

Construção de um canal de testes para estudo de interação fluido estrutura

Jairo Fernando de Lima Coelho¹, Waldir Terra Pinto²

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Oceânica – FURG, Rio Grande, RS –

jairocoelho@gmail.com

² Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS –

waldir.pinto@gmail.com

RESUMO:

Este trabalho apresenta uma descrição da metodologia utilizada para a construção de uma instalação para análise experimental de vibrações estruturais induzidas pelo escoamento em cilindros. As instalações são compostas por um canal, uma plataforma de reboque e sistemas de aquisição de dados e imagens. O canal é construído em vidro e apoiado sobre uma estrutura metálica projetada de modo a permitir a visualização do escoamento por todos os lados. A plataforma de reboque é dotada de um sistema que permite o movimento de translação dos cilindros além de ser capaz de induzir vibrações forçadas independentes em dois cilindros. A geração desses movimentos é feita por meio de quatro atuadores controlados por um sistema de malha fechada. Informações do escoamento são obtidas através da medição da pressão e da visualização de linhas de emissão geradas mediante a injeção de contraste a partir da estrutura

PALAVRAS-CHAVE: análise experimental, canal, vibrações, cilindros.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento sobre estruturas cilíndricas é um dos problemas mais estudados no âmbito da interação fluido estrutura. Para valores altos do número de Reynolds, ocorre o descolamento da camada limite, o que pode levar a formação de vórtices e turbulência. Este problema não possui solução analítica e a solução numérica apresenta uma demanda de processamento muito superior à oferecida pelos computadores disponíveis atualmente. Conseqüentemente, estudos experimentais são ferramentas imprescindíveis na busca do entendimento e de soluções para problema. Um fenômeno importante que ocorre no escoamento sobre estruturas cilíndricas é a sincronização da frequência de formação de vórtices com a frequência de vibração da estrutura, seja ela natural ou forçada. Esse fenômeno é freqüentemente chamado na literatura de “lock in”

Em geral, o estudo experimental é feito com a utilização de instalações que disponham da capacidade de produzir movimento relativo entre o fluido e estrutura. Isso pode ser atingido ou pelo movimento do fluido e a estrutura ou apenas com movimento de oscilatório, ou com o movimento da estrutura com o fluido em repouso. No caso do estudo de vibrações induzidas pelo escoamento a estrutura pode ser flexível com frequência natural próxima da faixa de frequência de Strouhal ou a estrutura pode ser rígida podendo-se induzir vibração forçada na estrutura, além de possuir sistemas de aquisição de dados e imagens.

Este trabalho apresenta uma descrição da metodologia utilizada para a construção de uma instalação para análise experimental de vibrações estruturais induzidas pelo escoamento em cilindros. Estas instalações são compostas por um canal, uma plataforma de reboque e sistemas de aquisição de dados e imagens. O movimento relativo é produzido pela translação da estrutura no fluido em repouso. O canal é construído em vidro e apoiado sobre uma

estrutura metálica projetada de modo a permitir a visualização do escoamento por todos os lados. A plataforma de reboque é dotada de um sistema que permite o movimento de translação dos cilindros além de ser capaz de induzir vibrações forçadas independentes em dois cilindros. A geração desses movimentos é feita por meio de quatro atuadores controlados por um sistema de malha fechada. As informações sobre o escoamento são obtidas através da medição da pressão e da visualização de linhas de emissão geradas a partir da injeção de contraste.

Estas instalações permitem a realização de pesquisas que vão resultar em contribuições significativas para o desenvolvimento científico e tecnológico em vários ramos da engenharia.

2. MOTIVACAO E APLICACOES NA ENGENHARIA OCEANICA

A principal motivação para a criação da infra-estrutura para ensaios de vibrações induzidas pelo escoamento em estruturas cilíndricas é a aplicação das pesquisas em estruturas oceânicas esbeltas. Estruturas cilíndricas esbeltas são amplamente utilizadas como componentes de sistemas oceânicos para fins de transmissão de força e/ou sinais e para fins de transferência de massa. Como exemplo pode-se citar cabos e umbilicais submarinos, amarras, risers e dutos submarinos. Essas estruturas são altamente flexíveis, pois seus comprimentos são bem maiores do que a dimensão característica das suas seções transversais, sobretudo em águas profundas, conforme ref.[4].

O comportamento mecânico de estruturas esbeltas é ditado pelo nível de tração a que a estrutura é submetida. Estruturas com alta tração apresentam rigidez geométrica e podem ser analisadas segundo uma abordagem quasi-estática. Nesta abordagem, primeiro determina-se a configuração de equilíbrio hidrostático e após determina-se a configuração de equilíbrio dinâmico usando a hipótese de pequenos deslocamentos em torno da configuração hidrostática. Já as estruturas com baixa tração sofrem grandes deslocamentos ainda que para cargas muito pequenas. Nestas circunstâncias, a análise hidrostática é irrelevante, devendo ser feita tão somente a análise dinâmica. Deve-se notar que em via de regra a análise estrutural é não-linear tanto para cabos com alta tração quanto para cabos com baixa tração. Cabo aqui tem a conotação de estruturas esbeltas em geral conforme ref.[2].

Um outro fator complicador na análise de cabos submarinos está na determinação do carregamento hidrodinâmico resultante da complexa interação do movimento relativo entre a estrutura e o fluido. O movimento do fluido é resultante da superposição de correntes e ondas oceânicas enquanto que o movimento da estrutura pode ser dividido numa componente devida ao movimento forçado induzido pelo movimento da instalação de topo e noutra componente resultante da própria interação fluido estrutura. Em geral, o carregamento hidrodinâmico é determinado pela fórmula de Morison, que considera uma componente de carga proporcional ao quadrado da velocidade relativa (arrasto e sustentação) e outra proporcional à aceleração (forças de inércia), conforme ref.[1]. Na fórmula de Morison, todas as incertezas são consideradas através dos coeficientes de arrasto, sustentação e inércia. Esses coeficientes devem ser determinados experimentalmente. Evidentemente que esta fórmula é uma simplificação do problema. A interação fluido estrutura é bem mais complexa, pois envolve troca de energia entre fluido e a estrutura que, por exemplo, pode transferir energia do fluido para estrutura e causar instabilidade da mesma. Uma outra peculiaridade de estruturas cilíndricas é o descolamento da camada limite, o que leva a formação de vórtices numa frequência determinada pelo número de Strouhal, conforme ref.[2]. Porém, quando a estrutura vibra numa frequência próxima a frequência de Strouhal, ocorre um fenômeno chamado de sincronização de vórtices que se caracteriza pela coincidência da frequência de formação dos vórtices com a frequência da estrutura o que pode causar vibrações com amplitudes significativas. Esse problema é chamado de vibração induzida por vórtice.

O problema da análise da interação fluido estrutura pode ser resumido da seguinte forma: Tem-se uma estrutura altamente flexível, sujeita a grandes deslocamentos, a vibração forçada (induzida pela instalação de topo), a um escoamento não-uniforme e dependente do tempo com ângulo de ataque que pode variar de 0 a 90 graus. O número de Reynolds baseado na componente normal da velocidade relativa indica a existência de regimes turbulentos e de transição para a turbulência e, evidentemente, a separação da camada limite, conforme ref.[1]. Portanto, a determinação da força axial baseada na integração das tensões viscosas não é válida. Além disso, muitas vezes essas estruturas são arrançadas em grupos de modo que existe a interferência entre as esteiras de escoamento. Outra região importante a ser analisada é a vizinhança do fundo onde o regime de escoamento pode ser alterado de forma significativa. Essas ocorrências acarretam mudanças significativas em termos de frequência e amplitude do movimento da estrutura.

Esse cenário altamente complexo inviabiliza tanto a solução analítica quanto a solução numérica das equações de Navier-Stokes para a quase totalidade dos casos práticos de estruturas oceânicas esbeltas. A alternativa viável da engenharia é a utilização de modelos que podem ser chamados de híbridos, segundo os quais parte da solução é obtida por meios analíticos ou numéricos e outra parte obtida experimentalmente. Um outro aspecto importante da análise experimental é a possibilidade de validação de modelos baseados na solução das equações de Navier-Stokes (DNS). Esses modelos são factíveis para números de Reynolds muito abaixo dos encontrados em aplicações práticas.

3. PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DAS INSTALAÇÕES

Os parâmetros importantes para a análise de vibrações induzidas pelo escoamento são o número de Reynolds, o número de Strouhal, a frequência e a amplitude da vibração. Essas grandezas estão associadas às características das instalações do laboratório. No caso em questão, as características importantes são o comprimento do canal, a velocidade de deslocamento da plataforma de reboque e o diâmetro do cilindro. Essas características determinam o tempo disponível para realização do ensaio e, como consequência, o número máximo de períodos que podem ser medidos durante o ensaio. O intervalo de tempo total disponível para a realização do ensaio pode ser calculado pela Equação 1:

$$\Delta t = \frac{L}{U} \quad (1)$$

onde Δt é o intervalo de tempo L é o comprimento útil do canal e U é a velocidade da plataforma de reboque. O número de Strouhal pode ser considerado como 0,2, ou seja, a frequência de desprendimento de vórtice pode ser aproximada pela Equação 2:

$$f_s = \frac{S_t U}{D} \approx \frac{U}{5D} \quad (2)$$

onde f_s é a frequência de desprendimento de vórtices, S_t é o número de Strouhal e D é o diâmetro do cilindro.

A análise de vibrações induzidas pelo escoamento freqüentemente está interessada na determinação da possibilidade de sincronização do desprendimento de vórtice com frequências múltiplas da frequência fundamental. Em termos do número de períodos medidos, a situação crítica ocorre para as menores frequências, conseqüentemente maiores períodos. Admitindo-se que a faixa de frequência a ser estudada varie entre a quinta sub-harmônica e a quinta super-harmônica da frequência de Strouhal, o maior período a ser medido é portanto dado pela Equação 3:

$$T_{\max} = \frac{5}{f_s} \approx \frac{25D}{U} \quad (3)$$

onde T_{\max} é o maior período presente no processo. Nestas condições, o número de períodos n dos dados a serem adquiridos é dado pela Equação 4:

$$n = \frac{U\Delta t}{25D} = \frac{L}{25D} \quad (4)$$

Portanto, o número máximo de períodos que pode ser adquirido durante o ensaio depende do comprimento do canal e do diâmetro do cilindro. Considerando um canal de 10 metros de comprimento e um cilindro de 38 milímetros de diâmetro, tem-se que o número de períodos é um pouco superior a 10. O aumento no número de períodos pode ser obtido através do aumento do comprimento do canal ou através da redução do diâmetro do cilindro.

O número de Reynolds pode ser então obtido pela Equação 5:

$$R_e = \frac{UD}{\nu} \quad (5)$$

onde R_e é o número de Reynolds e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática. Para a situação acima e para uma velocidade máxima de 0,5 m/s, tem-se um Reynolds máximo da ordem de 19000 e a frequência máxima 13 Hz. Porém, a aplicação de uma frequência tão alta pode provocar vibrações no fluido. Uma possível solução para a investigação da quinta super-harmônica seria considerar valores mais baixos para a velocidade e, por conseqüência, valores mais baixos para o número de Reynolds. Por exemplo, para o caso em análise se a velocidade de for de 0,19 m/s a frequência da quinta super-harmônica será de 5 Hz, o que é compatível com o sistema mecânico a se implementado.

Um último parâmetro importante é a amplitude da oscilação forçada. Pode-se mostrar facilmente que amplitude máxima de vibrações induzidas por vórtices está em torno de um diâmetro do cilindro. Porém, neste caso o número de Reynolds da análise fica em torno de 7200.

4. DESCRIÇÃO DO CANAL DE TESTES

A construção do canal de testes envolve cálculo estrutural e dimensionamento de vários componentes, a partir dos quais são definidos os demais, conforme ref.[3],[5],[6]e[7].

Primeiramente definimos o tamanho do canal, para a partir daí definirmos as demais dimensões. Para um melhor aproveitamento da chapa de vidro, o canal será formado por um cubo em vidro de 0,74 x 0,73 metros de seção transversal e comprimento de 9,60 metros, sendo utilizado, para obter este tamanho, três chapas de vidro de 19mm de espessura, além de dois pedaços de 0,74 x 0,73 metros para fazer o fechamento do canal nas extremidades. A espessura do vidro foi determinada de modo a suportar a pressão da água que vai no seu interior, principalmente na parte inferior, que tem um vão ao longo do canal sem suporte e, também, foi escolhido um vidro comum, pois um vidro temperado, embora tenha mais resistência em espessuras mais finas, apresenta distorções de imagens, o que prejudicaria um dos atributos do canal que é permitir filmar vórtices formados durante o deslocamento da estrutura no interior do canal.

Para dar suporte a este canal, será confeccionada uma base em metalon estruturado ao longo dos 9,60 metros. Cada módulo tem 3,20 metros. Nos pés da estrutura da base, tem-se um sistema de nivelamento da estrutura, de modo a permitir deixar esta estrutura totalmente nivelada. A figura 6 mostra as vistas do desenho da base da estrutura.

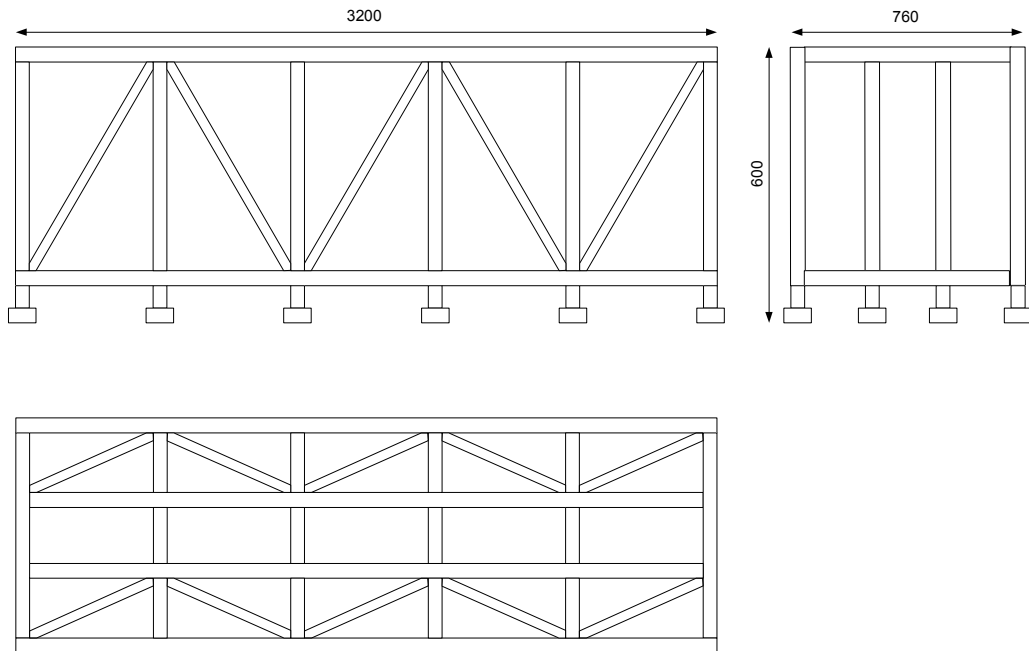


Figura 6 – Vistas da base da estrutura do canal

A vista mostra um módulo da estrutura, os quais serão num total de 3 módulos, sendo montados em sequência e unidos por parafusos nas laterais, de modo a dar a distância adequada para o encaixe do canal de vidro mais o material isolante que será utilizado entre o vidro e a estrutura, conforme mostra a figura 9.

Nas laterais destes módulos será fixada uma estrutura onforme figura 7, a qual servirá para suportar o esforço lateral, ao qual o vidro será submetido pela pressão da água. Terá entre o vidro e a estrutura o mesmo material isolante da base. Esta estrutura também é composta de seis módulos e será fixada a estrutura de apoio do canal e entre si por parafusos.

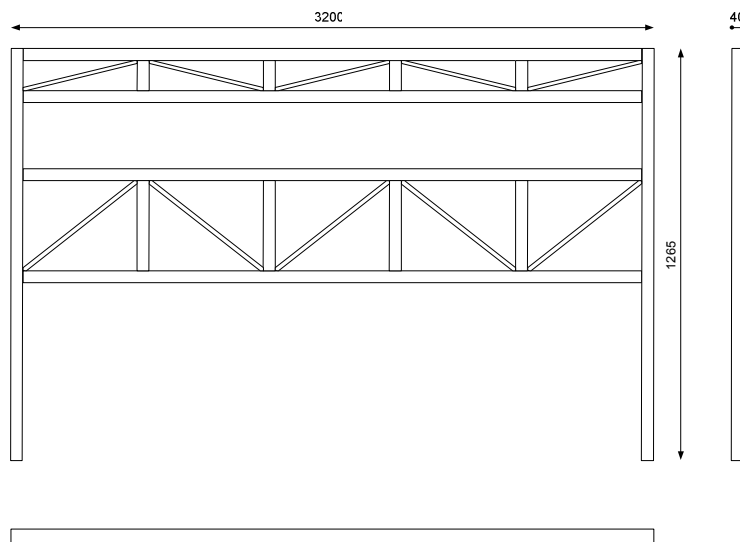


Figura 7 – Vista da estrutura da lateral do canal

Esta estrutura também tem um vão livre, que permitirá além de observar os experimentos, filmá-los.

A estrutura de suporte do vidro de fechamento lateral do canal, terá também vão livre e é fixada tanto a estrutura da base do canal como a estrutura lateral, conferindo desta maneira rigidez ao conjunto, conforme figura 8.

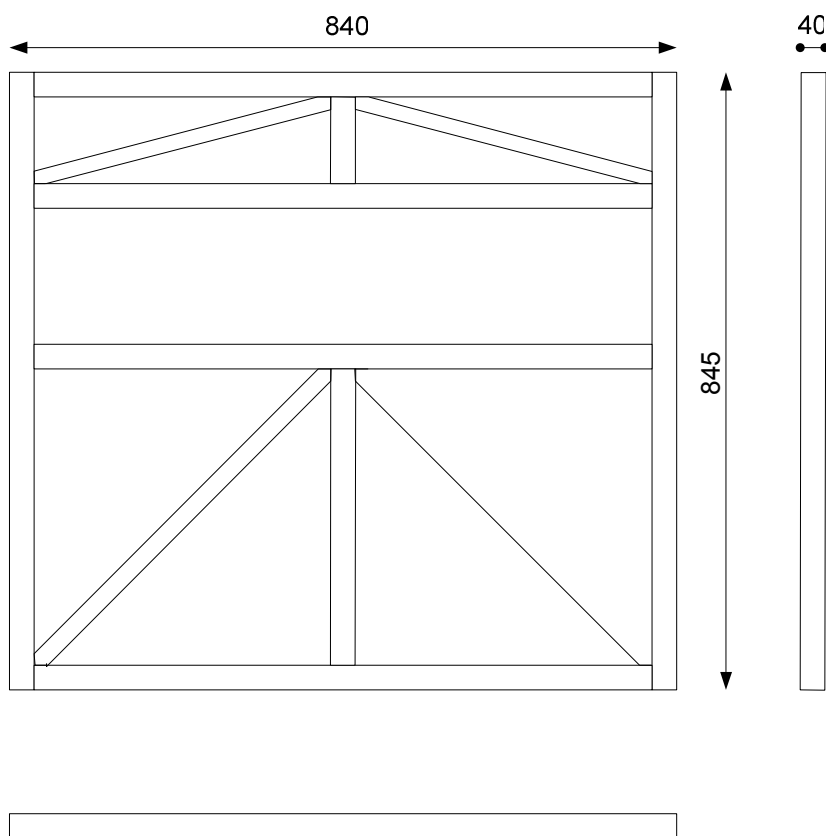


Figura 8 – Vista da estrutura de lateral menor do canal

A montagem do canal é mostrada esquematicamente pela figura 9, o qual possui em um dos lados, na parte inferior, a saída de água, por onde esta será escoada quando da limpeza do mesmo.

Com o canal montado, partimos para a montagem da plataforma de reboque, a qual será colocada sobre o canal de testes. Para suportar a plataforma de reboque, vamos colocar uma estrutura semelhante com a usada para o canal de testes, independente deste, de modo a não transmitir possíveis vibrações para o canal. Esta estrutura terá também uma área livre para não comprometer a já deixada na estrutura do canal. Esta estrutura será fixada no piso e sobre ela os trilhos cilíndricos onde se deslocará a plataforma de reboque.

A plataforma de reboque será confeccionada em estrutura de alumínio, sendo apoiada em dois eixos através de mancais de rolamento. Nas extremidades destes eixos serão colocadas rodas com revestimento de borracha, para absorver possíveis vibrações, disposta sobre trilhos de cantoneira.

O movimento longitudinal desta plataforma de reboque será dado através de um motor-reductor de 0,37 KW de potência, fixado na própria plataforma e transmitindo movimento para um dos eixos através de roda e correia dentada, de modo a evitar-se deslizamento. A variação de velocidade do motor será feita através de um conversor de frequência, o qual receberá os comandos a partir de um controle de malha fechada, através do computador.

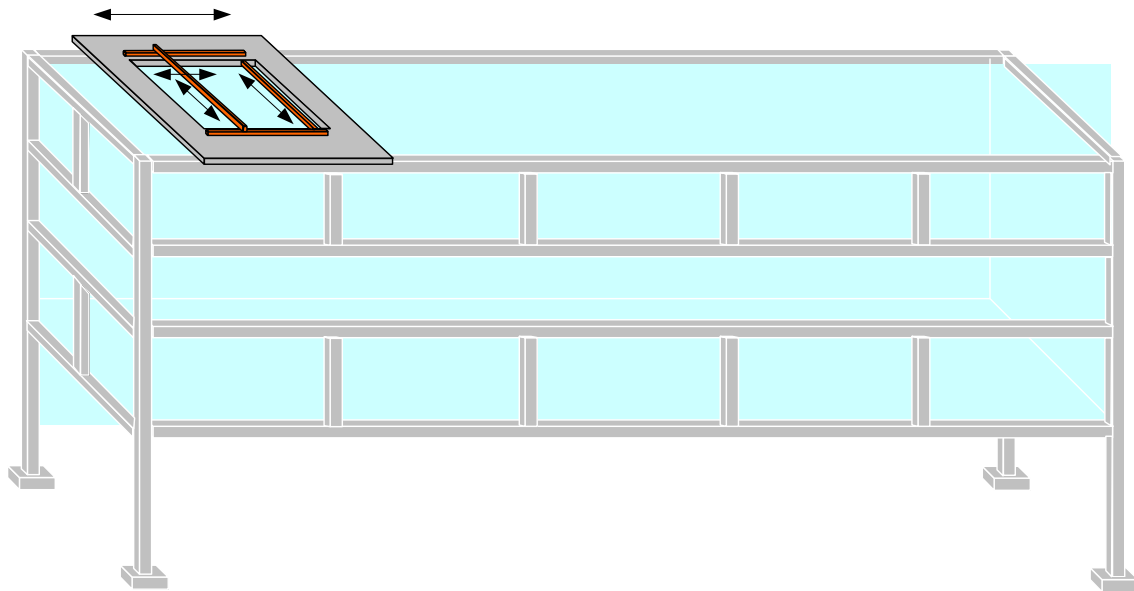


Figura 9 – Esquema de montagem do canal

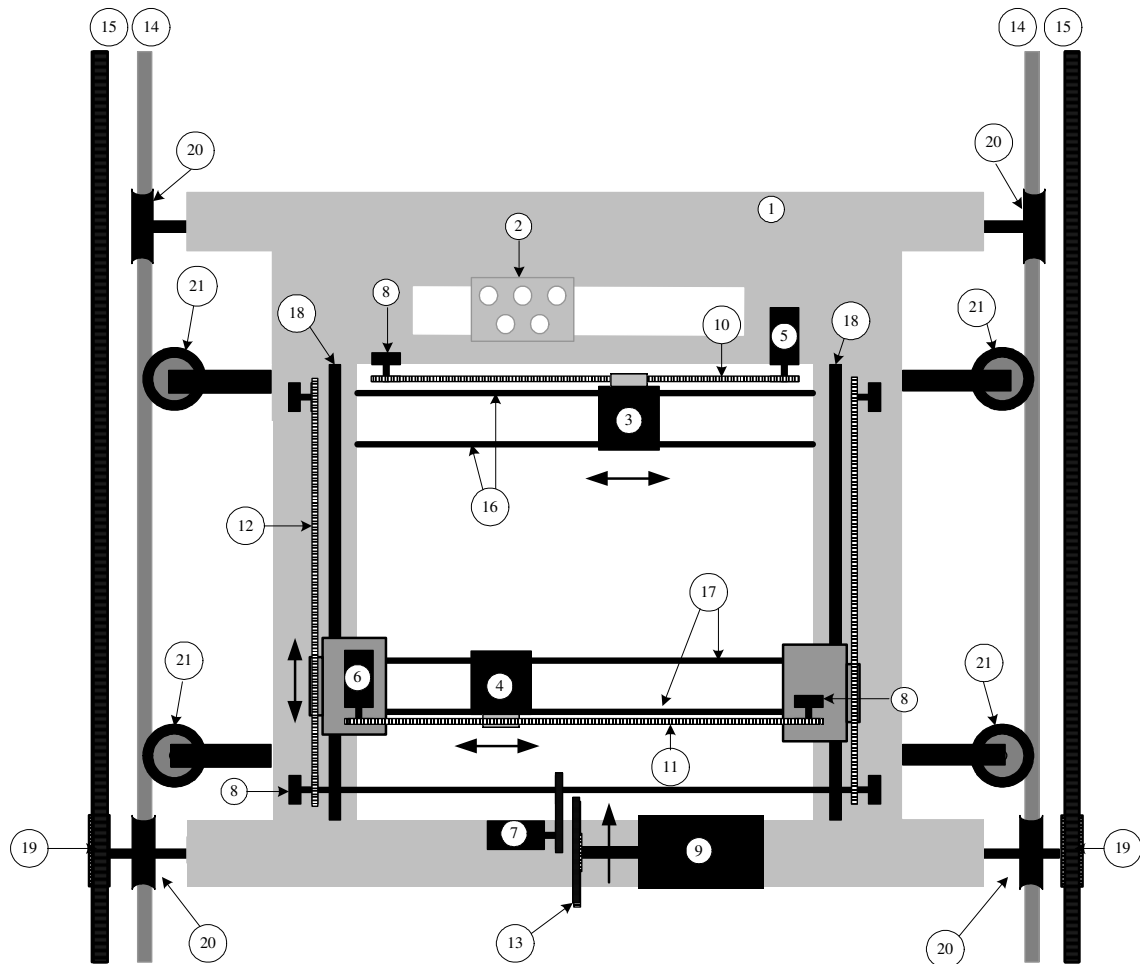
Como o controle de velocidade é feito no motor, poderá ocorrer um deslizamento entre a roda e o trilho, deste modo alterando a velocidade pretendida. Para garantir que não ocorrerá deslizamento, será colocado junto aos trilhos de deslocamento da plataforma uma cremalheira e no eixo de apoio da plataforma uma roda dentada, de modo que o engrenamento dos mesmos garantirá que não haverá deslizamento da roda sobre o trilho. Pode-se observar um esquema desta montagem na figura 10.

Cabe salientar que, neste projeto, a velocidade linear máxima da plataforma de reboque, será de 0,5 m/s, que em uma distância do canal de 9,60 metros.

Nesta plataforma de reboque será fixado os cilindros para análise. Esta análise consiste, neste trabalho, em visualização de vórtices, pressão exercida sobre os cilindros ao deslocar-se em um meio fluido e deformação sofrida pelos mesmos durante este deslocamento.

Além do deslocamento longitudinal, será possível imprimir a um grupo de cilindros deslocamentos longitudinais relativos e deslocamentos transversais e a outro grupo de cilindros somente deslocamentos transversais. Estes deslocamentos ocorreram através de atuadores, montados sobre a plataforma de reboque. Estes atuadores são compostos de uma estrutura onde será colocado um motor de corrente contínua e um sistema de redução, através de roda dentada e corrente, o qual permite uma redução de 1:9,43. A velocidade do motor é controlada por um sistema de malha fechada, através de computador, sendo esta verificada através de um encoder colocado no eixo motor. No eixo de saída do redutor do atuador será colocado uma roda dentada, e o conjunto é fixado na plataforma de modo que esta roda dentada fique sobre um dos lados do espaço que o cilindro tem para deslocar-se.

Do outro lado é colocada uma outra roda dentada, de tamanho menor e mesmo passo(ou módulo) de modo a permitir a colocação de uma correia dentada unindo-as. Um dispositivo fixado a correia será fixado também ao suporte do cilindro, o qual esta sobre guias. Deste modo, quando o atuador imprimir movimentos, a transmissão será repassada a correia dentada, que por sua vez, ao deslocar-se, irá deslocar também os cilindros em análise.



1. Estrutura da plataforma
2. Cilindros fixos à plataforma
3. Cilindro(s) com movimento oscilatório transversal
4. Cilindro(s) com movimento oscilatório transversal e longitudinal
5. Atuador cilindro 2
6. Atuador cilindro 3: Movimento transversal
7. Atuador cilindro 3: Movimento longitudinal
8. Mancais
9. Atuador do movimento de translação da plataforma
10. Sistema de transmissão cilindro 2
11. Sistema de transmissão cilindro 3: Movimento transversal
12. Sistema de transmissão cilindro 3: Movimento longitudinal
13. Sistema de transmissão translação plataforma
14. Trilhos principais
15. Cremalheiras principais
16. Trilhos cilindro 2
17. Trilhos cilindro 3: Movimento transversal
18. Trilhos cilindro 3: Movimento longitudinal
19. Engrenagens
20. Rodízios verticais
21. Rodízios laterais

Figura 10 – Esquema de montagem da plataforma de reboque

Será utilizado um atuador para cada movimento imposto aos cilindros. Desta maneira consegue-se induzir nos cilindros em análise movimentos relativos de translação e ao mesmo tempo movimentos transversais, que resultarão em movimentos harmônicos dos cilindros. A figura 11 mostra um esquema do redutor do atuador, que irá movimentar os cilindros.

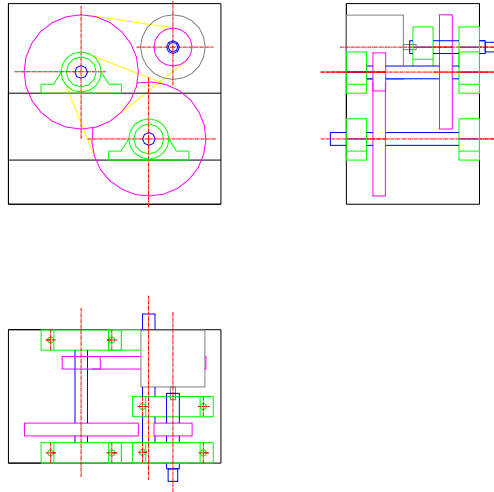


Figura 11- Esquema do redutor do atuador dos cilindros

Neste trabalho estes movimentos oscilatórios permitirão trabalhar com frequência de até 5 Hz e com amplitudes de deslocamento de até uma vez o diâmetro do cilindro em análise. É importante salientar que, devido ao tamanho do canal, teremos limitações no diâmetro do cilindro.

Após toda a estrutura montada, pode-se realizar testes com cilindros, que serão no primeiro momento a visualização do desprendimento de vórtices através da injeção de contraste e medição da pressão sobre o cilindro através de transdutores de pressão, com os sinais captados através de placa de aquisição de sinais e uso do programa LabVIEW de aquisição de dados.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a descrição das instalações para estudos de vibrações induzidas pelo escoamento que fazem parte das instalações do Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE) que se encontra em fase de implementação na FURG. Essas instalações vão permitir a realização de ensaios com vibração forçada assim com ensaios com estruturas flexíveis com frequência natural na faixa de 0 a 5 Hz. O número de Reynolds máximo da análise está em torno de 20000 o que é muito superior ao Reynolds passível de solução numérica via DNS. Estas instalações vão permitir um avanço significativo nas pesquisas fundamental de vibrações induzidas pelo escoamento e turbulência, assim com no desenvolvimento de modelos aplicados às estruturas oceânicas esbeltas.

REFERÊNCIAS

1. DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. EUA, 1993
2. NEWMANN, J. N. *Marine Hidrodynamics*. EUA, 1992.
3. NIEMANN, G. *Elementos de Máquinas, Vol. I, II e III*. Brasil, 1971.
4. PINTO, W. T. *On the dynamics of low tension marine cables*. London, 1995. Tese (Doutorado), University of London.
5. TIMOSHENKO, S. P. *Resistência dos Materiais, Vol. I e II*. Brasil, 1982.
6. STEMMER, C. E. *Projeto e Construção de Máquinas*. Brasil, 1979
7. SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. *Mechanical Engineering Design*. EUA, 1989.