ω_0 , para cada preenchimento h , obtida pela equação:

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g\pi}{L} \tanh \frac{\pi h}{L}}$$

As curvas de Pressão X Frequência de movimento para cada preenchimento são apresentadas juntamente com a comparação entre o método experimental e numérico, como visto na Figura 16.

Figura 16 - Comparação entre método experimental e numérico para diferentes frequências

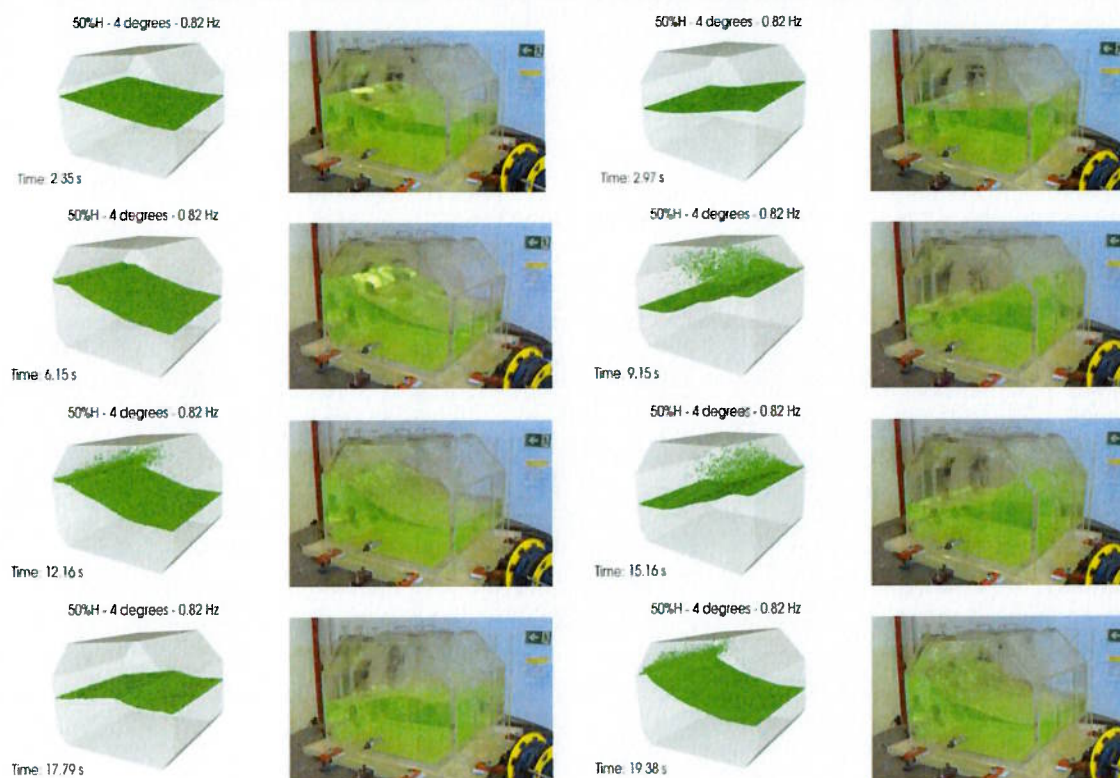


Fonte 16 : Elaborada por Rubens Amaro

Na análise para o preenchimento de 50%, realizado pelos dados do *cluster* C5-3, ambos resultados experimentais e numéricos refletem uma ressonância em torno de $\omega/\omega_0 = 0.97$, ou seja, próximo do valor teórico de ressonância de *sloshing* para um tanque retangular, dado ao fato que nessas condições a superfície da água não golpeia os chanfros do tanque, assim o modelo se comporta como uma seção retangular. Para o preenchimento de 75%, com dados referentes ao *cluster* C5-2, há uma melhor concordância entre os métodos numéricos e experimentais e ambos resultados experimentais e numéricos refletem uma ressonância em torno de $\omega/\omega_0 = 1.1$. Como a superfície do fluido encosta na região chanfrada da parede, o modelo tem uma largura menor do que um modelo de seção retangular, e as frequências naturais experimentais e numéricas acabam sendo um pouco maiores do que o valor teórico esperado para um modelo retangular.

Figura 17 apresenta uma sequência de imagens obtidas pelo ensaio experimental e MPS para o preenchimento de 50%, frequência de 0.82 Hz e amplitude de 4 graus. Visualmente, o ensaio experimental e simulação numérica apresentaram um comportamento semelhante do fluido, em relação a sua fase, altura da superfície e maiores impactos a partir do instante $t = 9.15$ s, com presença de grandes deformações e separação da superfície livre.

Figura 17- Comparação visual entre o método experimental e numérico



Fonte 17 : Elaborada por Rubens Amaro

5 CONCLUSÃO

O intuito do trabalho é contribuir para a pesquisa na área de *sloshing*, auxiliando na instalação e preparação do laboratório experimental. Foi tratada a metodologia, materiais necessários, e as primeiras retiradas de dado para análise. Todos os dados apresentados, de preenchimento 50% e 75% da altura do modelo para o movimento de com amplitude de rotação de 4 graus demonstram a conclusão da montagem do laboratório, que já está pronto para a pesquisa mais aprofundada de *sloshing* e validar estudos numéricos. Os resultados mostrados nesse trabalho exemplificam somente casos iniciais que foram retirados, e certamente a pesquisa na área de *sloshing* terá grande avanço pela criação desse laboratório. De forma geral, os resultados experimentais serviram para validar algumas situações numéricas, mostrando as vantagens e limitações do método MPS e o fenômeno de *sloshing* pode ser investigado com mais riqueza de detalhes.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Faltinsen, O.M., Olsen H.A., Abramson H.N. & Bass R.L. LIQUID SLOSH ON LNG CARRIERS, DnV Publication, 1974.

Kim, J. W.; Lee, J. M.; Bai, K. J.; Sim, I. H.; Lee, Y. B.; A FINITE ELEMENT COMPUTATION FOR THREE DIMENSIONAL PROBLEMS OF SLOSHING IN LNG TANK. In: 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 4-9, 2006. Hamburg, Germany.

Arai, M. ; Cheng, L. Y. ; Inoue, Y. ; Sasaki, H. ; Yamagashi, N. . Numerical ANALYSIS OF LIQUID SLOSHING IN TANKS OF FPSO, 1992.

Arai, M.; Makiyama. H. S.; Cheng, L. Y.; Kumano, A.; Ando, T.; Imakita, A. NUMERICAL ANALYSIS OF 3-D SLOSHING IN TANKS OF MEMBRANE TYPE LNG CARRIERS. In: The Proceedings of ICSOT 2006: Design, Construction & Operation of Natural Gas Carrier & Offshore Systems, Sep. 2006. Busan, Korea.

Koshizuka, S. and Oka, Y.(1996). MOVING-PARTICLE SEMI-IMPLICIT METHOD FOR FRAGMENTATION OF INCOMPRESSIBLE FLUID. Nuclear Science and Engineering, 123:421–434.

Tsukamoto, M. M., DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE PARTÍCULAS NA REPRESENTAÇÃO DE CORPOS FLUTUANTES EM ONDAS ALTAMENTE NÃO-LINEARES, Dissertação (mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo, 2006. 48p.

Cheng, L. Y.; Arai, M. A 3D NUMERICAL METHOD FOR ASSESSMENT OF IMPACT LOADS DUE TO SLOSHING IN LIQUID CARGO TANKS. In: Conference Proceedings of The Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, June 19-24, 2005. Seoul, Korea.

Repalle, N.; Truong, T.; Thiagarajan, K.; Roddier, D.; Seah, R. K. M.; Finnigan, T. THE EFFECT OF SAMPLING RATE ON THE STATISTICS OF IMPACT PRESSURE, In: Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 6-11, 2010. Shanghai, China

Colagrossi, A.; Lugni, C.; Greco, M.; Faltinsen, O.M. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF 2D SLOSHING WITH SLAMMING. In: 19th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (2004)

Maillard, S.; Brosset, L. INFLUENCE OF DENSITY RATIO BETWEEN LIQUID AND GAS ON SLOSHING MODEL TEST RESULTS, In: Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference, June 21-26, 2009. Osaka, Japan.

H.I.Choi; Y.M.Choi; H.Y.Kim; S.H.Kwon; J.S.Park; K.H.Lee. A STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC SENSOR IN SLOSHING EXPERIMENT. In: Conference Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference, June 20-25, 2010. Beijing, China.