

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ajuste de Coeficientes para Cálculo de Massa Adicional de Navios Bauxiteiros por
Medição de Vibração em Prova de Mar

Pedro Bittencourt da Rosa

ABRIL/2013



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AJUSTE DE COEFICIENTES PARA CÁLCULO DE MASSA ADICIONAL DE NAVIOS BAUXITEIROS POR MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM PROVA DE MAR

Pedro Bittencourt da Rosa

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Severino Fonseca da Silva Neto

Rio de Janeiro,RJ - Brasil

ABRIL DE 2013

AJUSTE DE COEFICIENTES PARA CÁLCULO DE MASSA ADICIONAL DE NAVIOS BAUXITEIROS POR MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM PROVA DE MAR

Navio tipo Bauxiteiro

Pedro Bittencourt da Rosa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Examinada por:

Prof. Severino Fonseca da Silva Neto, D.Sc.
(Orientador e Presidente da Banca Examinadora)

Prof. Alexandre Teixeira de Pinho Alho, D.Sc.

Eng. Antonio Carlos R. Troyman

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

da Rosa ,Pedro Bittencourt

Ajuste de Coeficientes para Cálculo de Massa Adicional de Navios Bauxiteiros por Medição de Vibração em Prova de Mar/ Pedro Bittencourt da Rosa. – Rio de Janeiro:UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

vi.45p.:il.;29,7cm

Orientador: Severino Fonseca da Silva Neto

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p.38

1 Introdução, 2 Conceitos Básicos, 3Características do Navio, 4 Medição de Vibração Local, 5 Medição de Vibração Global, 6 Resultados das medições, 7 Programa Utilizado na Medição, 8 Modelação do Casco, 9 Resultados

I .Severino Fonseca da Silva Neto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de engenharia Naval e Oceânica. III. Ajuste de Coeficientes para Cálculo de Massa Adicional de Navios Bauxiteiros por Medição de Vibração em Prova de Mar

RESUMO

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à POLI/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval e Oceânico.

Ajuste de Coeficientes para Cálculo de Massa Adicional de Navios Bauxiteiros por Medição de Vibração em Prova de Mar Navio tipo Bauxiteiro

Pedro Bittencourt da Rosa

ABRIL DE 2013

Orientador: Severino Fonseca da Silva Neto

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

Este projeto final de graduação tem como objetivo realizar um estudo do ajuste de coeficientes para cálculo de massa adicional de navios bauxiteiros por medição de vibração em prova de mar pelo Método dos Elementos Finitos. Para isso, constrói-se o modelo de elementos finitos unidimensional do casco de um navio bauxiteiro, cuja massa adicional é calculada por uma função quadrática na relação (boca/calado) em cada seção, na condição medida em prova de mar. As frequências naturais determinadas por medição de vibração são utilizadas como referência para minimização dos desvios quadráticos numérico-experimentais. Os valores são comparados aos recentemente obtidos para outros tipos de navios.

Palavras-chave: Flexibilidade do Casco, Bauxiteiro, Graneleiro, Vibração, Massa Adicional, Método dos Elementos Finitos, Frequências Naturais, Ressonância.

ABSTRACT

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Naval and Ocean Engineer.

Adjustment Coefficients for the Calculation of Added Mass of Bauxite Ship through Sea Trial Measurements Vibration in Sea Test

Pedro Bittencourt da Rosa

APRIL/2013

Advisor: Severino Fonseca da Silva Neto

Course: Naval and Ocean Engineering

This final graduation project has to conduct a study of the an adjustment study of the coefficients to calculate the added mass bauxite ship by measuring vibration during sea trials and by the Finite Element Method. For this, it is built a one-dimensional finite element model of the hull of a bauxite ship whose added mass is calculated by a quadratic function of the relation (breadth/draft relation) in each section, using the loading condition at sea trial. The determined natural frequencies from by measurement of vibration are used as reference for minimizing the squared deviations numerical-experimental. The values are compared to those recently obtained values for other types of ships.

Keywords: Flexibility Hull, Bauxite, Bulk, Vibration, Added Mass, Finite Element Method, Resonance Natural Frequency Natural.

Table of Contents

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo	1
2 CONCEITOS BÁSICOS.....	2
2.1 Vibração de Sistemas Discretos.....	2
2.2 Vibração da Viga Navio	3
3 PROCEDIMENTOS FEITOS EM LABORATÓRIO	12
4 ESTUDO DE CASO: VIBRAÇÃO VERTICAL DO CASCO DE UM NAVIO BAUXITEIRO.....	13
4.1 Características do Navio	13
5 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO LOCAL	16
5.1 Locais Medidos e seus Limites de Vibração	16
6 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO GLOBAL	17
6.1 Locais Medidos.....	17
7 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES.....	19
8 PROGRAMA UTILIZADO NA MEDIÇÃO.....	29
9 MODELAÇÃO DO CASCO.....	31
9.1 Unidades de Medida	31
9.2 Propriedades do Material	31
10 RESULTADOS	41
11 ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	44

Observando os resultados apresentados na tabela anterior, conclui-se que o coeficiente linear ACL de 0,221 para a expressão da massa adicional, que nesse caso totaliza 121%, onde os desvios dos valores de frequência são inferiores 1% para os dois primeiros modos, mas um erro considerável de 27% para o terceiro. O que apresentou menor desvio quadrático total foi o coeficiente ACL de 0,279 correspondente a uma massa

adicional de 153%, onde seu desvio total quadrático foi de 4%, menor que os tradicionais de Burrell 11%, Todd 5% e Kumay 9%..... 44

Como a previsão das frequências apenas dos dois primeiros modos foi muito bem indicada pelo coeficiente ACL de 0,221 (massa adicional de 121%) e próximo à previsão de Kumay de 113% de massa adicional com desvios de 3% e 1%, iremos utiliza-lo para nossa conclusão, sugere-se num próximo estudo a representação do navio por vigas paralelas acopladas por molas, que possam explicar desvios das frequências em modos mais altos de vibração. 44

12 Bibliografia..... 45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo do ajuste de coeficientes para cálculo de massa adicional de navios bauxiteiros por medição de vibração em prova de mar pelo Método dos Elementos Finitos.

A modelação unidimensional de navios permite a construção de modelos simples a partir dos elementos estruturais de sua seção mestra, massa estrutural carga e adicional.

Viabilizar a utilização de fórmulas simplificadas para cálculo da massa adicional, essencial para a predição das frequências naturais de cascos de navios em geral e evitar condições de ressonância ainda na fase de projeto de navios do mesmo tipo, são os resultados buscados no modelo. Foram realizadas medições de vibração no casco e seus espectros de amplitude de velocidade de vibração foram obtidos das medições e permitiram identificar as frequências naturais da vibração global do casco, comparadas às do modelo numérico.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Vibração de Sistemas Discretos

O sistema discreto de equações diferenciais de equilíbrio dinâmico é expresso como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\}$$

A determinação precisa dos parâmetros que representam as matrizes de rigidez $[K]$ a partir da energia potencial elástica e de massa $[M]$ a partir da energia cinética do sistema, modelado através do método dos elementos finitos, bem como o vetor das forças externas $\{f(t)\}$ e da matriz de amortecimento $[C]$, permitem a solução numérica do sistema de equações diferenciais, onde os vetores $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ e $\{u\}$ correspondem, respectivamente, às acelerações, velocidades e deslocamentos dos graus de liberdade do sistema.

Os maiores danos em sistemas mecânicos são geralmente causados por condições de ressonância, que ocorrem quando a frequência da força de excitação está próxima a uma dada frequência natural ω (rad/s) da estrutura. No estudo de vibrações livres não amortecidas, considera-se $[C]=[0]$ e $\{f(t)\}=\{0\}$ e propõe-se a solução:

$$\{u\} = \{\phi\} \sin(\omega t)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

Se $\{\phi\}$ e ω^2 representam, respectivamente, o autovetor (modo de vibração) e o autovalor da equação de vibrações livres:

$$[K]\{\phi\} = \omega^2[M]\{\phi\}$$

Tanto para a solução do problema de autovalor, quanto para o cálculo do problema completo da vibração forçada, no domínio do tempo ou da frequência, é fundamental a representação correta de rigidez, massa estrutural, massa do fluido adjacente e, principalmente, amortecimento e força, geralmente obtidos de medições em escala real.

2.2 Vibração da Viga Navio

Um sistema é dito contínuo quando sua rigidez e massa são distribuídas continuamente, que é o caso da viga navio. As vibrações sofridas por estes sistemas podem ser classificadas em torcionais, longitudinais e laterais (horizontais e verticais), e são geradas pela ação de forças dinâmicas (variantes no tempo) agindo nos elementos estruturais locais e casco do navio. A resposta à vibração de um sistema é função do módulo das forças e da resposta dinâmica deste sistema.

Quando o navio sofre com problemas causados devido por condições da viga navio, poucos são os recursos capazes de modificar as frequências naturais envolvidas. Alguns fatores que influenciam são, por exemplo, a rigidez da estrutura do casco, e as condições de carregamento.

As frequências naturais de vibração da viga navio dependem não somente da rigidez do casco como da distribuição de massa e distribuição do efeito do meio fluido sobre a viga.

Das vibrações laterais horizontal e vertical, podemos dizer que esta última geralmente mostra-se mais preocupante. Isso porque a rigidez horizontal do casco, sendo maior do que a vertical, tem frequência natural bastante elevada. Assim, vibrações verticais são alvos de atenção devidos a suas baixas frequências naturais, mais próximas dos momentos de excitação de primeira e segunda ordens do motor principal. Dessa forma, em navios equipados com motores diesel, principalmente de grandes dimensões, a determinação das frequências de ressonância é de suma importância, uma vez que as forças externas e/ou momentos externos gerados por esses motores podem causar problemas graves devido à vibração, além de atingir níveis excessivos de tensões, não obstante o desconforto da tripulação.

2.3 Massa Adicional

Encontrar-se parcialmente submersa é o que diferencia a viga navio de uma viga qualquer. O fluido gera energia cinética do fluido é gerada dá pelo movimento de um corpo em vibração ou deslocando-se em aceleração neste meio fluido.

A influência desta energia deve ser levada em conta. Para estudá-la, consideramos uma seção do navio oscilando e deslocando as partículas do meio fluido, de forma que tanto o navio quanto o fluido apresentam movimento oscilatório. Os os parâmetros que influenciam o cálculo dessa massa adicionada são, entre eles, a forma da seção e a profundidade do meio fluido.

Pesquisadores como Burril, Todd, Kumay e Lewis desenvolveram meios de calcular a massa adicional. Os métodos de Burril, Todd e Kumay são empíricos e fornecem resultados aproximados, enquanto Lewis desenvolveu o método que apresenta resultados com maior confiabilidade e precisão. Seu método foi posteriormente aprimorado, e se baseia no que chamamos de “Transformação Conforme”, transformando os resultados das seções circulares em de seções típicas de navios.

Burril, Todd e Kumay e Transformação Conforme são métodos que tem por finalidade calcular o M' (Massa Adicional por Unidade de Comprimento).

BURRIL:

$$M' = M \left(1 + \frac{b}{2d} \right)$$

TODD:

$$M' = M \left(1,2 + \frac{b}{3d} \right)$$

KUMAY:

$$M' = M \left(1 + \frac{0,4B}{d} - 0,035 \left(\frac{B}{d} \right)^2 \right)$$

Onde:

M' = Massa M acrescida da massa adicional

M = Deslocamento

B = Boca do navio

d = Calado

Estes resultados são bem representados nas curvas de Landweber, mostradas abaixo.

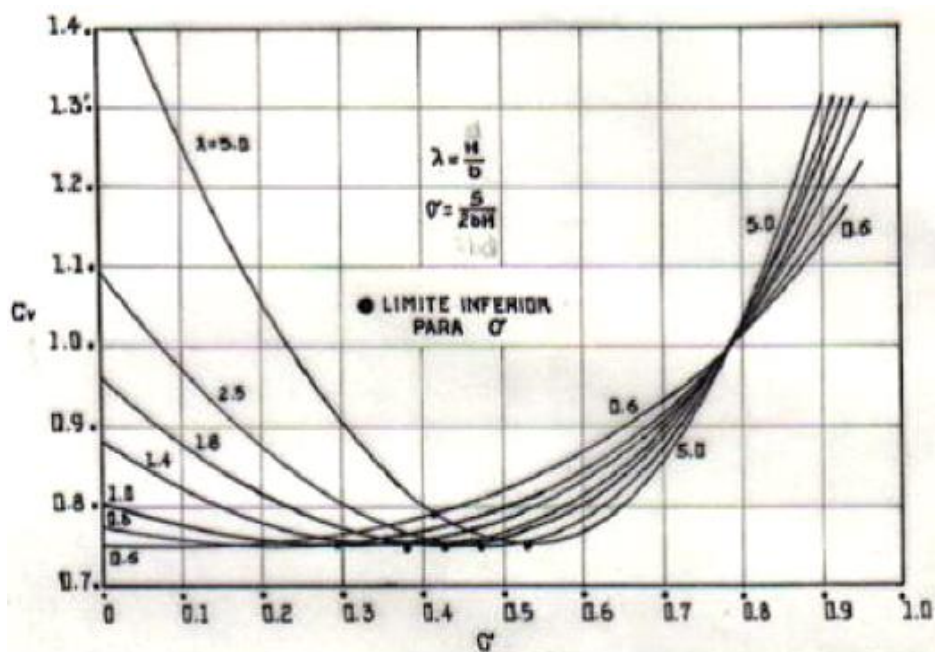


Figura 1 – Coeficiente de Massa Virtual para Movimento Vertical

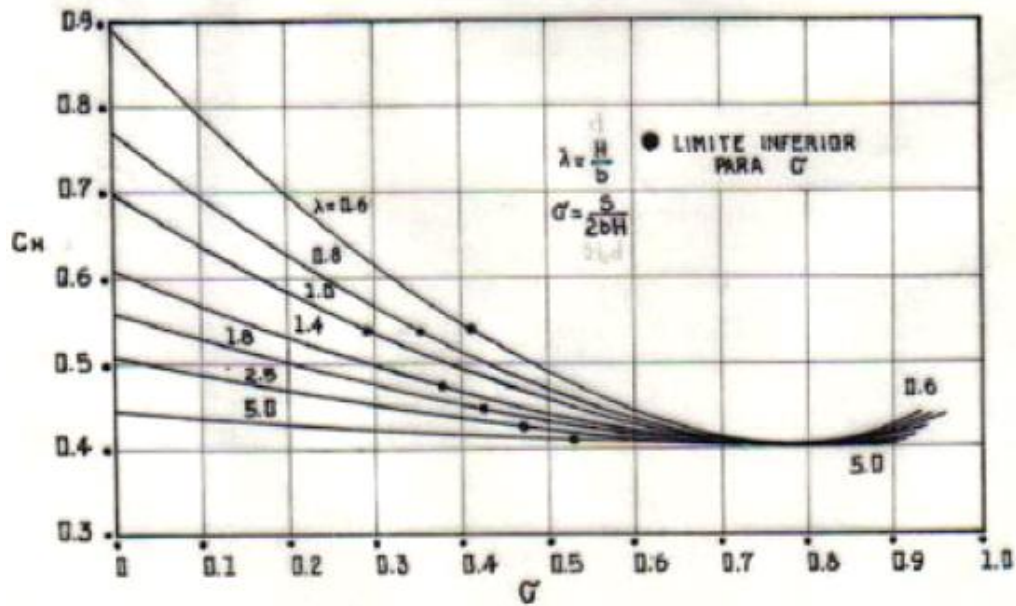


Figura 2 – Coeficiente de Massa Virtual para Movimento Horizontal

Os coeficientes de massa virtual vertical (C_V) e horizontal (C_H) obtidos dos gráficos permitem-nos calcular as massas adicionais horizontais (M'_H) e verticais (M'_V). Os dados de entrada para obtenção destes resultados dependem de características das seções do navio, como calado e boca, conforme mostrada na formulação a seguir.

$$\lambda = \frac{d}{b} \quad ; \quad \sigma = \frac{S}{2bd}$$

Onde b corresponde à meia boca, d ao calado e S à área imersa da seção.

Com os valores de λ e σ , um terceiro parâmetro, α , é calculado, dependendo de certas condições:

$$\text{se } \lambda < 1 \text{ e } (2 - \lambda) \cdot \frac{3\pi}{32} < \sigma < (12 + \lambda) \cdot \frac{3\pi}{128}$$

ou

$$\text{se } \lambda \geq 1 \text{ e } \left(2 - \frac{1}{\lambda}\right) \cdot \frac{3\pi}{32} < \sigma < (12\lambda + 1) \cdot \frac{3\pi}{128\lambda}$$

então

$$\alpha = \frac{3(1 + \lambda) - \sqrt{9(1 + \lambda)^2 - 8 \left[1 + \left(1 + \frac{4\sigma}{\pi} \right) \cdot \lambda + \lambda^2 \right]}}{2}$$

$$\text{se } \lambda < 1 \text{ e } \sigma \leq (2 - \lambda) \frac{3\pi}{32}$$

então

$$\alpha = 1 + \frac{\lambda}{2}$$

ou

$$\text{se } \sigma \geq (12 + \lambda) \cdot \frac{3\pi}{128}$$

então

$$\alpha = 1 + \frac{5\lambda}{4}$$

$$\text{se } \lambda \geq 1 \text{ e } \sigma \leq \left(2 \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \cdot \frac{3\pi}{32}$$

então

$$\alpha = \frac{1}{2} + \lambda$$

ou

$$\text{se } \sigma > (12\lambda + 1) \cdot \frac{3\pi}{128\lambda}$$

então

$$\alpha = \frac{5}{4} + \lambda$$

Uma vez de posse do valor de α , podemos calcular os coeficientes:

$$C_V = 1 + (1 + \lambda - \alpha) \cdot (\lambda - \alpha)$$

$$C_H = \frac{4}{\pi^2} \left[\frac{1 + 4(1 + \lambda - \alpha)^2}{3\lambda^2} \right]$$

As massas virtuais bidimensionais são calculadas por:

$$M'_V = 1/2 \pi \rho b^2 C_V$$

$$M'_H = 1/2 \pi \rho d^2 C_H$$

Onde ρ é a massa específica do fluido. Se \mathbf{b} e \mathbf{d} forem fornecidos em metros e \mathbf{S} em m^2 , M'_V e M'_H serão obtidas em ton/m.

Para todos os métodos citados faz-se uma correção para cada modo de vibração através da fórmula de Townsin. Nesse trabalho a massa adicional foi considerada a mesma para todos os modos de vibração, pois o programa possui entrada única para o cálculo de todos os modos. Em trabalhos futuros é possível investigar o quanto essa hipótese pode influenciar os valores das frequências naturais.

2.4 PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DE MASSA ADICIONAL

Observa-se que nas três formulações simplificadas de Burril, Todd e Kumay, a massa adicional por unidade de comprimento varia de forma linear ou quadrática em função da razão (boca/calado) na seção.

As três formulações podem ser descritas como casos particulares da função quadrática geral da forma:

BURRIL:

$$M' = M \left(1 + \frac{b}{2d} \right)$$

TODD:

$$M' = M \left(1,2 + \frac{b}{3d} \right)$$

KUMAY:

$$M' = M \left(1 + \frac{0,4B}{d} - 0,035 \left(\frac{B}{d} \right)^2 \right)$$

Onde:

M' = Massa M acrescida da massa adicional

M = Deslocamento

B = Boca do navio

d = Calado

ACC – Coeficiente Constante

ACL – Coeficiente Linear

ACQ – Coeficiente Quadrático

Dessa forma, as formulações de Burril, Todd e Kumay podem ser representadas substituindo seus coeficientes pelos valores abaixo na função quadrática geral.

Tabela 1- Formulações X Coeficientes

	Burriel	Todd	Kumay
ACC	1	1,2	1
ACL	1/2	1/3	0,40
ACQ	0	0	-0,035

Propõem-se nesse trabalho o ajuste de coeficientes quadrático, linear e constante, para cálculo da massa adicional, baseada nos valores de frequências naturais obtidos numericamente e comparados aos valores medidos em prova de mar.

O procedimento tem como primeiro passo a construção do modelo unidimensional de elementos finitos de um navio selecionado, de um determinado tipo, cujas primeiras frequências naturais de vibração vertical foram obtidas experimentalmente durante prova de mar ou viagem. Para isso, são necessários os planos do navio e informações sobre estrutura, condição de carregamento e flutuação durante a medição de vibração que deu origem aos valores experimentais das frequências naturais. De posse dessas informações, executa-se o seguinte procedimento, inicialmente numérico em programa de Elementos Finitos, para cálculo de frequências naturais e respectivos modos de vibração de um modelo unidimensional do navio composto por elementos de viga, com atenção para compatibilidade das unidades empregadas:

- Entrada de dados dos elementos de viga que compõem o casco:
- Material do casco: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica.
- Coordenadas dos nós: localização de cada caverna em relação a um referencial na viga-navio.

- Elementos: incidência dos nós, material e propriedade da seção entre cavernas.
- Entrada de dados dos elementos de massa, incluindo massa do carregamento na condição em que a vibração foi medida e a massa adicional calculada por um conjunto de coeficientes ACC, ACL e ACQ multiplicados pela razão (Boca/Calado), em cada caverna, elevada a potências 0, 1 e 2, respectivamente.
- Propriedades: valor da massa do carregamento mais adicional concentrada em cada caverna.
- Elementos: correspondência entre o número do nó da caverna e a propriedade.
- Resultados numéricos: avaliação numérica dos valores das frequências naturais correspondentes aos modos de vibração medidos.
- Cálculo da soma dos erros quadráticos: somatório dos quadrados das diferenças entre os valores das frequências naturais medidas e obtidas numericamente pelo conjunto de coeficientes de massa adicional utilizado.

Repetir procedimento para outros conjuntos de coeficientes ACC, ACL e ACQ e utilizar técnica de busca de desvio mínimo em relação às frequências naturais medidas.

3 PROCEDIMENTOS FEITOS EM LABORATÓRIO

Os sinais de vibração foram adquiridos por um sistema de aquisição analógica/digital e armazenados. Esses sinais foram processados (em laboratório) utilizando a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para então ser realizada a análise espectral de todos os sinais.

As medições foram realizadas com a embarcação em MCR e em rumo reto.

MCR = Maximum Continuous Rate = Máxima Taxa Contínua

Equipamentos de medição:

- 1 acelerômetro piezoelétrico 601A01 da IMI;
- 1 condicionador de sinais cRio 9233 da National Instruments com quatro canais;
- 1 notebook Dell latitude E4310 equipado com software especialmente desenvolvido em LabVIEW para a aquisição dos sinais.

4 ESTUDO DE CASO: VIBRAÇÃO VERTICAL DO CASCO DE UM NAVIO BAUXITEIRO

O navio utilizado para obtenção dos coeficientes ACC, ACL e ACQ para cálculo da massa adicional foi um BAUXITEIRO de 80100 TPB, que foi submetido a medições de vibrações durante suas provas de mar. Em complemento aos testes de vibração, foram realizadas medições extras de 15 minutos de duração com a excitação das ondas no casco do navio, quando foi possível identificar 3 frequências naturais de vibração livre do navio. Essas são utilizadas para comparação como os resultados obtidos com o modelo numérico unidimensional. Suas características principais são apresentadas na figura abaixo:

4.1 Características do Navio

A embarcação em estudo é o Navio Bauxiteiro Log-In Tambaqui, entregue no dia 10/01/2013, classificado pela sociedade classificadora Lloyd's Register. O Log-In Tambaqui foi a primeira unidade de dois navios encomendados ao estaleiro EISA, que se localiza na Ilha do Governador. Foi encomendado pelo armador Log-In Logística Intermodal S.A. - Rio de Janeiro, RJ. Este foi o navio com maior boca já construído no estaleiro.

Conferimos abaixo a embarcação, sua área de atuação e a seção típica da região de corpo paralelo:



Figura 2 - Navio Bauxiteiro Log-In Tambaqui

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	
MAIN CHARACTERISTICS	
COMPRIMENTO TOTAL LENGTH OVERALL	245,00 m
COMPRIMENTO ENTRE PERPENDICULARES LENGTH BETWEEN PERPENDICULARS	237,00 m
BOCA MOLDADA BREADTH (MOULDED)	40,00 m
PONTAL MOLDADO DEPTH (MOULDED)	17,60 m
CALADO DE PROJETO (MOLDADO) DESIGN DRAFT (MOULDED)	11,58 m
CALADO DE ESCANTILHÕES (MOLDADO) SCANTLING DRAFT (MOULDED)	12,08 m

Figura 4 - Características Principais do NavioBauxiteiro Log-In Tambaqui

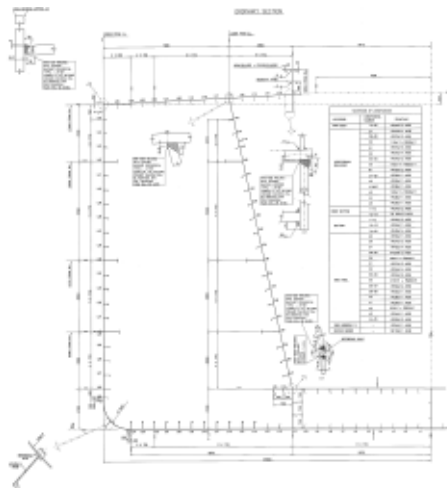


Figura 5 - Seção Mestre

Conferimos a seguir suas características principais:

- Comprimento Total: 245 metros
- Comprimento entre Perpendiculares: 237 metros
- Boca Moldada: 40 metros
- Pontal Moldado: 17 metros
- Calado de Projeto: 11.58 metros
- Coeficiente de Bloco: 0,8449
- Velocidade de Serviço: 14 nós
- Porte Bruto: 80100 toneladas
- Deslocamento : 60 000 toneladas
- Arqueação Bruta: 49500 toneladas
- Arqueação Líquida: 18970 toneladas
- Volume total de granel (bauxita) : 68 888 m³
- Porões de Carga: 6
- Motor Principal:Wartisilla 6RT-flex50B de 13540 BHP x 124 rpm
- Número de pás : 4
- Número de cilindros : 6

5 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO LOCAL

5.1 Locais Medidos e seus Limites de Vibração

As medições de vibração local no navio foram realizadas em prova de mar na condição de lastro. As frequências naturais e as respostas do casco às diversas fontes de excitação encontradas a bordo foram detectadas através de curvas de ressonância obtidas com acelerômetros instalados na estrutura e processadas em analisadores de espectro do tipo que utiliza FFT (“Fast Fourier Transform”).

As medições foram realizadas com a embarcação em MCR e em rumo reto.

Os locais abaixo, foram sempre medidos na direção vertical.

Local	Amp (mm/s pico)	Freq (Hz)	Limite (mm/s pico)
Oficina Máquinas - V	0,97	1,30	6,0
CCM - V	1,30	12,2	6,0
Oficina Elétrica - V	1,00	2,10	6,0
Enfermaria - V	0,83	12,3	5,0
Camarote Suez - V	0,45	4,10	5,0
Sala de Reunião - V	0,65	12,4	5,0
Escritório do Navio - V	0,59	4,20	5,0
Refeitório - V	0,95	2,00	5,0
Cozinha - V	0,88	2,10	5,0
Sala Estar dos Oficiais - V	0,91	12,4	5,0
Camarote B-308 - V	1,10	12,3	5,0
Camarote B-307 - V	0,53	4,10	5,0
Camarote B-306 - V	1,60	12,4	5,0
Camarote C-402 - V	1,20	16,6	5,0
Camarote C-403 - V	0,99	12,4	5,0
Camarote C-410 - V	2,10	12,4	5,0
Camarote D-505 - V	0,59	18,5	5,0
Camarote D-506 - V	2,20	12,3	5,0
Passadiço - V	4,5	12,4	5,0
Passadiço - T	2,80	12,4	5,0
Passadiço - L	2,20	12,4	5,0
Asa do Passadiço BB - V	24,0	12,4	30,0
Asa do Passadiço BE - V	27,0	12,4	30,0

Figura 6 – Localização das Medições de Vibração Local

6 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO GLOBAL

6.1 Locais Medidos

As medições de vibração global no navio foram realizadas em prova de mar na condição de lastro. As frequências naturais e as respostas do casco às diversas fontes de excitação encontradas a bordo foram detectadas através de curvas de ressonância obtidas com acelerômetros instalados na estrutura e processadas em analisadores de espectro. As medições foram realizadas com a embarcação em MCR e em rumo reto.

A figura abaixo mostra os pontos onde foram instalados os acelerômetros durante as medições. Durante a prova de mar foram realizadas medições em oito (8) pontos na estrutura da embarcação, em diferentes rotações.

São eles:

- 01V - Popa (linha de centro) convés principal (vertical)
- 02L – Vante da superestrutura acima do convés do passadiço (longitudinal)
- 03T – Vante da superestrutura acima do convés do passadiço (transversal)
- 04V - Vante da superestrutura acima do convés do passadiço (vertical)
- 05V - Vante da superestrutura convés principal (vertical)
- 06L – MCP topo vante (longitudinal)
- 07T – MCP topo vante (transversal)
- 08V – MCP topo vante (vertical)

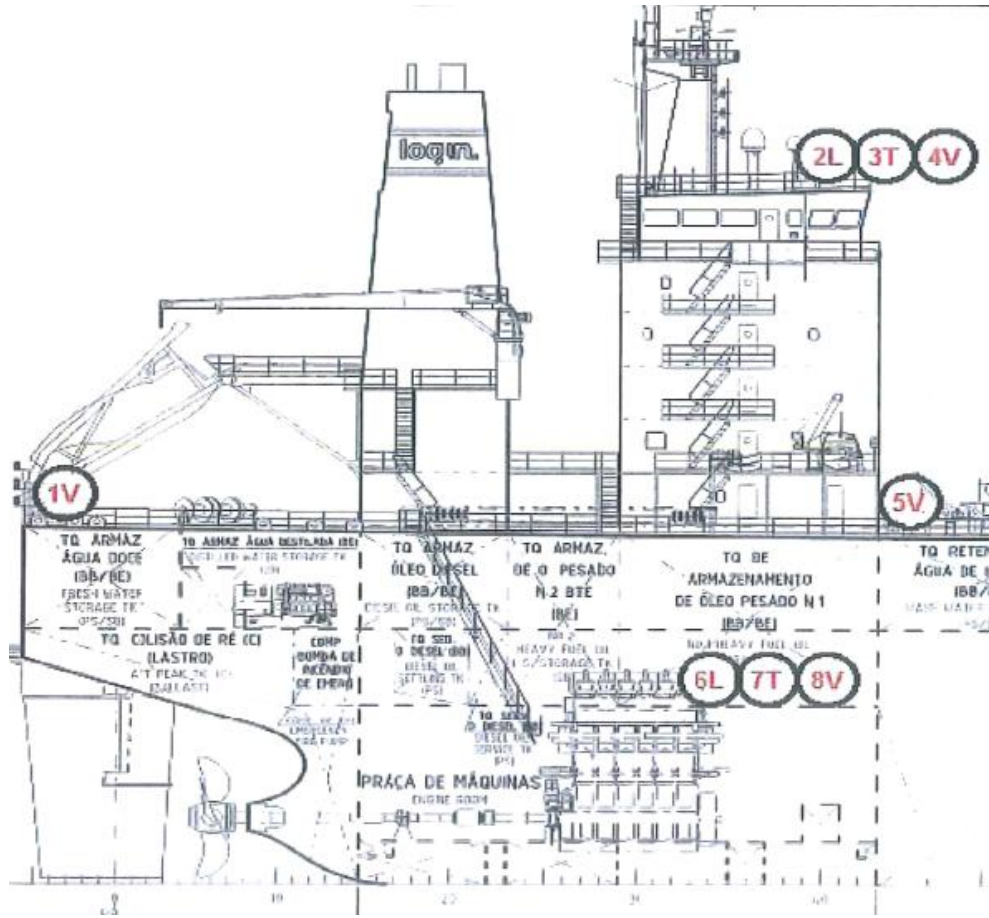


Figura 7 - Distribuição dos acelerômetros durante as medições global

7 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Foram realizadas medições de vibração global simultaneamente nos referidos pontos nas rotações de 80,82,84,88,90,94,96,98,100,102,104,106,108,110,112,114,116,118,120,122 e 124 RPM. Alguns espectros de amplitude de velocidade de vibração (em mm/s zero a pico ou amplitude simples) em função da frequência estão apresentados da figura 8 à 16.

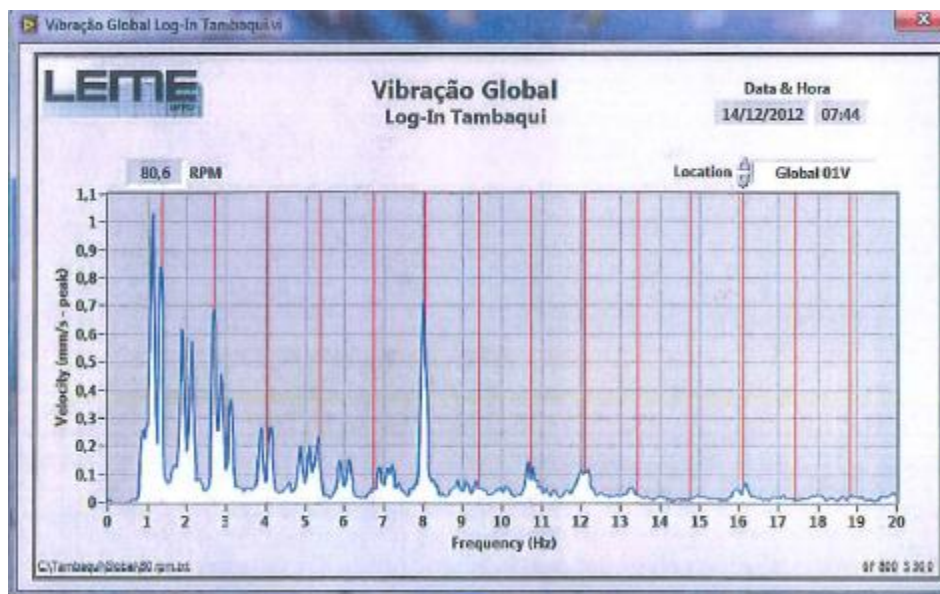


Figura 8 – Espectro de Resposta do Ponto 01V

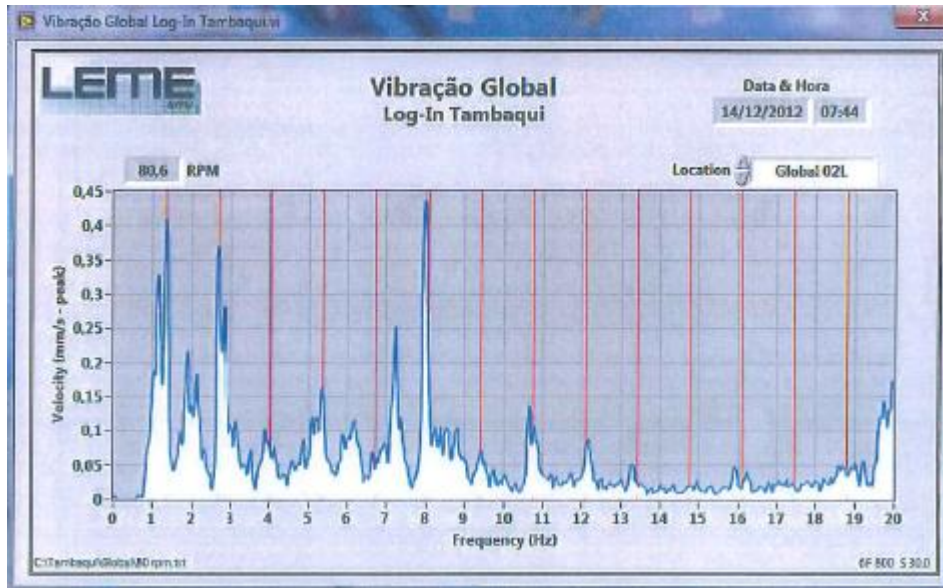


Figura 9 – Espectro de Resposta do Ponto 02L

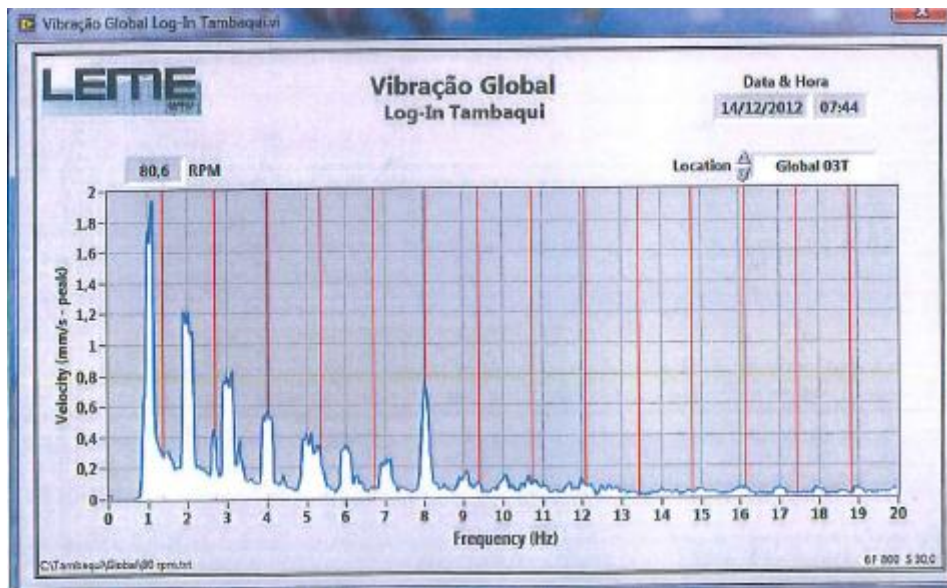


Figura 10 – Espectro de Resposta do Ponto 03T

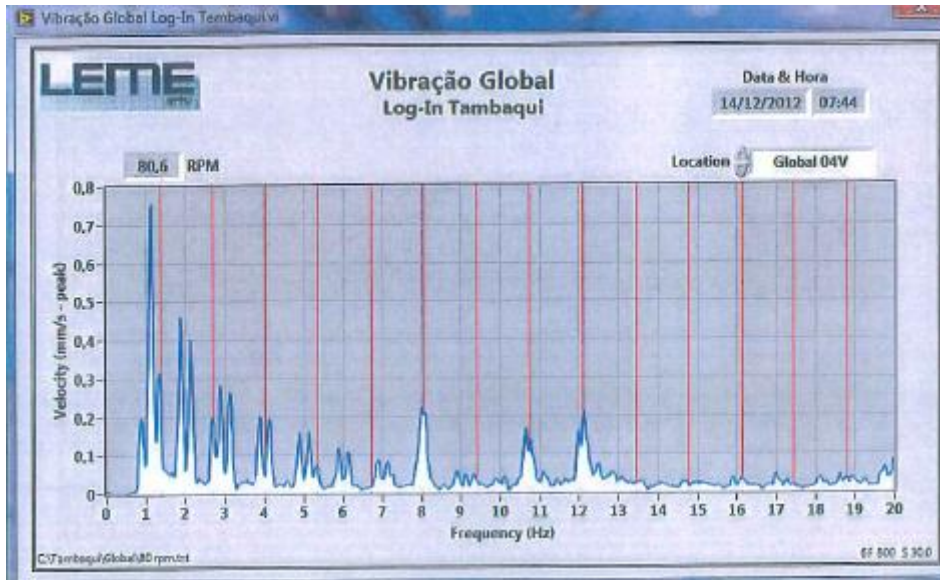


Figura 11 – Espectro de Resposta do Ponto 04V

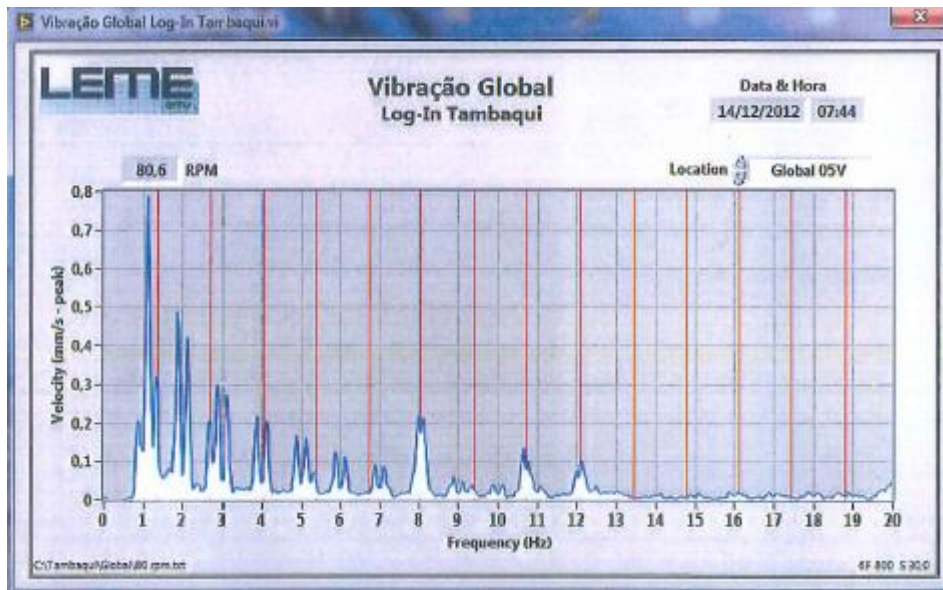


Figura 12 – Espectro de Resposta do Ponto 05V

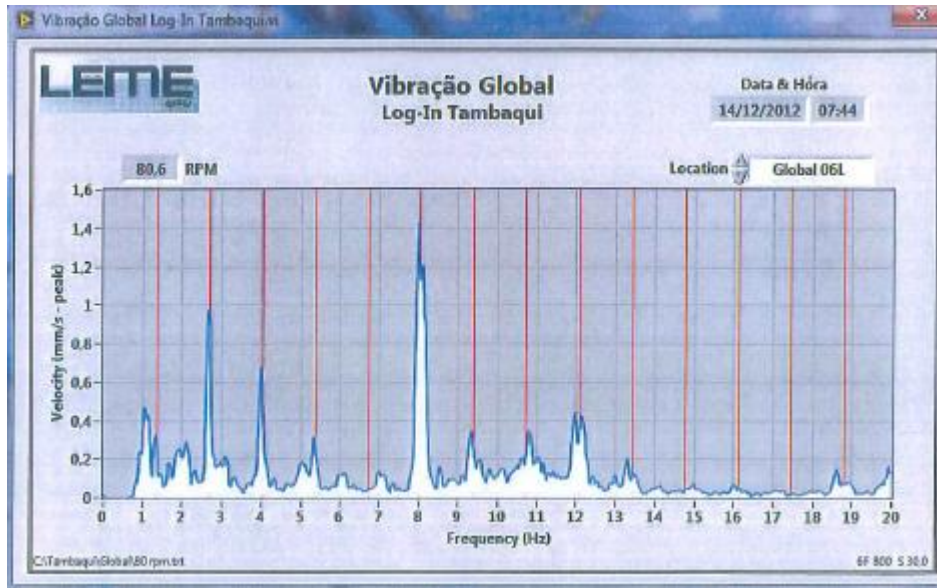


Figura 13 – Espectro de Resposta do Ponto 06L

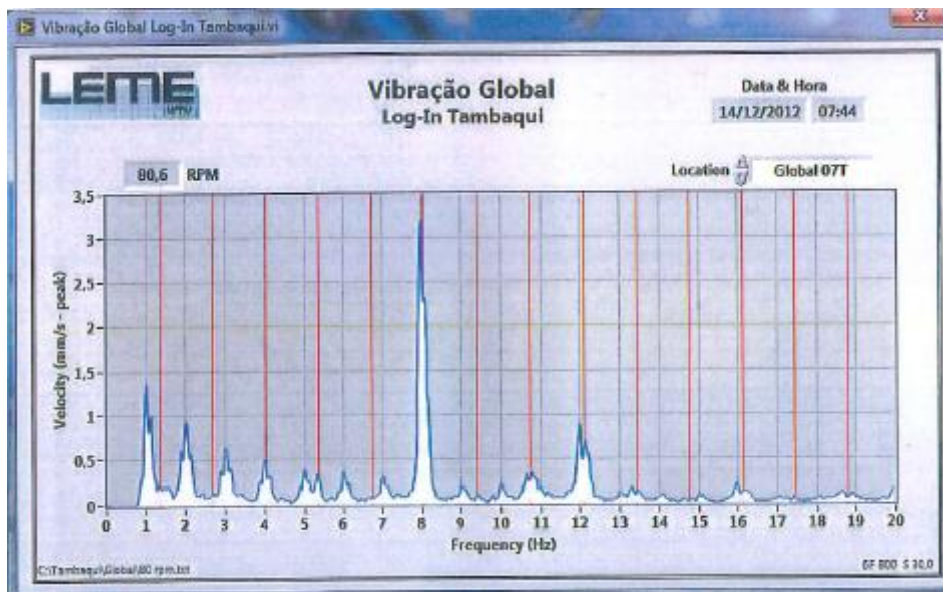


Figura 14 – Espectro de Resposta do Ponto 07T

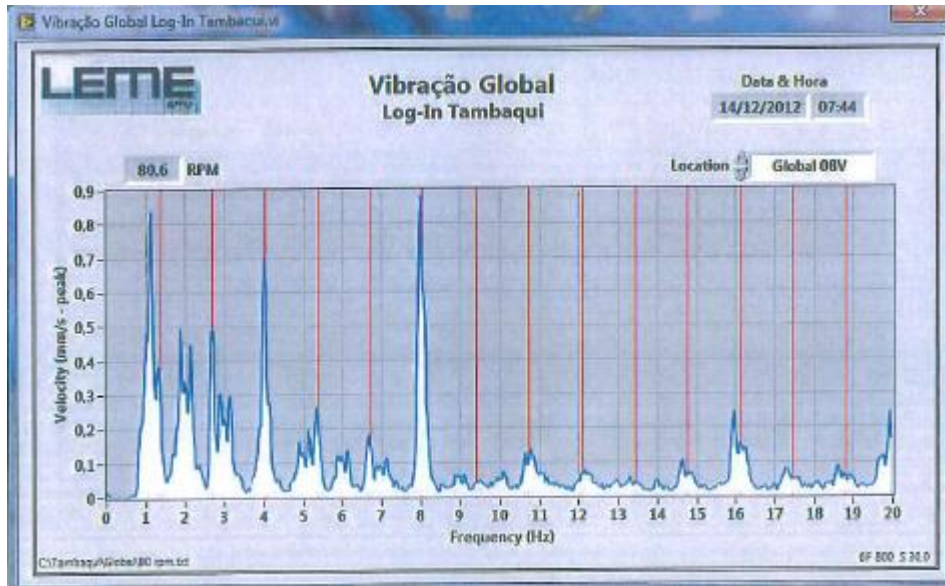


Figura 15 – Espectro de Resposta do Ponto 08V

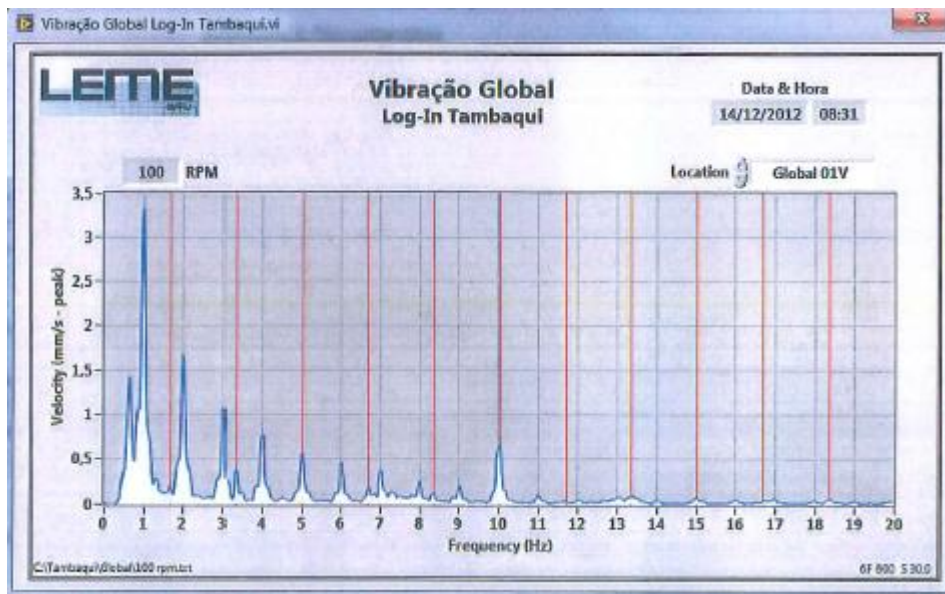


Figura 16 – Espectro de Resposta do Ponto 01V

Dos espectros obtidos das medições foram plotados gráficos das evoluções dos principais harmônicos em função da rotação do MCP, de todos os pontos e, estes gráficos estão apresentados figura de 17 à 24.

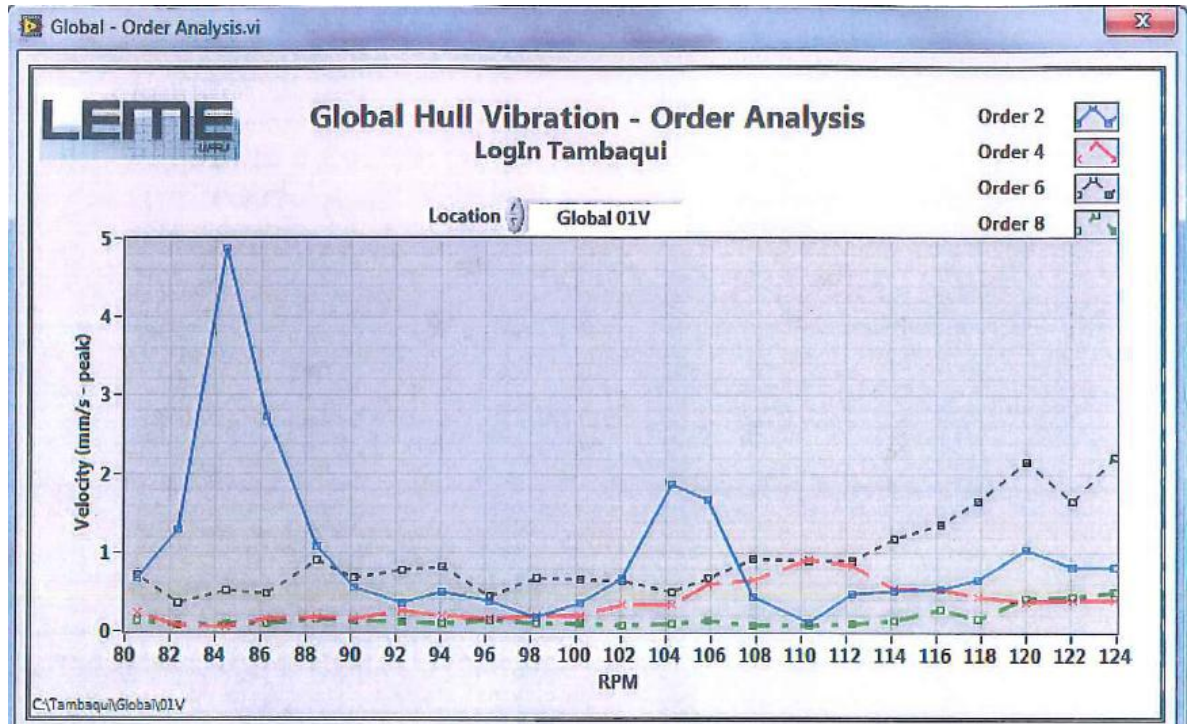


Figura 17 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 01V

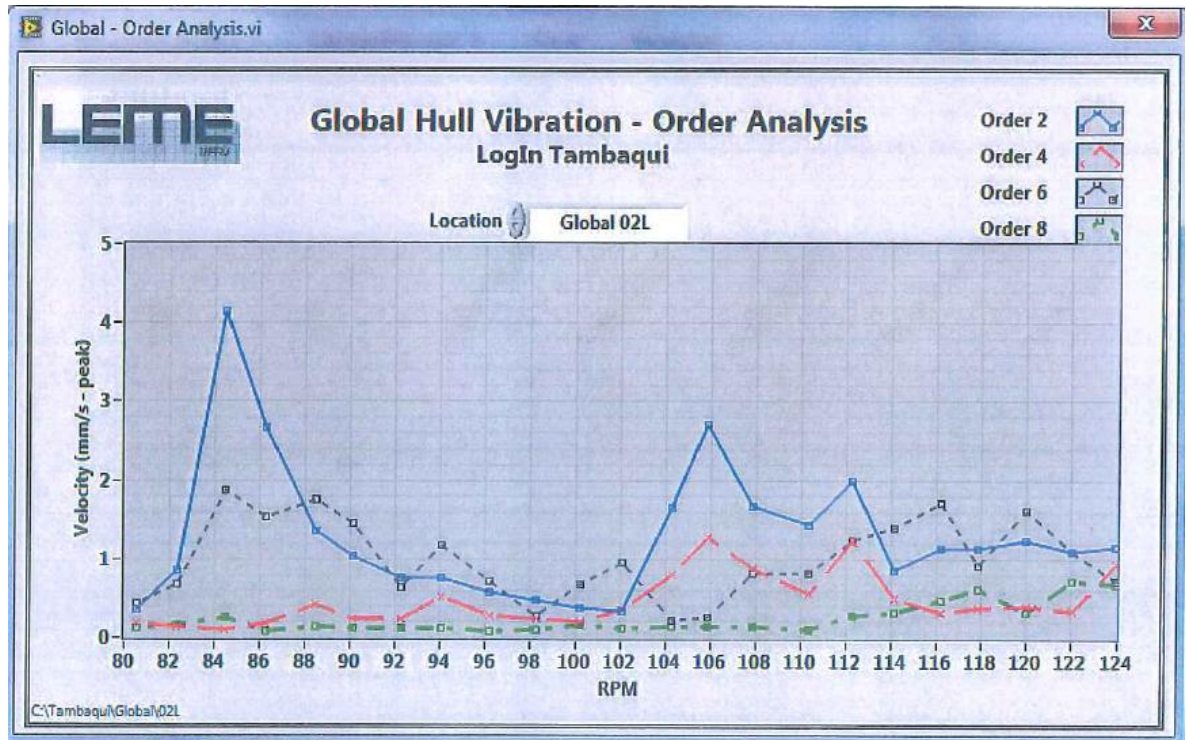


Figura 18 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 02L

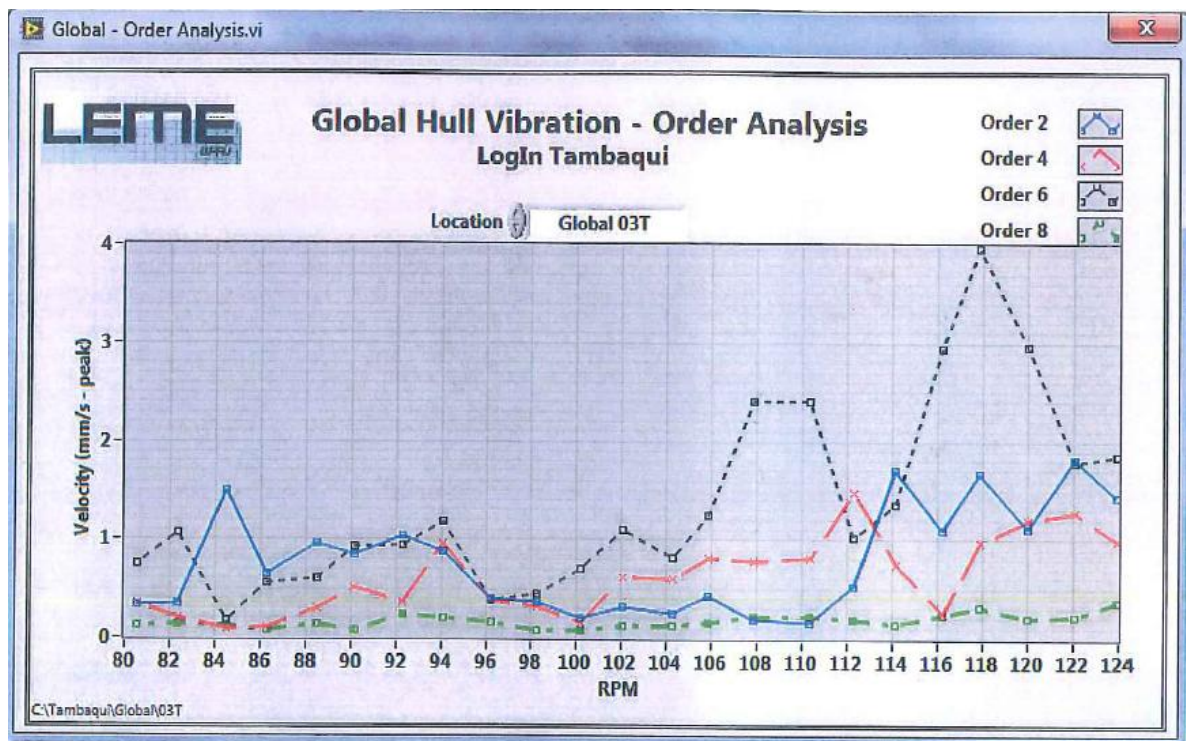


Figura 19 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 03T

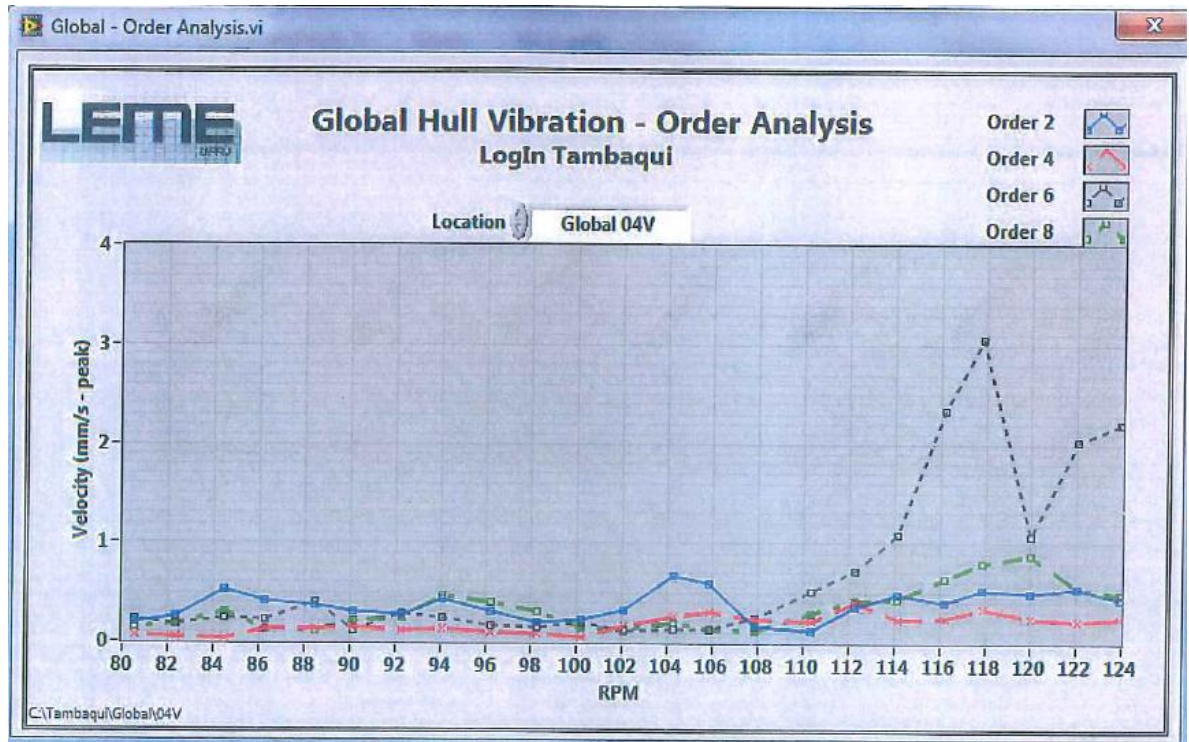


Figura 20 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 04V

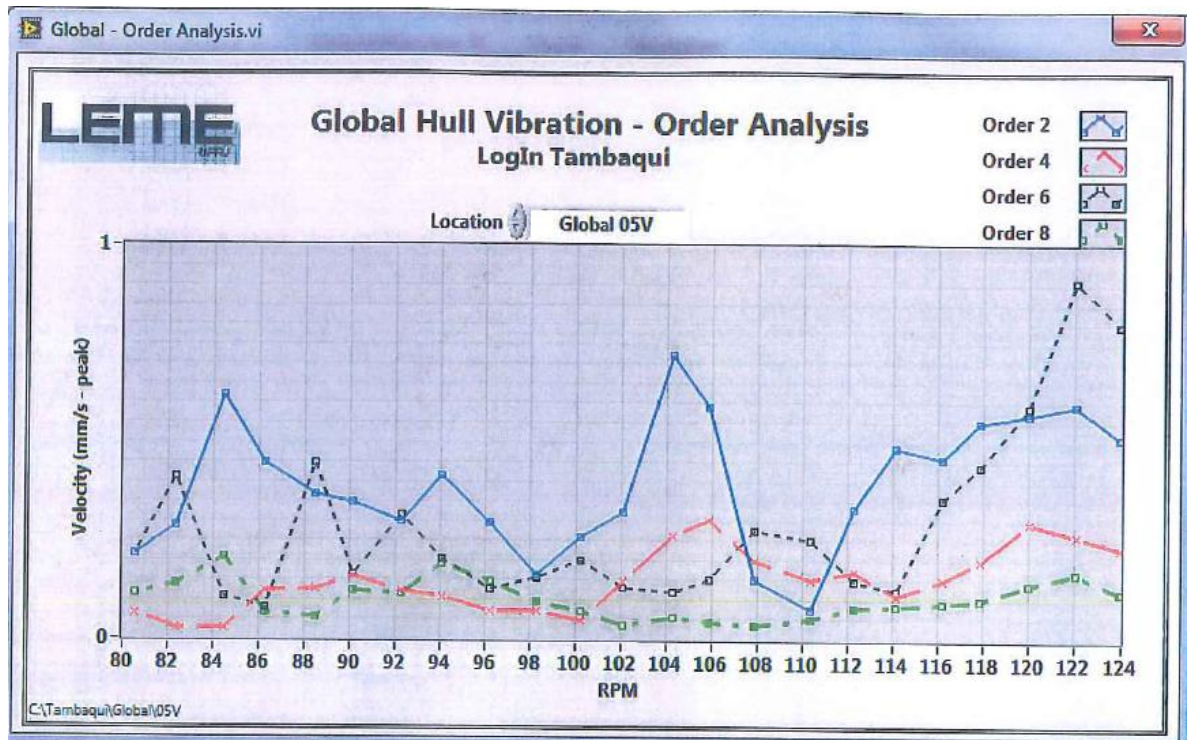


Figura 21 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 05V

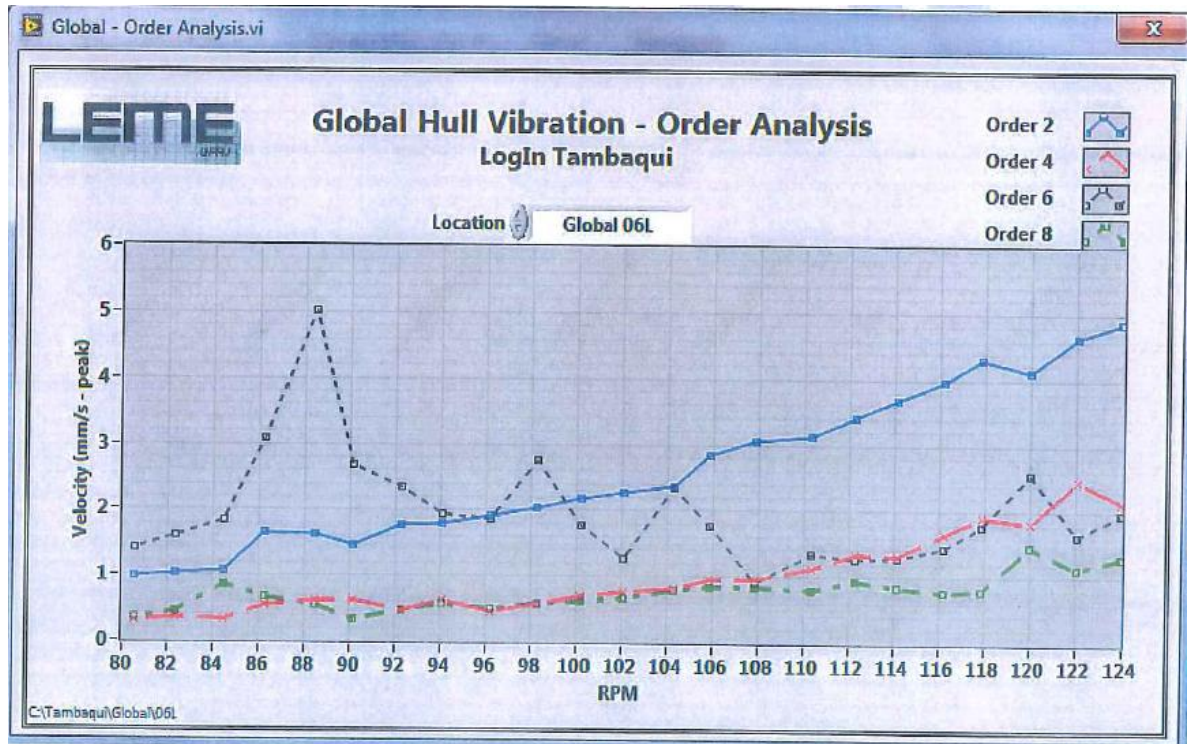


Figura 22 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 06L

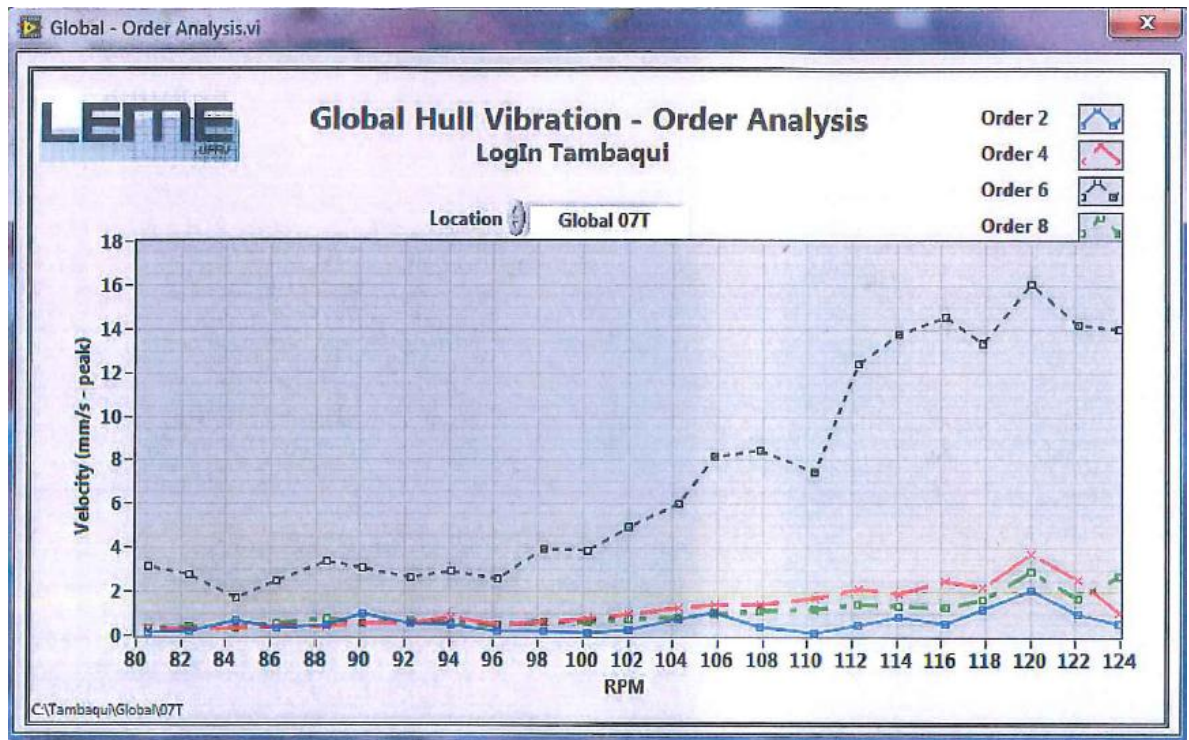


Figura 23 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 07T

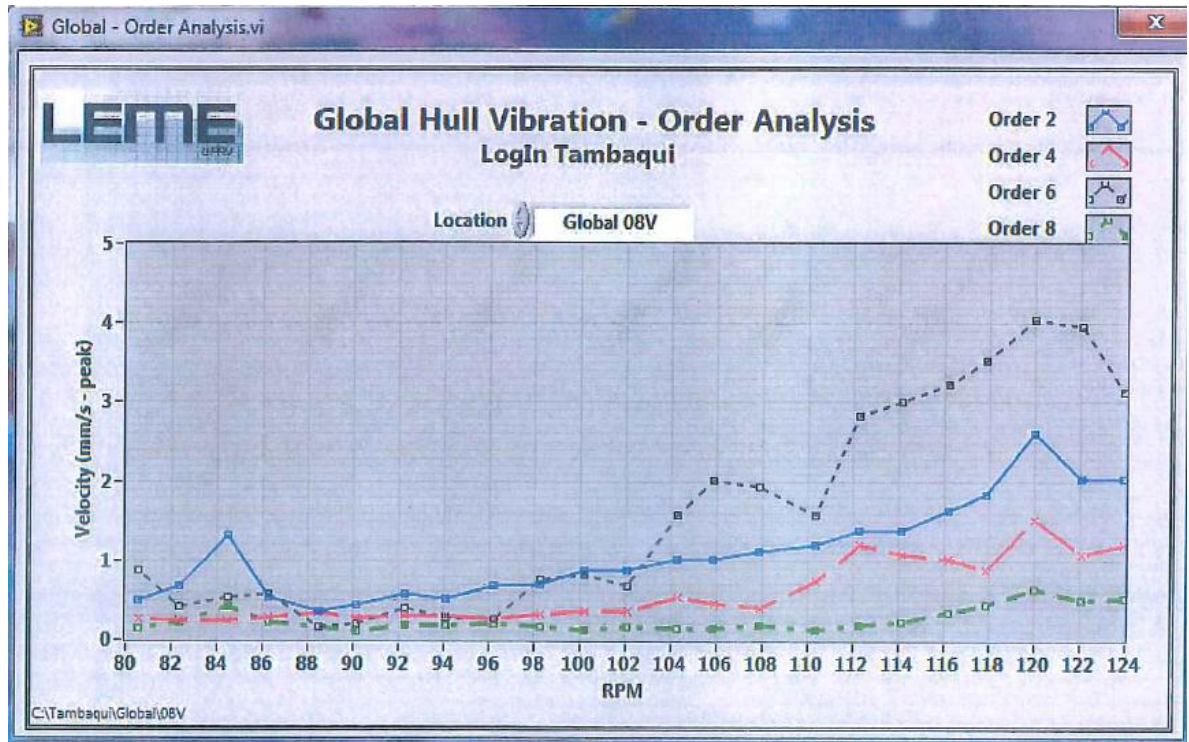


Figura 24 - Gráfico da evolução das ordens do ponto 08V

8 PROGRAMA UTILIZADO NA MEDIÇÃO

Nas figuras abaixo, são apresentadas telas do mesmo programa de aquisição dos sinais de vibração global.

Os sinais de vibração assim como o sinal proporcional à rotação do eixo, foram adquiridos simultaneamente por um sistema de aquisição Analógica/Digital e armazenados. Esses sinais foram processados (em laboratório) utilizando-se a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e então foi realizada a análise espectral de todos os sinais.

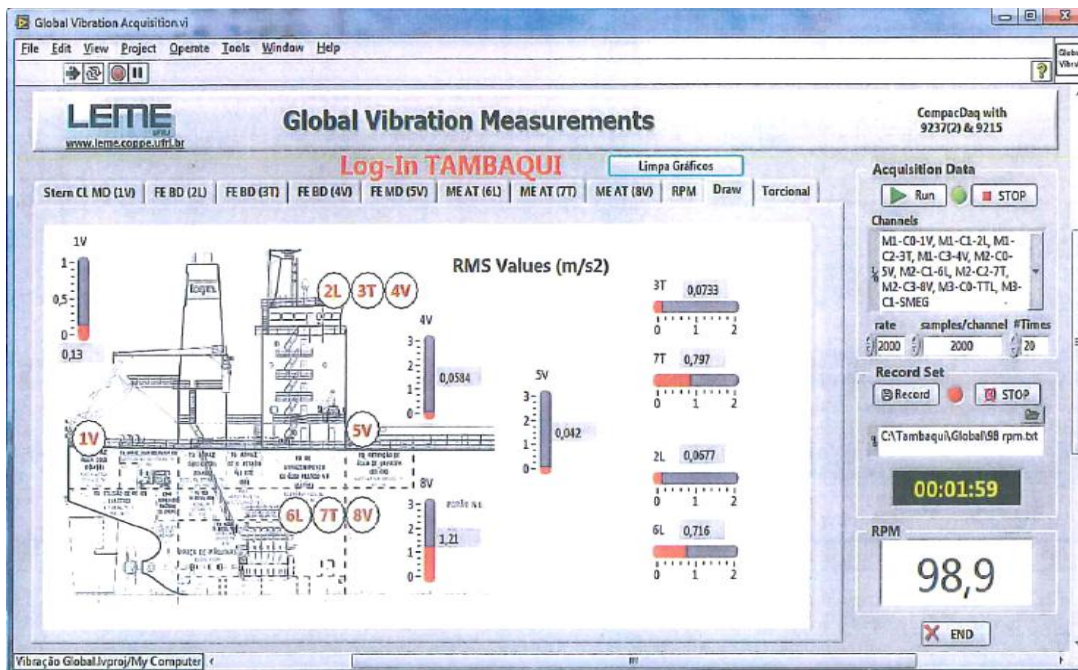


Figura 25 - Programa de Aquisição dos Sinais de Vibração Global

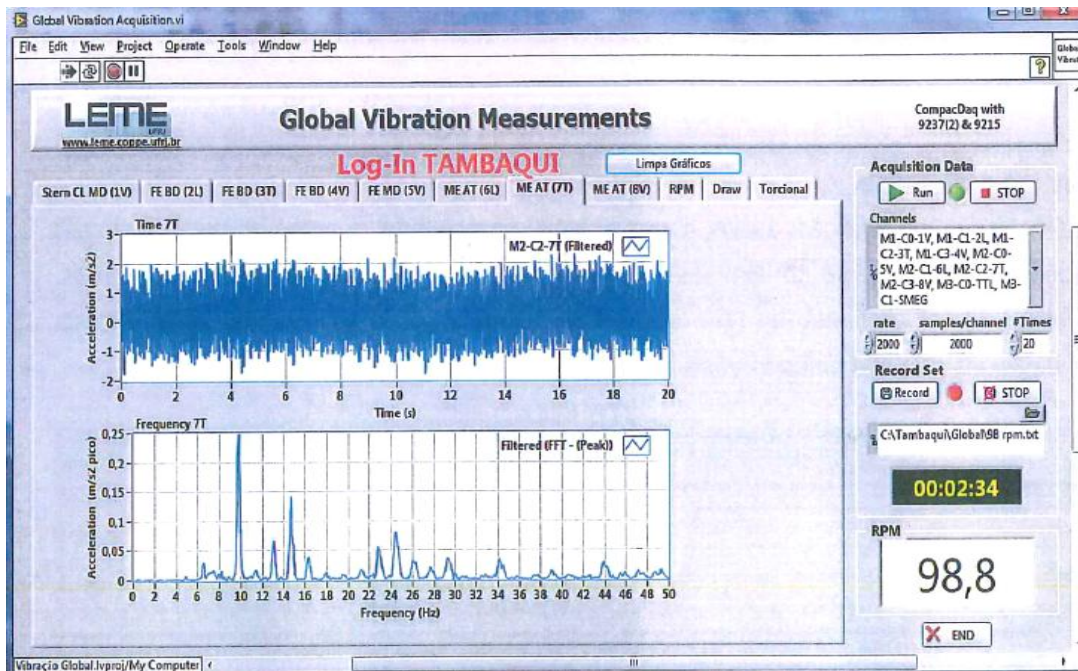


Figura 26 - Programa de Aquisição dos Sinais de Vibração Global

9 MODELAÇÃO DO CASCO

O casco do navio em estudo foi modelado no software Femap Nastran, de onde foram obtidos os resultados utilizados para a comparação com a medição real. Para tal análise, foi necessário modelar o casco unidimensionalmente a partir das propriedades retiradas do Navio Bauxiteiro Log-In Tambaqui, informações estas que são: posicionamento das cavernas ao longo do navio, boca de cada caverna, valores de área de aço total, área em y, área em z, inércia, onde todos os valores foram retirados da prova de mar.

9.1 Unidades de Medida

Utilizamos o Sistema Internacional de medidas (SI).

Tabela 2 - Unidades de Medida.

Grandeza	Unidade
Comprimento	metro (m)
Frequência	Hertz (Hz)
Massa Específica	Kg/m ³
Área	m ²
Inércia	m ⁴

9.2 Propriedades do Material

O material utilizado foi o aço naval, que possui as seguintes características:

Podemos visualizar a seguir, a figura retirada do programa Femap Nastran, com as características do material.

- Densidade: 7.860 kg/m³
- Módulo de Elasticidade: 2,1E+11 N/m²
- Coeficiente de Poisson: 0,3

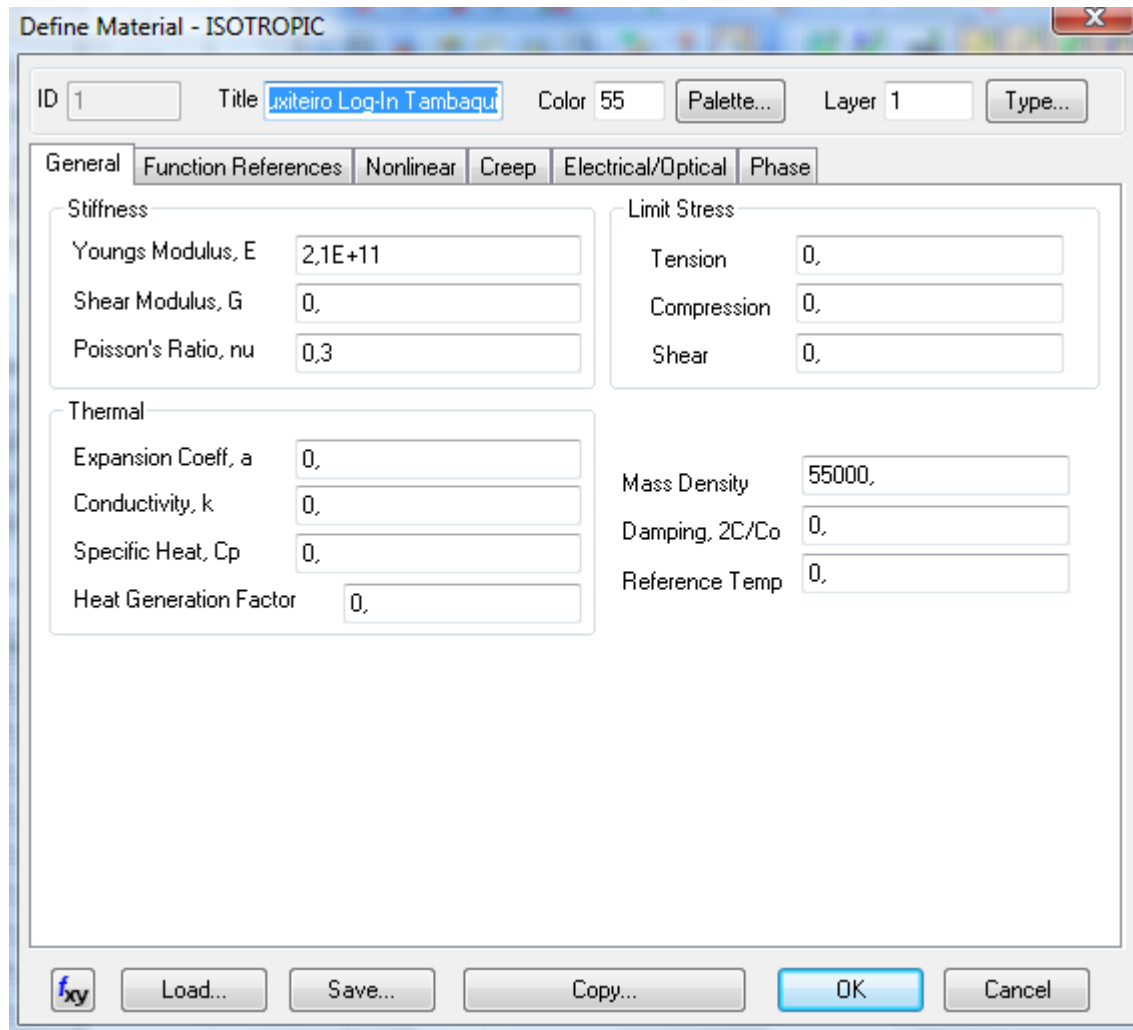


Figura 27 – Propriedades do Material

A propriedade de viga utilizada no software é do tipo “Beam”. Seleciona-se o material que já foi definido anteriormente e em seguida são inseridos os dados de entrada provenientes das características encontradas em cada posição longitudinal do navio, ou seja, a área de aço e inércia. Estes dados foram retirados de uma planilha feita no Excel para cálculo do módulo de seção do Navio Bauxiteiro Log-In Tambaqui. O valor da área efetiva no cisalhamento, que influencia as frequências desejadas, foi considerado como o total da área de aço vertical, o que é uma aproximação. Em seu lugar, poderia ser utilizada a teoria do fluxo de tensões cisalhantes em seções de paredes finas apresentado por Troyman.

Tabela 3

Elemento	Largura (mm)	Espessura (mm)	Centro Zg (m)	Ângulo (GRAUS)
CH. FUNDO	18400,000	16,5	-0,008	0
CH.TETO DO FUNDO DUPLO	8470,000	21,0	2,191	0
CH.CONVÉS	11592,000	35,0	17,618	3
ANTEPARA LONGIT ESP. 1	1980,000	21,0	0,990	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 2	2710,000	18,0	1,355	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 3	2730,000	13,0	1,365	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 4	2178,000	13,0	1,089	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 5	2180,000	13,0	1,090	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 6	2010,000	13,0	1,005	104
ANTEPARA LONGIT ESP. 7	2428,000	35,0	1,214	104
COSTADO	11350,000	15,0	7,175	90
COSTADO ESP. 2	2420,000	35,0	10,705	90
ESCOA 1	950,000	11,0	5,060	0
ESCOA 2	910,000	11,0	8,910	0
ESCOA 3	830,000	11,0	14,300	0
ESCOA 4	1140,000	11,0	2,180	0
ESCOA 5	1140,000	11,0	5,260	0
ESCOA 6	1100,000	11,0	9,110	0
ESCOA 7	1040,000	11,0	14,500	0
LONGARINA CENTRAL	2180,000	11,0	1,090	90
LONGARINA 1	2180,000	11,0	1,090	90
Somatório de Áreas:	15619,240	cm2	Porcent da área total:	63,72%
Somatório de Mom.Áreas:	107043,149	m.cm2		
Somatório Inércias:	81,168	m4	Porcent da inércia total:	69,62%
Elemento	Raio[mm]	Espessura[mm]	Centro Zg[m]	
CH. BOJO	1500	16,5	0,540	
CH. CINTADO CURVO	0	0	0	
Somatório de áreas:	388,772	cm2	Porcent da área total:	1,59%
Somatório de mom.áreas:	209,863	m.cm2		
Somatório de inércias:	1,661	m4	Porcent da inércia total:	1,43%

Tabela 4

Elemento	Área[mm2]	Izz[mm4]	Centro Zg[m]	Ângulo[GRAUS]
R. FD L CENTRAL .1	1650,000	3,09E+06	2,260	0
R. FD L CENTRAL .2	1650,000	3,09E+06	2,446	0
R.Fundo L1	5980,000	1,06E+07	0,110	90
R.Fundo L2	5980,000	1,06E+07	2,070	90
R.Fundo L3	5980,000	1,06E+07	2,070	90
R.Fundo L4	5980,000	1,06E+07	0,110	90
R.Fundo L5	5980,000	1,06E+07	2,219	90
R.Fundo L6	5980,000	1,06E+07	2,366	90
R.Fundo L7	5980,000	1,06E+07	0,110	90
R.Fundo L8	5980,000	1,06E+07	2,232	90
R.Fundo L9	5980,000	1,06E+07	2,393	90
R.Fundo L10	5980,000	1,06E+07	0,110	90
R. FD L 11.1	6130,000	1,27E+07	2,232	0
R. FD L 11.2	6130,000	1,27E+07	2,393	0
R.Fundo L12	6130,000	1,27E+07	0,120	90
R.Fundo L13	6130,000	1,27E+07	2,232	90
R.Fundo L14	13740,000	7,47E+07	2,393	90
R.Fundo L15	13740,000	7,47E+07	0,200	90
R.Fundo L16	13740,000	7,47E+07	2,219	90
R.Fundo L17	13740,000	7,47E+07	2,366	90
R.Fundo L18	13740,000	7,47E+07	0,200	90
R.Fundo L19	13740,000	7,47E+07	2,260	90
R.Fundo L20	13740,000	7,47E+07	2,446	90
R.Fundo L21	13740,000	7,47E+07	0,200	90
R.Fundo L22	13740,000	7,47E+07	2,260	90
R.Fundo L23	13740,000	7,47E+07	0,200	90
R.Fundo L24	13740,000	7,47E+07	0,200	90
R.TDF L 1	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 2	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 3	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 4	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 5	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 6	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 7	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 8	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 9	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 10	6610,000	1,38E+07	1,935	90
R.TDF L 12	5360,000	8,00E+06	1,955	90
R.TDF L 13	5360,000	8,00E+06	1,955	90

Continuação Tabela 4

R.Costado L25	7970,000	2,48E+07	2,816	0
R.Costado L26	11770,000	5,49E+07	3,717	0
R.Costado L27	13740,000	7,47E+07	4,617	0
R.Costado L28	11770,000	5,49E+07	6,417	0
R.Costado L29	11770,000	5,49E+07	7,317	0
R.Costado L30	12650,000	1,21E+09	8,199	0
R.Costado L31	11770,000	5,49E+07	9,117	0
R.Costado L32	11310,000	4,59E+07	10,017	0
R.Costado L33	9960,000	3,93E+07	10,916	0
R.Costado L34	9960,000	3,93E+07	11,816	0
R.Costado L35	12210,000	1,07E+09	12,698	0
R.Costado L36	9260,000	3,28E+07	13,616	0
R.Costado L37	9260,000	3,28E+07	14,516	0
R.Costado L38	7970,000	2,48E+07	15,416	0
R.Costado L39	7970,000	2,48E+07	16,316	0
R.Costado L40	7340,000	2,01E+07	17,216	0
R.Costado L41	6730,000	1,61E+07	18,116	0
R.Costado L42	11330,000	8,38E+08	18,997	0
R.Costado L43	6130,000	1,27E+07	19,916	0
R.Costado L44	5980,000	1,06E+07	20,816	0
R.Costado L45	5980,000	1,06E+07	21,716	0
R.Ant.Long.Porão L27	11770,000	5,49E+07	6,417	14
R.Ant.Long.Porão L28	11770,000	5,49E+07	7,317	14
R.Ant.Long.Porão L29	11770,000	5,49E+07	8,217	14
R.Ant.Long.Porão L30	14740,000	1,98E+09	9,101	0
R.Ant.Long.Porão L31	11770,000	5,49E+07	10,017	14
R.Ant.Long.Porão L32	11310,000	4,59E+07	10,917	14
R.Ant.Long.Porão L33	9960,000	3,93E+07	11,816	14
R.Ant.Long.Porão L34	9960,000	3,93E+07	12,716	14
R.Ant.Long.Porão L35	14300,000	1,79E+09	13,601	0
R.Ant.Long.Porão L36	9260,000	3,28E+07	14,516	14
R.Ant.Long.Porão L37	7970,000	2,48E+07	15,416	14
R.Ant.Long.Porão L38	7970,000	2,48E+07	16,316	14
R.Ant.Long.Porão L39	7970,000	2,48E+07	17,216	14
R.Ant.Long.Porão L40	7970,000	2,48E+07	18,116	14
R.Ant.Long.Porão L41	7340,000	2,01E+07	19,016	14
R.Ant.Long.Porão L42	13640,000	1,54E+09	19,900	0
R.Ant.Long.Porão L43	7340,000	2,01E+07	20,816	14
R.Ant.Long.Porão L44	7340,000	2,01E+07	21,716	14
R.Ant.Long.Porão L45	6730,000	1,61E+07	2,816	14
R. Convés Principal L11	48475,000	5,43E+09	3,676	90
R. Convés Principal L12	6610,000	1,38E+07	4,616	90
R. Convés Principal L13	6610,000	1,38E+07	5,516	90
R. Convés Principal L14	6610,000	1,38E+07	6,416	90
R. Convés Principal L15	6610,000	1,38E+07	7,316	90
R. Convés Principal L16	6610,000	1,38E+07	8,216	90
R. Convés Principal L17	6610,000	1,38E+07	9,116	90
R. Convés Principal L18	6610,000	1,38E+07	10,016	90
R. Convés Principal L19	6610,000	1,38E+07	10,916	90
R. Convés Principal L20	6610,000	1,38E+07	11,816	90
R. Convés Principal L21	6610,000	1,38E+07	12,716	90
R. Convés Principal L22	6610,000	1,38E+07	13,616	90
R. Convés Principal L23	6610,000	1,38E+07	14,516	90
R. Convés Principal L24	6610,000	1,38E+07	15,416	90
R. Convés Principal L25	6610,000	1,38E+07	16,316	90
Somatório de Areas:	8503,050	cm2	Porcent da área total:	
Somatório de Mom.Areas:	64085,109	cm2.m		
Somatório de Inercias:	33,750	m4	Porcent da inércia total:	

RESULTADOS :	MEIA SECAO		SECAO COMPLETA			
Área de aço na seção:	24511,062	cm2	49022,124	cm2	4,902	m²
Altura da linha neutra:	6,990	m	6,990	m		
Momento de Inércia zz:	116,580	m4	233,159	m4		
Módulo de Seção:	10,988	m3	21,976	m3		

A figura abaixo mostra uma das propriedades da viga-navio utilizadas como dados de entrada do software. Onde retiramos os valores das tabelas Excel anteriormente mostrada.

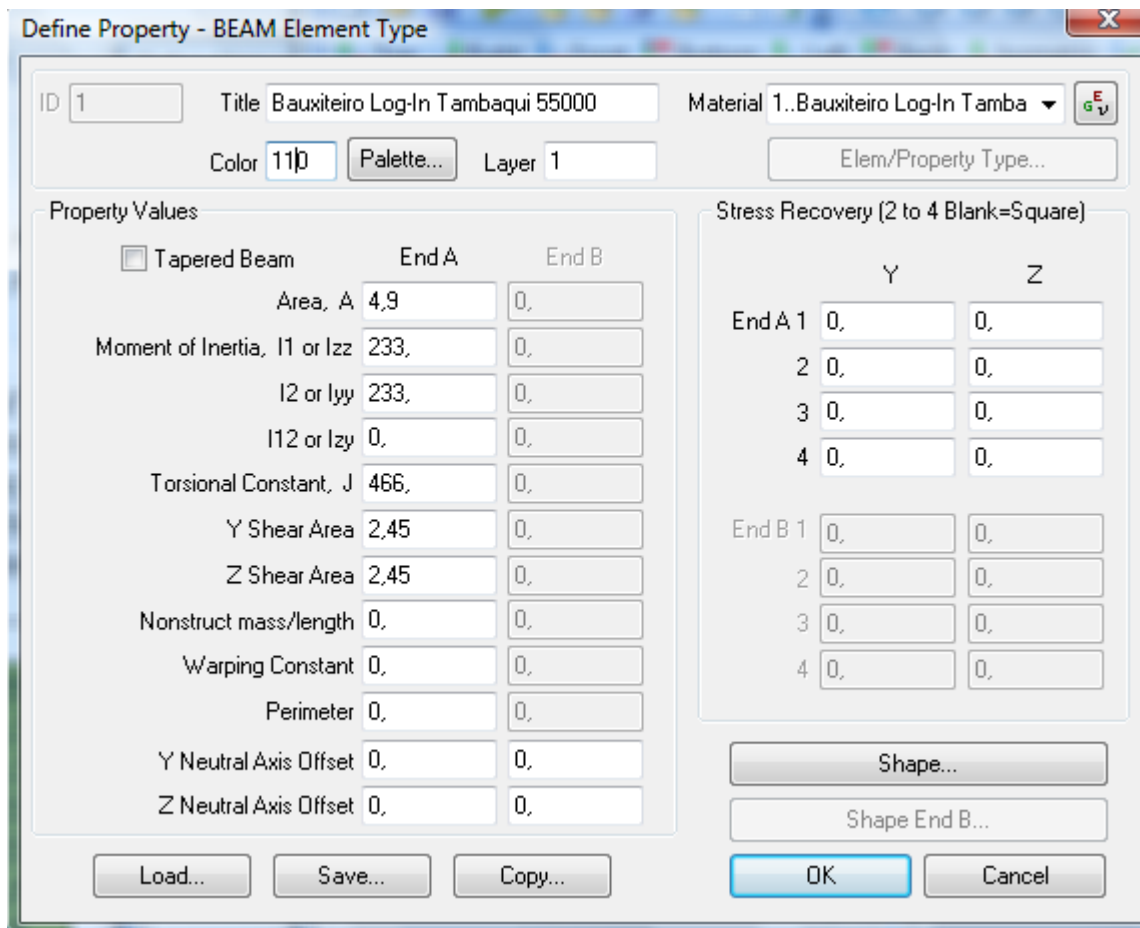


Figura 28 - Propriedades dos Elementos de Viga

Para cálculo da massa adicional pelo procedimento forma utilizados os dados relativos à condição de prova demar indicados nas tabelas 5 a 7, a seguir:

Tabela 5

Nó	Caverna	Boca	Calado
0,00	EP	15,80	8,34
0,70	-5	16,43	8,33
1,40	-4	17,07	8,32
2,10	-3	17,70	8,31
2,80	-2	18,33	8,30
3,50	-1	18,97	8,29
4,20	0-PR	19,60	8,28
4,90	1	20,24	8,27
5,60	2	20,88	8,26
6,30	3	21,52	8,24
7,00	4	22,16	8,23
7,70	5	22,80	8,22
8,40	6	23,36	8,21
9,10	7	23,92	8,20
9,80	8	24,48	8,18
10,50	9	25,04	8,17
11,20	10	25,60	8,16
11,90	11	26,08	8,15
12,60	12	26,56	8,14
13,30	13	27,04	8,12
14,00	14	27,52	8,11
14,70	15	28,00	8,10
15,50	16	28,68	8,09
16,30	17	29,36	8,08
17,10	18	30,04	8,06
17,90	19	30,72	8,05
18,70	20	31,40	8,04
19,50	21	31,80	8,03
20,30	22	32,20	8,02
21,10	23	32,60	8,00
21,90	24	33,00	7,99
22,70	25	33,40	7,98
23,50	26	33,84	7,97
24,30	27	34,28	7,96
25,10	28	34,72	7,94
25,90	29	35,16	7,93
26,70	30	35,60	7,92
27,50	31	35,96	7,91
28,30	32	36,32	7,90
29,10	33	36,68	7,88
29,90	34	37,04	7,87
30,70	35	37,40	7,86
31,50	36	37,52	7,85
32,30	37	37,64	7,84
33,10	38	37,76	7,82
33,90	39	37,88	7,81
34,70	40	38,00	7,80

Tabela 6

No	Cavarna	Boca	Calado
35,50	41	38,80	7,79
36,30	42	39,00	7,78
38,57	43	39,20	7,76
40,84	44	39,40	7,75
43,11	45	39,60	7,74
45,38	46	39,80	7,73
47,65	47	40,00	7,71
49,92	48	40,00	7,70
52,19	49	40,00	7,69
54,46	50	40,00	7,68
56,73	51	40,00	7,66
59,00	52	40,00	7,65
61,27	53	40,00	7,64
63,54	54	40,00	7,63
65,81	55	40,00	7,61
68,08	56	40,00	7,60
70,35	57	40,00	7,59
72,62	58	40,00	7,58
74,89	59	40,00	7,56
77,16	60	40,00	7,55
79,43	61	40,00	7,54
81,70	62	40,00	7,53
83,97	63	40,00	7,51
86,24	64	40,00	7,50
88,51	65	40,00	7,49
90,78	66	40,00	7,48
93,05	67	40,00	7,46
95,32	68	40,00	7,45
97,59	69	40,00	7,44
99,86	70	40,00	7,42
102,13	71	40,00	7,41
104,40	72	40,00	7,40
106,67	73	40,00	7,39
108,94	74	40,00	7,37
111,21	75	40,00	7,36
113,48	76	40,00	7,35
115,75	77	40,00	7,34
118,02	78	40,00	7,32
120,29	79	40,00	7,31
122,56	80	40,00	7,32
124,83	81	40,00	7,31
127,10	82	40,00	7,30
129,37	83	40,00	7,28
131,64	84	40,00	7,27
133,91	85	40,00	7,26
136,18	86	40,00	7,25
138,45	87	40,00	7,23

Tabela 7

No	Caverna	Boca	Calado
140,72	88	40,00	7,22
142,99	89	40,00	7,21
145,26	90	40,00	7,19
147,53	91	40,00	7,16
149,80	92	40,00	7,14
152,07	93	40,00	7,12
154,34	94	40,00	7,10
156,61	95	40,00	7,08
158,88	96	40,00	7,06
161,15	97	40,00	7,03
163,42	98	40,00	7,01
165,69	99	40,00	6,99
167,96	100	40,00	6,97
170,23	101	40,00	6,95
172,50	102	40,00	6,93
174,77	103	40,00	6,91
177,04	104	40,00	6,88
179,31	105	40,00	6,86
181,58	106	40,00	6,84
183,85	107	40,00	6,82
186,12	108	40,00	6,80
188,39	109	40,00	6,78
190,66	110	40,00	6,75
192,93	111	40,00	6,73
195,20	112	40,00	6,71
197,47	113	40,00	6,69
199,74	114	39,80	6,67
202,01	115	39,60	6,65
204,28	116	39,28	6,63
206,55	117	38,96	6,60
208,82	118	38,64	6,58
211,09	119	38,32	6,56
213,36	120	38,00	6,54
215,63	121	37,60	6,52
217,90	122	37,20	6,50
220,17	123	36,80	6,47
222,44	124	36,40	6,45
224,71	125	36,00	6,43
226,98	126	35,20	6,41
229,25	127	30,40	6,39
231,52	128	27,60	6,37
233,79	129	24,80	6,34
236,06	130	22,00	6,32
238,33	131	17,60	6,30
240,60	132	13,20	6,28
242,87	133	8,80	6,26
245,14	134	0,00	6,24

Os nós do modelo representam as coordenadas longitudinais de cada caverna estrutural do casco, totalizando 141 nós.

Os elementos de viga ligam dois nós consecutivos. A representação do modelo depois de todas as propriedades inseridas pode ser vista na figura abaixo.

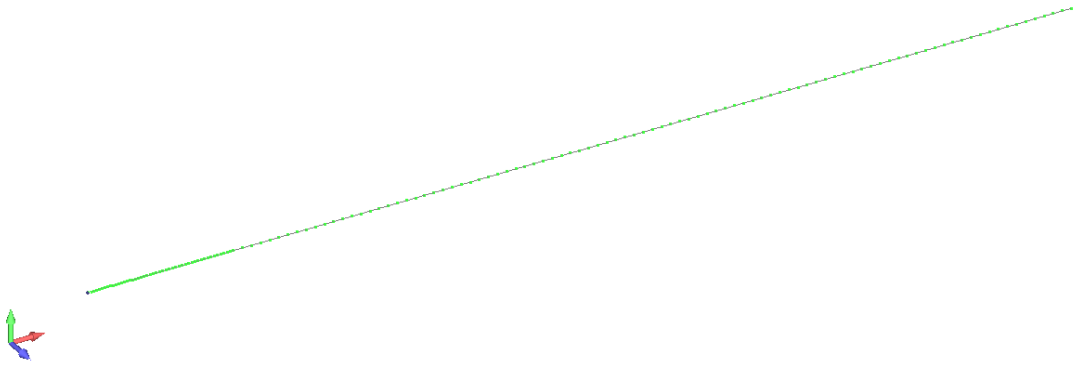


Figura 29 - Modelo Final

10 RESULTADOS

A tabela 8 mostra os resultados obtidos através do software Femap Nastran para as 3 primeiros modos de vibração vertical de flexão do casco, ao variar o valor do coeficiente linear ACL, que corresponde a um percentual de massa adicional à massa do navio em prova de mar de 62000 toneladas. As frequências consideradas como referências foram obtidas experimentalmente. As do segundo e terceiro modo de vibração puderam ser obtidas a partir dos gráficos da evolução das componentes harmônicas de segunda ordem das figuras 17 a 24, principalmente nessa última, compicos nas rotações de 85 e 120 rpm (com segundo ordens 170 e 240 rpm), indicanso frequência do segundo modo 2,8 Hz e do terceiro 4,0 Hz. Como nessa faixa não foi possível identificar a primeira, recorreu-se aos espectros de vibração das figuras 8 a 16, que indicaram seu valor permitiram calcular os desvios percentuais das frequências de cada modo e a soma desses desvios percentuais quadráticos.

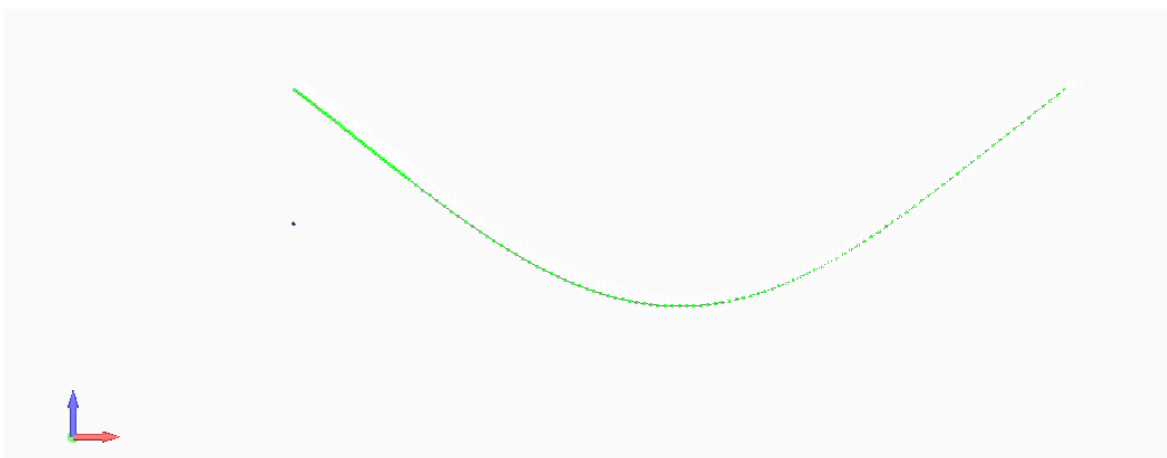


Figura 30 – Primeiro Modo de Vibração (1,1 Hz)

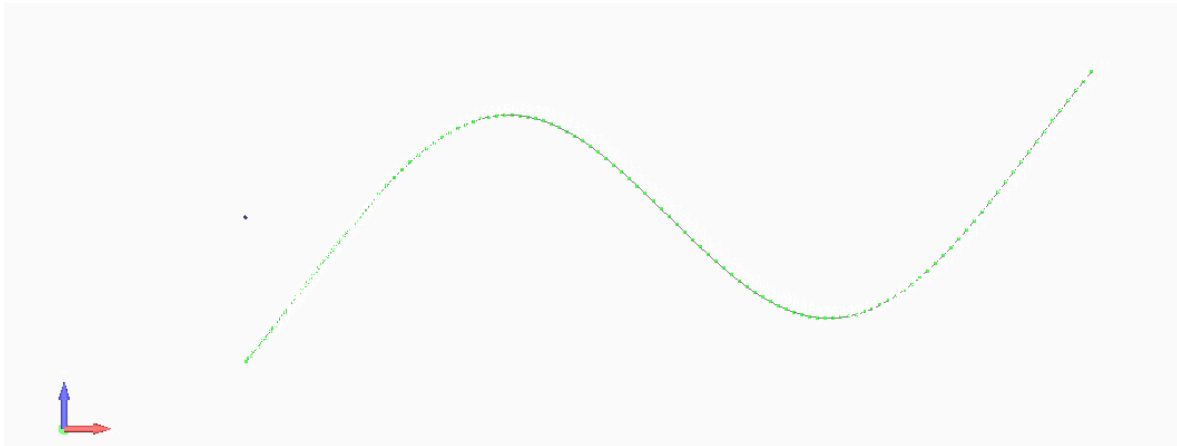


Figura 31 – Segundo Modo de Vibração (2,8 Hz)

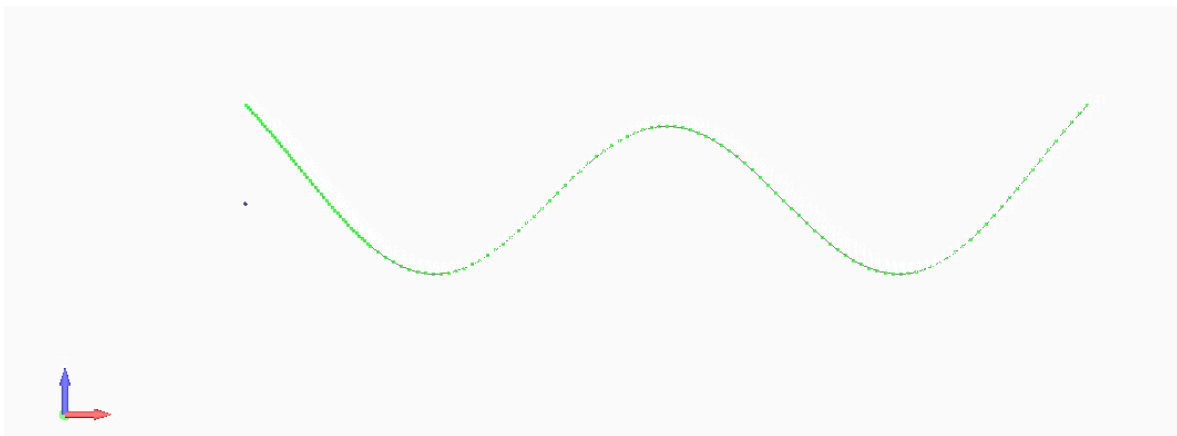


Figura 31 – Terceiro Modo de Vibração (4,0 Hz)

Tabela 8 – Resultados do Software Nastran

% Mass Adic	ACL coef	Freq Modo1 (Hz)	Freq Modo2 (Hz)	Freq Modo3 (Hz)	Desvio M1 (%)	Desvio M2 (%)	Desvio M3 (%)	Desvio Quadr TOTAL	OBS
58	0,106	1,29	3,34	6,02	17	19	51	32	
66	0,120	1,26	3,26	5,88	15	16	47	27	
74	0,135	1,23	3,18	5,74	12	14	44	22	
82	0,149	1,2	3,11	5,62	9	11	41	18	
90	0,164	1,17	3,05	5,5	6	9	38	15	

98	0,178	1,15	2,99	5,39	5	7	35	13	
105	0,192	1,13	2,93	5,28	3	5	32	11	
113	0,207	1,11	2,87	5,18	1	3	30	9	max
121	0,221	1,09	2,82	5,09	-1	1	27	7	
129	0,236	1,07	2,77	5	-3	-1	25	6	
137	0,250	1,05	2,73	4,92	-5	-2	23	6	
145	0,265	1,03	2,68	4,84	-6	-4	21	5	
153	0,279	1,02	2,64	4,76	-7	-6	19	4	
161	0,293	1	2,6	4,69	-9	-7	17	4	
169	0,308	0,99	2,56	4,62	-10	-9	16	4	
177	0,322	0,97	2,52	4,55	-12	-10	14	4	
185	0,337	0,96	2,49	4,49	-13	-11	12	4	
192	0,351	0,94	2,45	4,43	-15	-13	11	5	
200	0,366	0,93	2,42	4,37	-15	-14	9	5	max
208	0,380	0,92	2,39	4,31	-16	-15	8	5	
216	0,394	0,91	2,36	4,26	-17	-16	6	6	
224	0,409	0,9	2,33	4,21	-18	-17	5	6	
232	0,423	0,89	2,3	4,16	-19	-18	4	7	
240	0,438	0,88	2,28	4,11	-20	-19	3	8	
248	0,452	0,87	2,25	4,06	-21	-20	1	8	
256	0,467	0,86	2,22	4,01	-22	-21	0	9	
264	0,481	0,85	2,2	3,96	-23	-21	-1	10	
271	0,495	0,84	2,18	3,91	-24	-22	-2	11	max
279	0,510	0,83	2,15	3,86	-25	-23	-4	12	
287	0,524	0,82	2,13	3,81	-25	-24	-5	12	
295	0,539	0,81	2,11	3,76	-26	-25	-6	13	
303	0,553	0,8	2,09	3,71	-27	-25	-7	14	
311	0,567	0,79	2,07	3,66	-28	-26	-9	15	

319	0,582	0,78	2,05	3,61	-29	-27	-10	17	
327	0,596	0,77	2,03	3,56	-30	-28	-11	18	
335	0,611	0,76	2,01	3,51	-31	-28	-12	19	
343	0,625	0,75	1,99	3,46	-32	-29	-14	20	
350	0,640	0,74	1,98	3,41	-33	-29	-15	21	
358	0,654	0,73	1,97	3,36	-34	-30	-16	23	
366	0,668	0,72	1,96	3,31	-35	-30	-17	24	
374	0,683	0,71	1,95	3,26	-35	-30	-19	25	

11 ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Observando os resultados apresentados na tabela anterior, conclui-se que o coeficiente linear ACL de 0,221 para a expressão da massa adicional, que nesse caso totaliza 121%, onde os desvios dos valores de frequência são inferiores 1% para os dois primeiros modos, mas um erro considerável de 27% para o terceiro. O que apresentou menor desvio quadrático total foi o coeficiente ACL de 0,279 correspondente a uma massa adicional de 153%, onde seu desvio total quadrático foi de 4%, menor que os tradicionais de Burril 11%, Todd 5% e Kumay 9%.

Como a previsão das frequências apenas dos dois primeiros modos foi muito bem indicada pelo coeficiente ACL de 0,221 (massa adicional de 121%) e próximo à previsão de Kumay de 113% de massa adicional com desvios de 3% e 1%, iremos utiliza-lo para nossa conclusão, sugere-se num próximo estudo a representação do navio por vigas paralelas acopladas por molas, que possam explicar desvios das frequências em modos mais altos de vibração.

12 Bibliografia

[1] VORUS, WILLIAM S., Principals of Naval Architecture - Vibration, 3 ed, New Jersey, USA, 1988.

[2] IWER ASMUSSEN, WOLFGANG MENZEL, HOLGER MUMM, Ship Vibration, Germanischer Lloyd's, Hamburg, 2001.

[3] HICKS, A.N., A Method for Determining the Virtual Mass Distribution around a Vibrating Ship, In: Report N° 3272, Naval Ship Research and Development Center, Washington, D. C., 1970.

[4] KOROTKIN, ALEKSANDER I., Added Masses of Ship Structures, 1ed, Russia, Springer, 2007.

[5] RAZVAN, IONAS., CHIRICA, IONEL., Global Ship Vibration Analysis, Rumania, 2002.

[6] SUN LI-PING, NIE WU, ZHANG, WEI, "Analysis of Structural Dynamics Characteristics of High Speed Light Special Catamaran", Journal of Marine Science and Application, Vol. 5, N° 1, 1-5, USA, 2006.

[7] SKAAR, KNUT T., CARLSEN, CARL A., "Modelling Aspects for Finite Element Analysis of Ship Vibration", Journal of Computers & Structure, Vol. 12, 409-419, UK, 1980.

[8] LEWIS, F.M. The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship, SNAME, 1929.

[9] LANDWEBER, L., MACAGNO, M.C., Added Mass of Two-Dimensional Forms Oscillating in a Free Surface, Journal of Ship Research, pp 20-30, June 1967.

[10] TOWNSIN, R.L., Virtual Mass Reduction Factors J' Values for Ship Vibration Calculations Derived from Tests with Beams Including Ellipsoids and Ship Models, RINA, December, 1968.

[11] TROYMAN, A.C.R., Conceição, C.A.L., "Shear Effective Area and Shear Center of Ships Cross Section", Brazilian Journal of Engineering Periodical, Vol 4Ner 1 (1987).

[12] SILVA NETO, S.F., FIGUEIREDO, S.R., REYES, M.C.T., ORTIZ, L.M., Numerical simulation of the Added mass of the fluid adjacent to the ship hull in vibration measured during sea-trials in tanker ships to be converted to offshore construction vessel, Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. June, 2012.

[13] Relatório Final da Prova de Mar do Navio Bauxiteiro Log-In Tambaqui – Log-In – 2013

[14] Relatório Final da Medições de Vibrações – UFRJ - (Leme/Coppe) – 2013