



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Traballo Fin de Mestrado

CURSO 2017/18

Análise numérica e experimental do balance en ondas de través dun buque de pesca.

Mestrado en Enxeñaría Naval e Oceánica

ALUMNO

Pedro Ojea González

TITORES

Marcos Míguez González

Vicente Díaz Casás

DATA

FEBREIRO 2018

RESUMO

Neste traballo realízase unha labor de investigación no campo do balance do buque coa que se pretende verificar un modelo matemático que reproduce o comportamento dun buque cando este se ve sometido á acción de ondas de través. Para isto, levouse a cabo un desenvolvemento matemático co fin de realizar o posterior programado das ecuacións obtidas no software *MATLAB*.

A continuación obtivéronse unha serie de variables relacionadas co buque escollido a través de programas de cálculo hidrodinámico e de ensaios na canle de experiencias. Con todos estes datos estábamos xa en condicións de correr o modelo e obter os resultados.

A continuación realizáronse unha serie de ensaios cun modelo a escala nunha canle de experiencias hidrodinámicas obtendo os datos reais do balance do buque.

Finalmente comparáronse os resultados do modelo e dos ensaios con resultados bastante satisfactorios.

Debemos destacar que a utilidade deste traballo radica na posibilidade de implementar un modelo destas características nun sistema de axuda aos patróns ou capitáns que permita coñecer o estado do buque en tempo real.

RESUMEN

En este trabajo se realiza una labor de investigación en el campo del balance del buque con la que se pretende verificar un modelo matemático que reproduzca el comportamiento de un buque cuando este se ve sometido a la acción de olas de través. Para esto, se ha llevado a cabo un desarrollo matemático con el fin de realizar el posterior programado de las ecuaciones obtenidas en el software *MATLAB*.

A continuación se obtuvieron una serie de variables relacionadas con el buque escogido a través de programas de cálculo hidrodinámico y de ensayos en el canal de experiencias. Con todos estos datos estábamos ya en condiciones de correr el modelo y obtener los resultados.

A continuación, se realizaron una serie de ensayos con un modelo a escala en un canal de experiencias hidrodinámicas obteniendo los datos reales del balance del buque.

Finalmente, se compararon los resultados del modelo y de los ensayos con resultados bastante satisfactorios.

Debemos destacar que la utilidad de este trabajo radica en la posibilidad de implementar un modelo de estas características en un sistema de ayuda a los patronos o capitanes que permita conocer el estado del buque en tiempo real.

ABSTRACT

In this work, the behaviour of a fishing vessel under the effect of beam waves has been studied. In order to do this, a mathematical model of the vessel roll motion has been developed.

Then, a series of vessel's variables were obtained through programs and tests in the basin. With all these data we were already able to run the model and obtain the results.

Next, a series of tests were carried out with a scale model in the test basin obtaining the real data of the ship roll motion.

Finally, the results of the model and the tests were compared with quite satisfactory results.

We must emphasize that the usefulness of this work lies in the possibility of implementing a model of these characteristics in a stability guidance system that computes the vessel stability situation in real time.

ÍNDICE

RESUMO	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE.....	5
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 OBXECTIVO.....	11
3 FORMULACIÓN DO MODELO MATEMÁTICO.....	11
3.1 ECUACIÓN DO MOVEMENTO DE BALANCE.....	16
3.1.1 Ecuación do movemento absoluto para pequenos ángulos.....	18
3.1.2 Ecuación do movemento relativo para pequenos ángulos.....	18
3.1.3 Ecuación do movemento absoluto para grandes ángulos.....	18
3.1.4 Ecuación do movemento relativo para grandes ángulos.....	19
4 SELECCIÓN E DESCRICIÓN DO BUQUE BASE.....	20
5 DESENROLO DO MODELO MATEMÁTICO CO PROGRAMA <i>MATLAB</i>	24
5.1 OBTENCIÓN DAS VARIABLES NECESARIAS.....	26
5.1.1 Cálculo da masa engadida (A_{44}).....	26
5.1.2 Cálculo da inercia seca (I_{xx}).....	31
5.1.3 Cálculo dos GZ.....	32
5.1.4 Cálculo do coeficiente de pendente da onda (r).....	33
6 CARACTERÍSTICAS DA CANLE DE ENSAIOS E DO MODELO.....	35
6.1 A CANLE.....	35
6.2 SOFTWARE DA CANLE.....	37
6.3 CALIBRACIÓN DA CANLE.....	39
6.4 O MODELO.....	42
7 ENSAIOS DE DECAEMENTO E PROBA DE ESTABILIDADE.....	46
7.1 ENSAIO DE DECAEMENTO.....	46
7.1.1 Obtención de datos.....	46
7.1.2 Procesado dos datos.....	46
7.1.3 Comparación co ensaio de decaemento en <i>MATLAB</i>	52
7.2 PROBA DE ESTABILIDADE.....	54
7.2.1 Obtención de datos.....	54
7.2.2 Procesado dos datos.....	57
8 ENSAIOS CO MODELO MATEMÁTICO.....	61
9 ENSAIOS NA CANLE DE EXPERIENCIAS.....	67
9.1 PROCEDEMENTO DE RECOLLIDA DE DATOS.....	67
9.2 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	69

9.3	PROCESADO DOS DATOS E RESULTADOS.....	70
10	COMPARACIÓN DOS ENSAIOS.	77
11	DISCUSIÓN.	81
12	CONCLUSIONES.	83
13	BIBLIOGRAFÍA.....	85
14	ANEXOS.....	87
	ANEXO 1. CÓDIGO MATLAB DA RESOLUCIÓN DA ECUACIÓN DO MOVEMENTO ABSOLUTO CO GZ.	87
	ANEXO 2. CÓDIGO MATLAB DA RESOLUCIÓN DA ECUACIÓN DO MOVEMENTO RELATIVO CO GZ.	90
	ANEXO 3. CÓDIGO MATLAB DA RESOLUCIÓN DA ECUACIÓN DO MOVEMENTO ABSOLUTO CO GM.	94
	ANEXO 4. CÓDIGO MATLAB DA RESOLUCIÓN DA ECUACIÓN DO MOVEMENTO RELATIVO CO GM.	97
	ANEXO 5. ARCHIVO HUL DE OCTOPUS.	101
	ANEXO 6. DATOS DE MASA ENGADIDA SACADOS DE OCTOPUS.	102
	ANEXO 7. DATOS DO CÁLCULO DE EQUILIBRIO E DE ESTABILIDADE A GRANDES ÁNGULOS CO MÓDULO STABILITY DE MAXSURF.....	105
	ANEXO 8. CÓDIGO MATLAB PARA A RESOLUCIÓN DOS VALORES DE AMORTECEMENTO.	109
	ANEXO 9. CÓDIGO MATLAB PARA A COMPARACIÓN DOS ENSAIOS DE DECAEMENTO CO SEU MODELO MATEMÁTICO.....	111
15	ÍNDICE DE FIGURAS.	115
16	ÍNDICE DE TÁBOAS.	118
17	LISTA DE SÍMBOLOS.	119

1 INTRODUCCIÓN

A pesca é unha das principais actividades das que depende Galicia supondo ao redor dun 2% do noso Produto Interior Bruto e empregando a máis de 30.000 persoas o que supón ao redor dun 3% dos traballadores activos (Instituto Galego de Estatística, 2015). No conxunto de España a súa importancia é moito menor e isto é algo que sucede en xeral na Unión Europea e é que a pesca é unha actividade que ten importancia e repercusión só en certas rexións como se deduce dos datos mostrados en (European Commission, 2016).

Ademais, desta última fonte tamén podemos extraer a conclusión de que a maioría dos buques pesqueiros (72301 de 85154) son buques de eslora inferior aos 12 metros, buques con un porcentaxe de risco de sinistro moito maior que os buques de maior envergadura.

Se vemos a nivel mundial, a flota de pesqueiros é sen dúbida a que conta con maior número de buques e que en 2014 se estimaba en torno aos 4.6 millóns de buques, dos cales un 75% pertencerían a Asia, mentres que a África lle correspondería un 15% a América Latina e ao Caribe un 6%, a América do Norte un 2%, a Europa un 2% e a Oceanía un 0.2%. Debemos destacar ademais, que ao igual que pasaba a nivel europeo, a nivel mundial, o 85% dos buques de pesca teñen unha eslora inferior a 12 metros e só a redor de 64000 son maiores de 24 metros. (FAO, 2016)

Se vemos cara o pasado e vemos como era o mundo 30 anos atrás dámonos conta de como de rápido evolucionou en moitos ámbitos; socialmente, economicamente, pero sobre todo o que máis destaca é a evolución tecnolóxica da man da electrónica.

Do mesmo xeito, os buques mercantes e os buques de pesca xa non son o que eran hai 30 anos. Son buques moito máis sofisticados, con novos combustibles para a propulsión, máis preparados en canto a medidas anticontaminación e sobre todo con moitísima electrónica que permite dende as comunicacións outrora impensábeis ata a monitorización dende a ponte de todos os sistemas do buque e incluso a posibilidade de levar a cámara de máquinas desatendida grazas a esta centralización.

Estamos a piques de ver como os barcos navegarán de forma autónoma e aínda así, a pesar de toda esta evolución, os accidentes no mar seguen a producirse tal e como demostran as estatísticas da Axencia Europea de Seguridade Marítima (EMSA, 2017).

De acordo con estas, en 2016 perderon a vida no mar 106 persoas en buques con bandeira dalgún país membro da Unión Europea. Ademais, destas 106, como vemos na Figura 1.1, 55 corresponden a buques de pesca.

Isto converte ao traballo no mar nun dos máis perigosos, e por iso os avances tecnolóxicos das últimas décadas deberían estar buscando a forma de reducir estes índices de sinistralidade.

1. Introducción

Pedro Ojea González

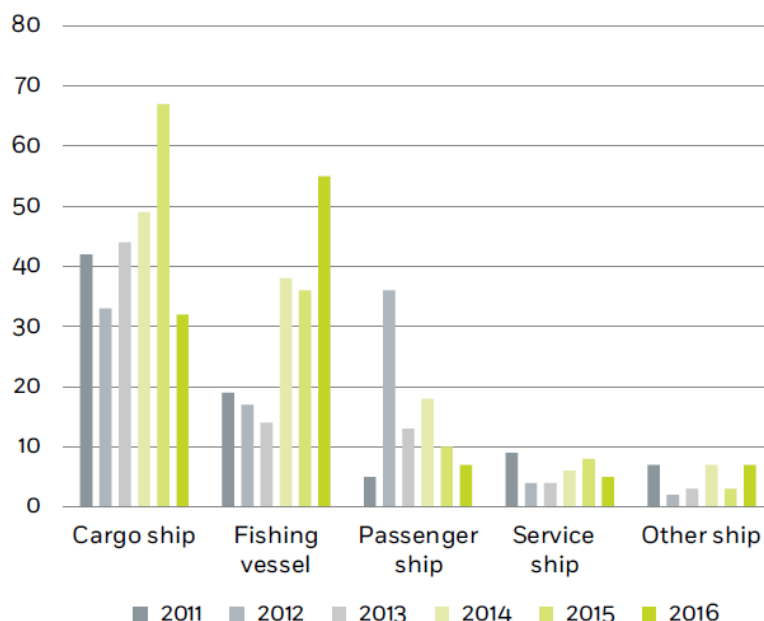


Figura 1.1. Defuncións desde 2011 ata 2016 por categorías de buques. Fonte: (EMSA, 2017)

Varios son os factores que afectan á esta lacra e que fan que a redución destes accidentes sexa moi complicada. Un dos factores é a falta de regulamentación para os buques de pesca xa que esta se divide non por tipos de buques senón por eslora sendo os buques maiores de 24 metros os buques que deben cumprir o Convenio de Torremolinos de 1977 con todas as súas posteriores emendas.

Na gran maioría dos países os buques menores de 24 metros só contan unicamente con documentos voluntarios para o deseño destas embarcacións. Isto deriva nunha gran variedade de embarcacións que ao non estar estandarizadas incorren nunha posible falta de estudo das súas características que máis adiante poida provocar tráxicos accidentes. Isto non ocorre en España onde os buques maiores de 12 metros deben cumprir o convenio de Torremolinos e existe unha normativa da Dirección Xeral da Mariña Mercante para os barcos con eslora inferior a 12 metros.

Outro factor moi relevante, tal e como se extrae de (EMSA, 2017) , é o erro humano. Isto débese a gran falta de formación das tripulacións sobre todo dos buques máis pequenos e que fai que non teñan verdadeira consciencia dos riscos que asumen con certas manobras ou en certas situacións. Ademais, os buques máis pequenos sofren de maneira máis acusada as malas condicións na mar, o que se traduce en movementos máis amplos, sobre todo de balance, que derivan en escoras moi grandes que poden producir a zozobra ou a entrada de auga no buque.

Tal e como dicíamos, un dos factores que son causa destes accidentes é a zozobra das embarcacións. Isto débese en moitos casos á falta de estabilidade dos buques que ante situacións de malas condicións do mar non son capaces de manter a estabilidade, envorcan e acaban producindo verdadeiras desgrazas.

1. Introducción

Pedro Ojea González

Dende 2001, estanse a elaborar uns novos criterios de estabilidade, coñecidos como “*Criterios de estabilidade de segunda xeración*” (Umeda, 2013) a través dos cales se poida facer un mellor estudo das condicións de cada barco antes de permitir a súa navegabilidade. Esta elaboración de novos criterios responde a unha corrente que ten como obxectivo complementar os antigos criterios baseados en métodos empíricos con criterios que se baseen na física do problema e que polo tanto poidamos estudar para calquera tipo de barco de forma individual.

Este novos criterios determinan 5 posibles modos de fallo da estabilidade tal e como se explica en (Umeda and Francescutto, 2016):

- Perda pura de estabilidade.
- Resonancia paramétrica.
- Broaching.
- Estabilidade do buque sen goberno.
- Aceleración excesiva.

Con estes 5 modos de fallo preténdese conseguir unha mellor estabilidade no conxunto do barco de xeito que estean moito máis preparados cando se vexan nunha situación complicada.

Despois de anos de traballo, a día de hoxe, estes criterios están totalmente desenrolados e elaborados a falta de aprobación pola Asemblea inda que parece que esta aprobación tardará aínda uns cantos anos.

A forma de levar a cabo os novos criterios consta de tres fases ou niveis polos cales deberá pasar o proxecto dun buque se non consegue superar os precedentes, é dicir, se un buque pasa o primeiro nivel quere dicir que a súa estabilidade é axeitada e non necesita dunha análise máis profunda. Se non pasase este primeiro nivel debería levar a cabo a comprobación do segundo e se tampouco lograrse pasar este debería pasar ao terceiro nivel coñecido como “*Avaliación directa da estabilidade*”.

Como loxicamente se pode pensar, o primeiro nivel consiste nun pequeno cálculo, similar ao que podería ser o criterio de vento actual do IS Code (Maritime Safety Committee IMO, 2009). O segundo nivel consiste xa nunha análise moito máis en profundidade e o terceiro nivel necesita dun estudo pormenorizado que virá acompañado en moitos casos dun estudo nunha Canle de Experiencias Hidrodinámicas a través de modelos a escala.

Porén, estes criterios non serán de aplicación aos buques de pesca. Polo tanto este sector debe buscar por outro lado a solución aos problemas que causan todos estes accidentes.

Por un lado temos a formación das tripulación a través de cursos que lles proporcionen unha maior consciencia sobre os riscos que corren ao levar a cabo determinadas accións como poden ser a sobrecarga, traballar coas portas abertas, etc.

Pola outra banda, e tendo en conta a evolución tecnolóxica que mencionamos anteriormente, é lóxico pensar en que outra opción debería ser a instalación de sistemas de axuda ao capitán ou patrón que lle permitan coñecer o estado do buque en tempo real, podendo desta forma non só analizar a estabilidade estática do buque senón tamén a dinámica.

1. Introducción

Pedro Ojea González

Para iso imos a necesitar un software que analice en cada instante a situación do buque e nos devolva a estabilidade ao momento de xeito que poida avisarnos se se produce unha falta de estabilidade repentina.

Este software debe ser sinxelo e económico, de xeito que poida ser rendible a súa instalación e que ademais non supoña unha gran complicación para a oficina técnica que deba incorporalo.

Por esa razón, con este traballo preténdese desenrolar unha ferramenta de uso sinxela e a través da cal, partindo do coñecemento de certos parámetros dun buque dado, poidamos facer un estudo da estabilidade do mesmo e ver como se comportaría coa excitación de ondas regulares de costado.

Isto serviría para a comprobación da estabilidade do buque sen goberno xa que, unha vez o buque perde a propulsión e non pode gobernarse, este, debido á acción das ondas, colócase de costado ás mesmas facendo que sexa moi importante coñecer a estabilidade do buque cando é excitado por ondas que lle chegan nesta dirección.

Ademais deste caso, poderíamos pensar en moitos outros barcos de pesca que durante as súas manobras navegan a baixas velocidades ou incluso están parados situándose de forma que reciban ondas de través.

O que imos a propor neste traballo será un modelo matemático dun grao de liberdade, moito máis sinxelo que os complexos modelos de seis graos de liberdade, e que polo tanto permite unha análise moito máis rápida.

Este modelo necesitará de información e variables que deberemos extraer a través de distintos ensaios e programas que nos permitirán elaborar un modelo programable que nos permita coñecer o movemento de balance do buque escollido.

Centrarémonos en buscar os balances máximos do modelo escollido para distintas frecuencias e pendentes de onda, prestando especial atención á zona na que se pode producir a resonancia pura, fenómeno que ocorre cando a frecuencia das ondas coincide coa frecuencia natural do buque e que da lugar a grandes amplificacións do movemento.

Unha vez obtidos os resultados do modelo elaborado trataremos de contrastalos mediante a realización duns ensaios nunha canle de experiencias hidrodinámicas o que nos permitirá determinar a idoneidade do modelo realizado.

2. Obxectivo.

Pedro Ojea González

2 OBXECTIVO.

O obxectivo principal deste traballo é a elaboración dunha análise comparativa entre un modelo matemático non lineal dun grao de liberdade do balance dun buque de pesca excitado por ondas de costado fronte aos datos obtidos a partir dos ensaios realizados nunha canle de experiencias hidrodinámicas cun modelo a escala do buque escollido.

Isto ten que ver coa existencia de modelos máis complexos, de 3 ou 6 graos de liberdade, que aínda que son moito máis exactos implican uns cálculos e unhas necesidades de información moito maiores polo que non son aptos para unha posible utilización dos mesmos nun sistema de monitorización de estabilidade en tempo real.

É dicir, o que se busca é determinar se a marxe de erro deste modelo dun só grao de liberdade será o suficientemente válida como para darnos unha idea do que lle vai a suceder ao buque na realidade.

Como xa se mencionou anteriormente, con este método preténdese dar con unha solución rendible e sinxela que poida ser facilmente implementable nos pequenos buques de pesca e que sirva de axuda a tripulación para no caso de ser necesario, dar aviso de falta de estabilidade e que a tripulación teña o suficiente tempo como para reaccionar e evitar así un accidente.

Se o modelo fose aceptable o seguinte paso debería ser o desenvolvemento dun sistema que implementase este modelo e que a partir de información en tempo real obtida do movemento do buque e das ondas que o están excitando poder dar un valor referencia da estabilidade.

3 FORMULACIÓN DO MODELO MATEMÁTICO.

Un buque analizado como un sólido ríxido pode ter 6 tipos de movementos relacionados cos seus 6 graos de liberdade. Tres deses movementos serán de translación (avance, arfada e deriva) e os outros tres serán xiros (cabeceo, balance e guiñada).

Dado que imos utilizar a teoría lineal, o comportamento do buque no mar pode simplificarse en dous problemas; forzas proporcionais á aceleración, velocidade e movemento do buque, e forzas exteriores.

Ademais podemos determinar o movemento do mesmo mediante un sistema masa, resorte e amortecedor de seis graos de liberdade con respecto a un sistema de referencia inercial OXYZ que se move co buque e cuxo plano OXY coincide co plano da superficie plana da auga, o plano OXZ será o plano vertical de cruxía e o eixo OZ enconrarase na vertical do centro de gravidade do buque. O eixo OX será positivo na dirección de avance do buque, o eixo OY será positivo cara babor e o eixo OZ será positivo cara arriba.

Ademais deste sistema de referencia deberemos ter en conta outros dous: un sistema fixo da terra e un sistema fixo do buque.

3. Formulaci3n do modelo matem3tico.

Pedro Ojea Gonz3lez

Isto 3e, o sistema fixo da terra $O_0X_0Y_0Z_0$ ter3 o seu plano $O_0X_0Y_0$ coincidindo coa superficie plana da auga, sendo a direcci3n O_0X_0 positiva na direcci3n das ondas e sendo o eixo O_0Z_0 positivo no sentido ascendente.

Pola outra banda, o sistema fixo do buque ter3 a s3a orixe no centro de gravidade do mesmo e denominar3molo $O_bX_bY_bZ_b$. O eixo O_bX_b ser3 positivo na direcci3n de avance do buque, o eixo O_bY_b ser3 positivo cara babor e o eixo O_bZ_b ser3 positivo cara arriba. Ademais, o plano $O_bX_bY_b$ ser3 paralelo 3a superficie plana da auga cando o buque est3 adrizado.



Figura 3.1. Grados de libertad de un buque. Fonte: ("DryTank Shipping – Shipping broker company," n.d.)

Unha vez feito o sistema de referencia, poderemos definir un vector de desprazamentos do buque:

$$\vec{s}(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \phi(t) \ \theta(t) \ \psi(t)]^T \quad (3.1)$$

Polo que tendo en conta que imos a presentar o movemento como un sistema masa – resorte – amortecedor, as ecuaci3ns lineais que describir3n o movemento do buque nos seus seis graos de liberdade p3dense escribir como;

$$[M + A] \cdot \ddot{\vec{s}} + [B] \cdot \dot{\vec{s}} + [C_{res}] \cdot \vec{s} = \vec{F}_{ext} \quad (3.2)$$

3. Formulación do modelo matemático.

Pedro Ojea González

Onde $[M]$ é a matriz de masa xeneralizada do sistema, $[A]$ é a matriz de masa engadida e $[B]$ representa a matriz de amortecementos. $[C_{res}]$ é a matriz que engloba os coeficientes de restauración mentres que $\overrightarrow{F_{ext}}$ representa os momentos e forzas externas.

O termo $[M] \cdot \ddot{s}$ representa a forza de inercia e tendo en conta que \ddot{s} é a aceleración do sistema que ten 6 graos de liberdade, $[M]$ deberá ser unha matriz 6x6 cuxas compoñentes sexan as masas do buque e os momentos e produtos de inercia.

Tendo en conta que o sistema de referencia fixo do buque o tomamos no centro do gravidade do mesmo; e supondo que o buque será simétrico babor estribor, a matriz de masas pode escribirse como:

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Os termos $[A] \cdot \dot{s}$ e $[B] \cdot \dot{s}$ están relacionados coas forzas de radiación, é dicir, coa enerxía disipada polas ondas que xera o propio buque co seu movemento. O primeiro deles corresponde as forzas de inercia hidrodinámicas que, como xa dixemos, se coñece como masa engadida.

Se do mesmo xeito que xa fixemos anteriormente consideramos que o buque é simétrico babor estribor; e consideramos tamén que estamos analizando un caso de pequenos movementos, a matriz de masa engadida quedará da seguinte forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{12} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

O segundo dos termos, $[B] \cdot \dot{s}$, representa as forzas de amortecemento que son proporcionais ao vector velocidade do buque. De novo, se temos en conta as mesmas hipóteses que fixemos coa masa engadida, a matriz de coeficientes de amortecemento quedaría da seguinte forma:

3. Formulación do modelo matemático.

Pedro Ojea González

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Vistos os termos que acompañan á aceleración e á velocidade só nos queda o termo que acompaña á posición. Este último termo $[C_{res}] \cdot \vec{s}$ está directamente relacionado coas forzas de restauración do buque. Se pensamos nos seis graos de liberdade do buque e nas forzas que se opoñen ao movemento de cada un deles darémonos conta que tanto o avance como a deriva non teñen forzas que dependendo do seu vector de posición se opoñan a el e o intenten contrarrestar e polo tanto os coeficientes que corresponden a estes dous movementos serán nulos. Pola contra nos outros 4 graos de liberdade si temos forzas que contrarrestan os movementos e polo tanto si teremos coeficientes na nosa matriz.

De feito, nalgúns deles como por exemplo a arfada temos dúas compoñentes que inflúen no restablecemento da posición do buque dado que os graos de liberdade se encontran acoplados. Como dicíamos, no caso da arfada, e establecendo que o buque será simétrico babor estribor, o propio movemento de arfada xerará un movemento de cabeceo que terá tamén a súa forza oposta e polo tanto o seu coeficiente na nosa matriz.

Unha vez dito isto, a matriz de coeficientes quedará da seguinte maneira:

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & C_{62} & 0 & C_{64} & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Do outro lado da igualdade temos o vector de forzas exteriores que quedará como vemos de seguido:

3. Formulaci3n do modelo matem3tico.

Pedro Ojea Gonz3lez

$$\vec{F}_{ext} = \begin{bmatrix} F_{ox} \\ F_{oy} \\ F_{oz} \\ M_{ox} \\ M_{oy} \\ M_{oz} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Estas forzas p3dense dividir en dous grupos; un no que se teñen en conta as forzas e momentos provocados polas ondas supondo que estas non se deforman ao pasar polo buque sendo isto coñecido como a teor3a de Froude-Krilov, e un segundo grupo que si ten en conta os efectos da interacci3n da onda co buque, que neste caso se coñece como teor3a da difracci3n.

Tendo en conta todo o dito ata este momento, as ecuaci3ns dos movementos lineais nos seis graos de liberdade quedan da seguinte forma:

$$(m + A_{11}) \cdot \ddot{x} + A_{13} \cdot \ddot{z} + A_{15} \cdot \ddot{\theta} + B_{11} \cdot \dot{x} + B_{13} \cdot \dot{z} + B_{15} \cdot \dot{\theta} = F_{ox} \quad (3.8)$$

$$(m + A_{22}) \cdot \ddot{y} + A_{24} \cdot \ddot{\phi} + A_{26} \cdot \ddot{\psi} + B_{22} \cdot \dot{y} + B_{24} \cdot \dot{\phi} + B_{26} \cdot \dot{\psi} = F_{oy} \quad (3.9)$$

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (-I_{zx} + A_{46}) \cdot \ddot{\psi} + A_{42} \cdot \ddot{y} + B_{42} \cdot \dot{y} + B_{44} \cdot \dot{\phi} + B_{46} \cdot \dot{\psi} + C_{44} \cdot \phi = M_{ox} \quad (3.10)$$

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\psi} + (-I_{zx} + A_{46}) \cdot \ddot{\phi} + A_{42} \cdot \ddot{y} + B_{42} \cdot \dot{y} + B_{44} \cdot \dot{\phi} + B_{46} \cdot \dot{\psi} + C_{44} \cdot \phi = M_{ox} \quad (3.11)$$

$$(I_{yy} + A_{55}) \cdot \ddot{\theta} + A_{51} \cdot \ddot{x} + A_{53} \cdot \ddot{z} + B_{51} \cdot \dot{x} + B_{53} \cdot \dot{z} + B_{55} \cdot \dot{\theta} + C_{53} \cdot z + C_{55} \cdot \theta = M_{oy} \quad (3.12)$$

$$(I_{zz} + A_{66}) \cdot \ddot{\psi} + (-I_{xz} + A_{64}) \cdot \ddot{\phi} + A_{62} \cdot \ddot{y} + B_{62} \cdot \dot{y} + B_{64} \cdot \dot{\phi} + B_{66} \cdot \dot{\psi} + C_{62} \cdot y + C_{64} \cdot \phi + C_{66} \cdot \psi = M_{oz} \quad (3.13)$$

Como xa dixemos anteriormente e agora podemos comprobar, na ecuaci3n de cada un dos graos de liberdade non participan todos os demais sen3n que s3 aqueles que se encontran acoplados con ese grao en cuesti3n.

3. Formulación do modelo matemático.

Pedro Ojea González

3.1 Ecuación do movemento de balance.

Dende o primeiro momento a nosa intención foi a de obter a fórmula que define o movemento de balance dun buque cando este é excitado mediante ondas de través. Vistas xa, as ecuacións xerais do movemento nos 6 graos de liberdade agora imos a pasar a concentrarnos só no movemento de balance e na súa ecuación:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + (-I_{zx} + A_{46}) \cdot \ddot{\psi} + A_{42} \cdot \ddot{y} + B_{42} \cdot \dot{y} + B_{44} \cdot \dot{\phi} + B_{46} \cdot \dot{\psi} + C_{44} \cdot \phi = M_{ox} \quad (3.14)$$

Para tratar esta ecuación imos a realizar unha serie de simplificacións que nos permitan facer unha análise do problema máis sinxela pero ao mesmo tempo sen perder unha gran precisión, o que faría que o noso modelo non fose útil.

A primeira simplificación será a de analizar a ecuación do movemento de balance desacoplada dos demais graos de liberdade polo que nos quedará:

$$(I_{xx} + A_{44}) \cdot \ddot{\phi} + B_{44} \cdot \dot{\phi} + C_{44} \cdot \phi = M_{ox} \quad (3.15)$$

Agora, seguindo as recomendacións dadas no artigo (Bulian and Francescutto, 2004), dividiremos toda a ecuación pola inercia total polo que obteremos o seguinte:

$$\ddot{\phi} + \frac{B_{44}}{(I_{xx} + A_{44})} \cdot \dot{\phi} + \frac{C_{44} \cdot \phi}{(I_{xx} + A_{44})} = \frac{M_{ox}}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (3.16)$$

Ademais, debemos ter en conta que como imos a estudar o movemento de balance, o amortecemento non será lineal debido a que a compoñente de amortecemento viscoso ten un papel moi importante, especialmente a grandes ángulos de balance. Polo tanto, o amortecemento tomarémolo con unha suma de dúas compoñentes de amortecemento, unha lineal e outra cuadrática (Himeno, 1981). Ademais, chamaremos a esta suma dividida polas inercias función adimensional de amortecemento $d(\dot{\phi})$ quedando como vemos a continuación :

$$d(\dot{\phi}) = \frac{B_{44a} \cdot \dot{\phi}}{(I_{xx} + A_{44})} + \frac{B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}|}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (3.17)$$

3. Formulación do modelo matemático.

Pedro Ojea González

Polo que a nosa ecuación de balance queda da seguinte forma:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \frac{C_{44} \cdot \phi}{(I_{xx} + A_{44})} = \frac{M_{ox}}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (3.18)$$

Agora debemos caracterizar tamén as forzas exteriores representadas por M_{ox} . Para iso, e seguindo o que se di no texto (Bulian and Francescutto, 2011), podemos determinar que:

$$M_{ox} = \alpha_{eff}(t) \cdot (\Delta \cdot GM) \quad (3.19)$$

Este último termo $\alpha_{eff}(t)$ defínese no artigo (Bulian and Francescutto, 2011) como a pendente de onda efectiva instantánea e no artigo (Míguez González and Bulian, 2018) establece a formulación para calculalo sendo o que vemos a continuación:

$$\alpha_{eff}(t) = r\pi\alpha_w \cos(\omega t + \psi) \quad (3.20)$$

Onde α_w é a pendente máxima de onda, ω é a frecuencia de encontro coas ondas en rad/s e ψ é a fase xenérica. O coeficiente r coñécese como coeficiente da pendente de onda efectiva e depende das formas do casco, da condición de carga, da lonxitude da onda e polo tanto da frecuencia. Este coeficiente calcularémolo no apartado 5.1.4.

Polo tanto, se temos en conta que tal e como se define en (Bulian and Francescutto, 2004), a frecuencia de balance natural sen amortecemento é:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM}{(I_{xx} + A_{44})}} \quad (3.21)$$

A nosa ecuación quedará da seguinte forma:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \frac{C_{44} \cdot \phi}{(I_{xx} + A_{44})} = \omega_0^2 \cdot \alpha_{eff}(t) \quad (3.22)$$

A partir desta ecuación imos a elaborar catro modelos de resolución distintos dependendo da forma en que abordemos o termo de restauración.

3. Formulación do modelo matemático.

Pedro Ojea González

3.1.1 Ecuación do movemento absoluto para pequenos ángulos.

Se fôsemos a tratar con pequenos ángulos, poderíamos simplificar a ecuación de forma que o coeficiente de adrizamento fose lineal e polo tanto dependese do GM. Deste xeito, a nosa ecuación quedaría da seguinte forma:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \frac{\Delta \cdot GM \cdot \sin(\phi)}{(I_{xx} + A_{44})} = \omega_0^2 \cdot \alpha_{eff}(t) \quad (3.23)$$

Que podemos escribir tamén como:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot \phi = \omega_0^2 \cdot \alpha_{eff}(t) \quad (3.24)$$

3.1.2 Ecuación do movemento relativo para pequenos ángulos.

No caso anterior estábamos tomando o ángulo ϕ como o ángulo absoluto con respecto á gravidade, é dicir, con respecto ao buque adrizado. Tal e como se explica en (Bulian and Francescutto, 2011), podemos facer un modelo distinto no que o termo de adrizamento se rexa por un ángulo relativo, mentres que o termo de amortecemento siga utilizando o ángulo absoluto. Isto débese ás incongruencias ás que se pode chegar utilizando o modelo co ángulo absoluto xa que non ten en conta a orientación relativa do buque con respecto á onda.

Deste xeito, ese ángulo relativo será o que forman o buque e a pendente da onda. Deste modo non temos que engadir unha excitación externa como facíamos no caso anterior senón que xa a pendente efectiva modela esa excitación. Así, a ecuación de balance quedaría da seguinte forma:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot \sin(\phi - \alpha_{eff}(t)) = 0 \quad (3.25)$$

3.1.3 Ecuación do movemento absoluto para grandes ángulos.

Nos dous apartados anteriores utilizábase unha simplificación a partir da suposición de que só íamos a estudar pequenos ángulos pero se, como é o noso caso, o que nos interesa é estudar un rango de ángulos ao que non queremos por límite esa simplificación deixa de ter efecto e deberemos buscar unha nova forma de modelar o coeficiente de restauración para que o noso modelo non sexa só preciso con pequenos ángulos senón tamén con grandes.

3. Formulaci3n do modelo matem3tico.

Pedro Ojea Gonz3lez

Para iso, neste terceiro modelo e tam3n no seguinte, o par3metro do cal depender3 o noso coeficiente de restauraci3n ser3 o GZ , factor que ten unha dependencia non lineal do 3ngulo de balance.

Isto d3ixanos que a nosa ecuaci3n do movemento de balance pasa a ser:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \frac{\Delta \cdot GZ(\phi)}{(I_{xx} + A_{44})} = \omega_0^2 \cdot \alpha_{eff}(t) \quad (3.26)$$

Sendo $GZ(\phi)$ o brazo de adrizamento que depende do 3ngulo de balance. Ademais, este brazo de adrizamento pod3molo adimensionalizar e as3 obteremos o seguinte coeficiente:

$$R(\phi) = \frac{GZ(\phi)}{GM} \quad (3.27)$$

Polo tanto a nosa ecuaci3n quedar3a como:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot R(\phi) = \omega_0^2 \cdot \alpha_{eff}(t) \quad (3.28)$$

3.1.4 Ecuaci3n do movemento relativo para grandes 3ngulos.

Da mesma forma que xa fixemos no apartado 3.1.2, pero neste para grandes 3ngulos, imos a obter a ecuaci3n do movemento de balance relativo, 3 dicir, tendo en conta que o coeficiente de restauraci3n se rexe polo 3ngulo relativo entre o 3ngulo de balance do buque e o 3ngulo da pendente da onda.

Isto far3 que a nosa ecuaci3n do movemento de balance sexa:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \frac{\Delta \cdot GZ(\phi - \alpha_{eff}(t))}{(I_{xx} + A_{44})} = 0 \quad (3.29)$$

Por 3ltimo, tal e como fixemos tam3n xa anteriormente, podemos deixar o termo de restauraci3n en funci3n da frecuencia de balance natural e do coeficiente adimensional do brazo de adrizamento.

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot R(\phi - \alpha_{eff}(t)) = 0 \quad (3.30)$$

4. Selección e descrición do buque base.

Pedro Ojea González

4 SELECCIÓN E DESCRICIÓN DO BUQUE BASE.

O buque escollido é o arrastreiro con bandeira de Reino Unido chamado MFV (Motor Fishing Vessel) Trident. O motivo principal da elección deste buque foi a existencia dun modelo a escala na Canle de Experiencias Hidrodinámicas da Escola Politécnica Superior de Ferrol grazas ao cal poderíamos realizar unha campaña de ensaios na canle, e que polo tanto permitiría comprobar a validez do modelo matemático elaborado.

O MFV Trident é un arrastreiro dos que se estilaban nos anos 70 en Gran Bretaña, sen rampla traseira, é dicir era un arrastreiro de costado, dunha soa hélice e popa en espello. Ademais, tiña unha soa cuberta, a superestrutura estaba situada a popa e tiña un castelo en proa.

O Trident afundiou o 3 de outubro de 1974 preto do cabo de Duncansby, no norte de Escocia causándolle a morte aos 7 tripulantes que se encontraban a bordo. Despois deste afundimento levouse a cabo unha investigación (Gimson, 1975) na que se chegou á conclusión de que o afundimento deste pesqueiro puido deberse a unha probable deficiencia de estabilidade xa que as condicións de vento e ondas no momento do afundimento non eran as suficientes como para provocar tal suceso.



Figura 4.1. MFV Trident. Fotos obtidas de (Davie Tait, 2009)

Debido a esta investigación levouse a cabo un estudo cun modelo a escala (Paffett, 1976) para intentar determinar cales puideron ser as causas exactas do afundimento e no que se ensaiou tamén un modelo igual pero cambiando o tipo de popa, sendo neste caso redondeada en vez da popa en espello do Trident, xa que a popa redondeada tiña fama de ter un mellor comportamento na mar.

Deste estudo sacáronse diversas conclusións entre as cales se determinaba que o tipo de casco do buque dáballes unha pésima estabilidade que facía que tivese un gran balance incluso con un estado da mar relativamente en calma. Ademais, determinouse que aínda que a popa redondeada tiña un pouco mellor comportamento que a popa en espello, non era o suficientemente mellor como para evitar o afundimento do buque.

4. Selección e descrición do buque base.

Pedro Ojea González

Este estudo proporciónanos tamén ás características principais do buque que se supoñen no momento do afundimento e que define como as seguintes:

Eslora total	25.91	(m)
Eslora entre perpendiculares	22.09	(m)
Manga de trazado	6.86	(m)
Puntal de trazado	3.35	(m)
Calado de deseño	2.48	(m)
Desprazamento	167.6	(t)
GM transversal	0.732	(m)
Hélice	Fixa de 4 palas	Diámetro=1.78 m Paso=1.35 m
Temón	Semibalanceado	Área=2.77 m ²

Táboa 4.1. Características principais do MFV Trident.

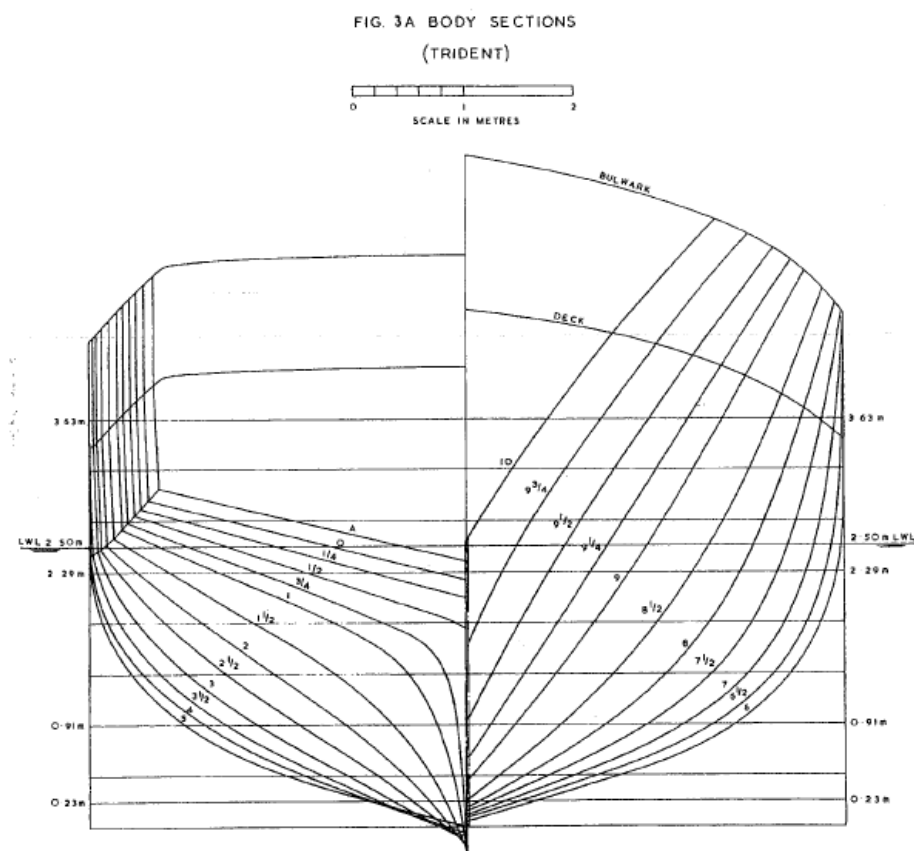


Figura 4.2. Caixa de cadernas.

4. Selección e descrición do buque base.

Pedro Ojea González

Dado que as formas do buque en estudo non estaban dispoñibles, o que se fixo foi utilizar as formas do buque xemelgo chamado Silver Lining para obter as formas, sendo estas as que vemos na figura precedente, e que foron as que utilizaron á hora de realizar o modelo a escala. A continuación vemos unha disposición xeral do buque de estudo.

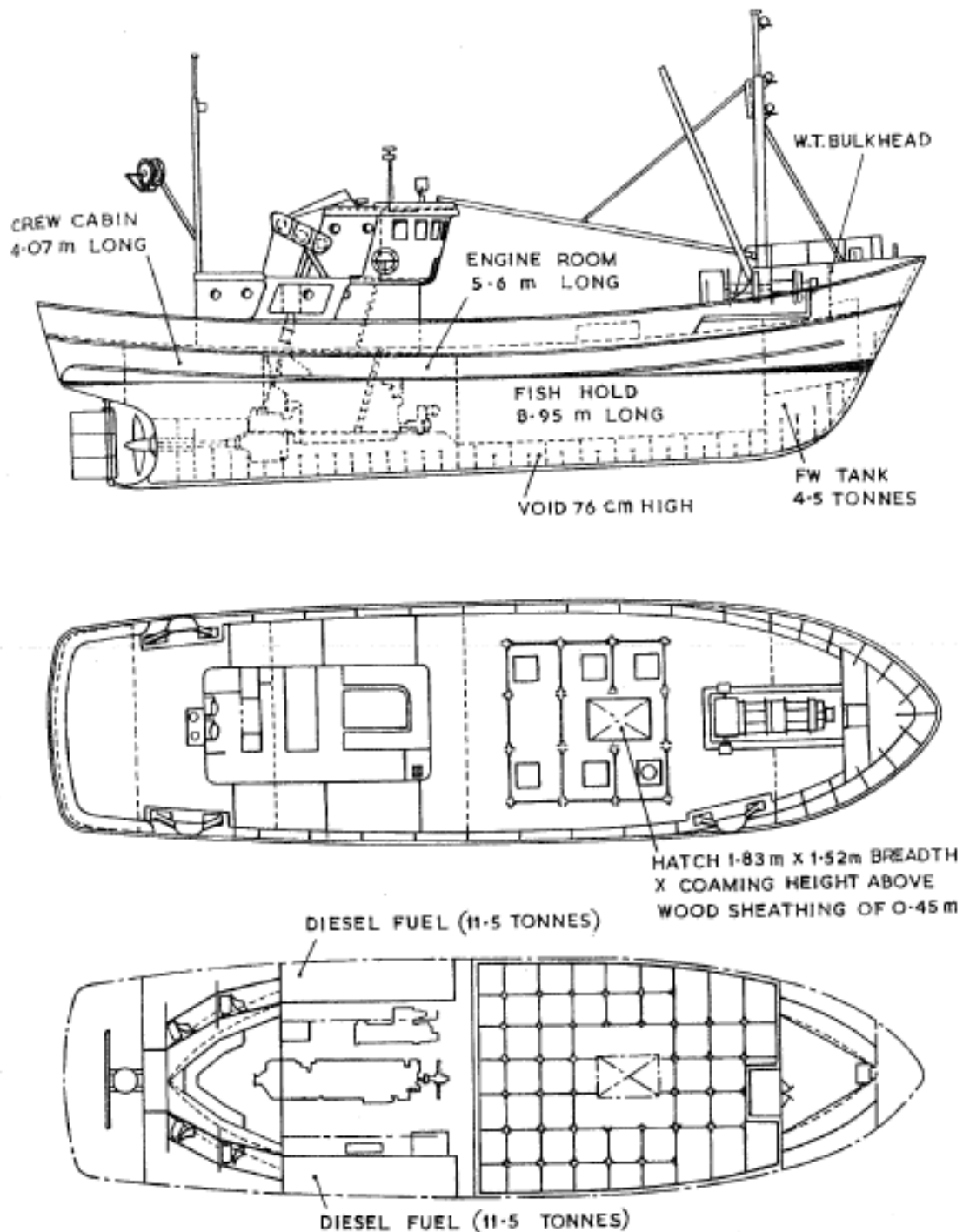


Figura 4.3. Disposición xeral do MFV Trident.

4. Selección e descrición do buque base.

Pedro Ojea González

Ademais deste estudo para a investigación xudicial, este buque foi utilizado como modelo para o estudo da resonancia paramétrica con ondas de proa en diversas investigacións debido ás características tan particulares das súas formas.

Moitos destes estudos foron levados a cabo por investigadores da Universidade Federal de Rio de Janeiro xunto coa Universidade Austral de Valdivia, Chile. A maioría deles utilizan o casco e formas deste buque para analizar a súa estabilidade dinámica a partir de ondas de proa mediante ensaios en canles así como tamén a través da elaboración de modelos matemáticos que simulen o comportamento real do buque. Traballan na maioría dos casos coa resonancia paramétrica.

Podemos por algúns exemplos de estudos como podería ser (Neves et al., 1999), no que, ao igual que se fixera na investigación tralo afundimento do MFV Trident, se compara a estabilidade deste buque coa dun buque xemelgo pero coa popa redondeada. Neste caso, e a diferenza da investigación do National Maritime Institute, estudárase a estabilidade con ondas de proa e analizando a posible resonancia paramétrica que estas produzan a velocidade nula.

Os mesmos investigadores mantiveron unha liña de estudo sobre este tema da resonancia paramétrica utilizando o casco do buque que nos atinxe en outras publicacións como (Neves et al., 2002), onde de novo se comparan o buque con popa transom e con popa redondeada fronte a ondas de proa pero neste caso a diferentes velocidades buscando á influencia que esta velocidade pode ter na aparición de resonancia no balance do buque. No artigo (Neves and Rodríguez, 2006) trátase de elaborar un modelo matemático de tres graos de liberdade que ten en conta os acoplamentos entre o movemento vertical, o balance e o cabeceo e que sirva para describir a resonancia paramétrica que se poida producir.

Como consecuencia destes estudos anteriores ten sentido que a continuación en (Neves and Rodríguez, 2007) se considerase un estudo no que se tratase de analizar os límites de estabilidade reais do buque a través dos ensaios co modelo matemático de tres graos de liberdade tendo en conta a existencia da resonancia paramétrica. Neste tema seguiríase afondando en (Neves et al., 2009).

Estes artigos aquí mencionados son só unha pequena representación de como o buque que imos a utilizar foi xa utilizado para numerosos estudos relacionados coa súa estabilidade a partir de que tralo seu afundimento se descubrise nas súas formas unha deficiencia de estabilidade.

O estudo que neste caso se vai a levar a cabo, a pesar de ser co mesmo buque, non será con ondas de popa ou de proa como nos estudos que mencionamos anteriormente senón que desta volta o que se vai estudar é a resonancia pura producida pola excitación directa de ondas de través sobre o buque a velocidade nula que lle producirán un movemento de balance, que entrará en resonancia cando a frecuencia das ondas excitadoras se acerque á frecuencia natural do noso buque.

5 DESENROLO DO MODELO MATEMÁTICO CO PROGRAMA *MATLAB*.

Para levar a cabo os ensaios co modelo matemático imos a usar o programa *MATLAB*. O que buscamos é obter o valor máximo de escora para cada unha das distintas pendentes de onda que simulemos e para cada unha das distintas frecuencias coas que esas ondas exciten o noso buque.

Dado que a ecuación que temos que resolver é unha ecuación diferencial de segunda orde, o primeiro que temos que facer é encontrar un solucionador deste tipo de ecuacións. Neste caso imos a usar a función *ode45*.

Esta función resolve ecuacións diferenciais ordinarias de primeira orde e o programa cataloga esta función con unha precisión media alta e con unha velocidade de resolución razoable. Ademais dinos que é a que se debe usar na gran maioría dos casos. A estrutura da función é a seguinte:

$$[t,x]=ode45(ODE(t,x,resto\ de\ variables),[0,100],[0,0])$$

Ao comezo introducimos as variables solución que queremos obter e que serán sempre o tempo e a variable solución que nos interesa para cada instante de tempo. Despois do igual introducimos o nome da nosa ecuación diferencial, que deberemos crear como unha función, cousa que veremos máis adiante, coas súas variables dato. Finalmente quedaranos introducir no primeiro corchete o rango de tempo no que queremos resolver a ecuación e no último corchete introduciremos as condicións iniciais, no noso caso posición e velocidade inicial.

Como xa dixemos anteriormente, a función *ode45* só resolve ecuacións de primeira orde e a nosa ecuación é de segunda polo que deberemos buscar un método que nos permita resolvela. Este método explícase en (Scepanovic, 2008) e consiste en converter a nosa ecuación de segunda orde nunha de primeira para o programa.

Para iso imos a crear nun *script* diferente unha función que terá o mesmo nome que lle demos á nosa ecuación diferencial ao aplicar a función *ode45*. Ademais, diremos que esa función será igual a $dxdt$ que será un vector fila de dous valores. Este dous valores serán o primeiro a velocidade, é dicir, a derivada da posición e o segundo a aceleración.

Polo tanto, o que facemos é igualar o $dxdt(1)$ co valor $x(2)$ xa que ambos son velocidade e despois igualamos $dxdt(2)$, que é a aceleración, coa nosa ecuación diferencial unha vez temos despexada a aceleración como vemos a continuación:

$$\ddot{\phi} = \frac{B_{44a} \cdot \dot{\phi}}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}|}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{\Delta \cdot GZ(\phi)}{(I_{xx} + A_{44})} + \frac{M_{ox}}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (5.1)$$

Deste xeito, temos unha ecuación de segundo orde convertida nunha de primeira ao crear a variable $dxdt$.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

Unha vez temos resolto o problema da resolución da ecuación diferencial o que debemos abordar agora é a repetición da resolución para todas as frecuencias e para todas as pendentes de onda, así como o almacenamento desta información e a forma de presentala graficamente.

Para iso imos a realizar dous bucles *for* encadeados de forma que para cada unha das pendentes de onda se resolva a ecuación diferencial para cada frecuencia das ondas. Dado que o resultado que obtemos de cada iteración é unha matriz na que a primeira columna son as posicións e na segunda son as velocidades, imos a crear unha matriz de tres dimensións na que cada plano paralelo da mesma sexa unha iteración.

Para saber a que pendente de onda e a que frecuencia corresponde cada plano paralelo imos a crear unha matriz auxiliar que asocie o número do plano paralelo ás súas correspondentes pendente e frecuencia.

Agora que xa temos a nosa información almacenada, o seguinte paso é buscar cal é o máximo valor de escora en cada unha das frecuencias para poder construír a nosa gráfica. Para isto usamos a función *f_findextr* (Bulian, 2014) que nos devolve una serie de parámetros entre os que se encontra o máximo valor dun determinado vector, neste caso o da posición ou escora, para cada unha das frecuencias, en cada unha das pendentes. Isto volvemos a facelo con dous bucles encadeados.

Ademais debemos ter en conta que dado que nós estamos dando as condicións iniciais, ao comezo de cada unha das simulacións producírase un estado transitorio que non nos interesa, xa que depende das condicións iniciais, polo que no noso caso, e unha vez xa feita algunha proba, determinamos que a partir do segundo 500 xa estamos nun réxime permanente polo que a busca do valor máximo imos facela de aí en diante. Isto podemos velo xustificando no apartado 8.

Unha vez temos os valores máximos de escora en cada frecuencia para cada unha das pendentes podemos facer un gráfico de cada pendente de onda no que o eixo de abscisas sexan as diferentes frecuencias de onda e o eixo de ordenadas sexan os máximos valores de escora en cada unha das frecuencias. Deste xeito poderemos ver con claridade cal é o rango de frecuencias no que se produce a resonancia.

Para levar a cabo unha comparativa entre varios métodos de resolución imos a resolver a ecuación (5.1) así como a ecuación que propuxemos nun apartado anterior co ángulo relativo e que vemos a continuación en (5.2). Ademais imos probar a resolver a ecuación tamén mediante o ángulo absoluto e relativo pero tomando o GM como factor do que depende o coeficiente restaurador. Estas ecuacións vémolos a continuación en (5.3) e (5.4).

$$\ddot{\phi} = \frac{B_{44a} \cdot \dot{\phi}}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}|}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{\Delta \cdot GZ(\phi - \alpha_{eff}(t))}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (5.2)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{B_{44a} \cdot \dot{\phi}}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}|}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{\Delta \cdot GM \cdot \phi}{(I_{xx} + A_{44})} + \frac{M_{ox}}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (5.3)$$

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

$$\ddot{\phi} = \frac{B_{44a} \cdot \dot{\phi}}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{B_{44b} \cdot \dot{\phi} \cdot |\dot{\phi}|}{(I_{xx} + A_{44})} - \frac{\Delta \cdot GM \cdot (\phi - \alpha_{eff}(t))}{(I_{xx} + A_{44})} \quad (5.4)$$

O códigos dos distintos programas resoltos encóntrase nos *Anexo 1*, *Anexo 2*, *Anexo 3* e *Anexo 4*.

5.1 Obtención das variables necesarias.

5.1.1 Cálculo da masa engadida (A_{44})

Para o cálculo da masa engadida imos a usar o programa Octopus-Office da compañía Amarcon que estaba dispoñible na Escola Politécnica Superior de Ferrol para os alumnos. A través deste programa poden calcularse diversos coeficientes hidrodinámicos a partir dunhas formas dadas así como realizar moitos máis estudos, pero no noso caso non afondaremos tanto xa que o que nos interesa é sacar o coeficiente de masa engadida do noso buque.

Como o primeiro que necesitamos son as formas, realizaremos un mallado no casco do buque que xa temos modelado no programa Maxsurf, obtendo deste xeito unha cartilla de trazado onde teremos puntos en y (manga) e en z (puntal) que nos definen as formas do buque.

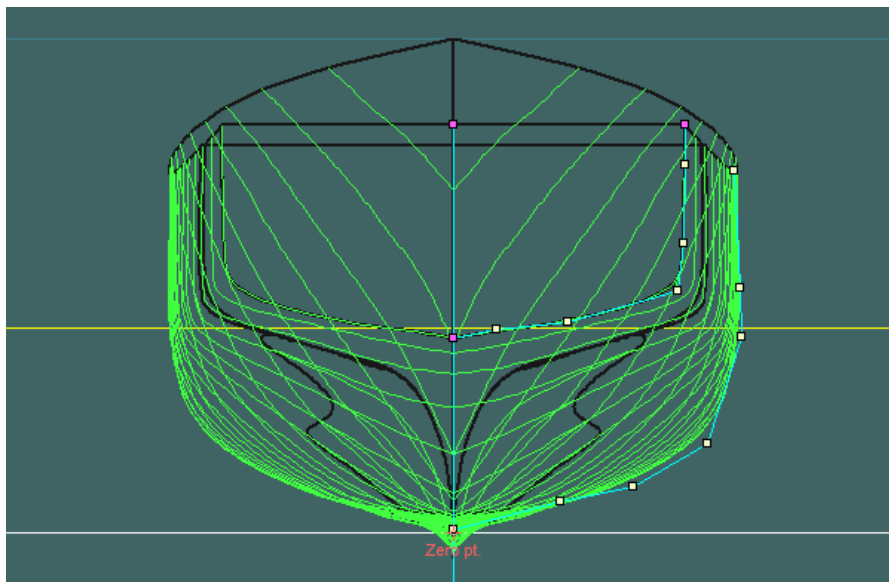


Figura 5.1. Caixa de cadernas do modelo coas seccións escollidas.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

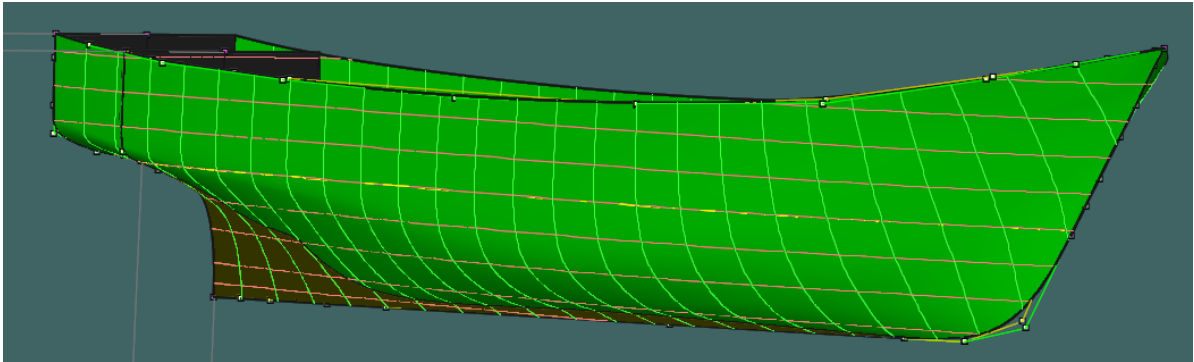


Figura 5.2. Modelo en 3D do buque co mallado das sección e das liñas de auga.

Unha vez temos a nosa cartilla deberemos introducila no Octopus. Para a introdución dos datos das formas, este programa esixe a elaboración dun ficheiro de texto con unha estrutura definida que deberemos respectar se queremos que o programa lea correctamente os datos que estamos introducindo. Este ficheiro é o *Anexo 5*.

Unha vez as formas introducidas son correctas poderemos abrir o ficheiro de texto a través do programa Octopus para definir as formas do noso casco en dúas dimensións e teremos algo como o que vemos nas dúas imaxes a continuación.

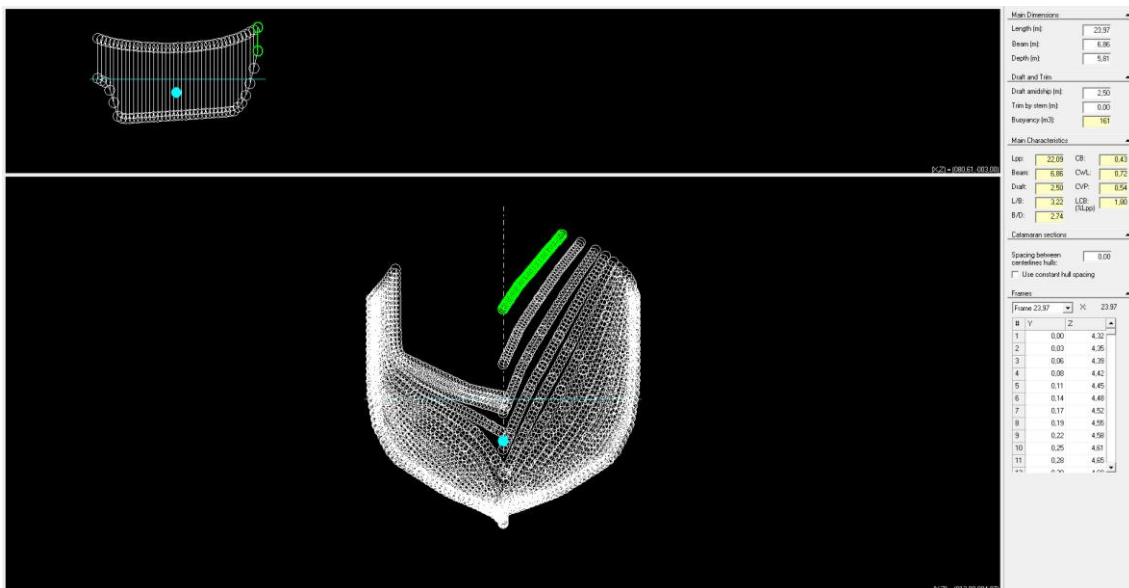


Figura 5.3. Caixa de cadernas e vista lonxitudinal no programa Octopus.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

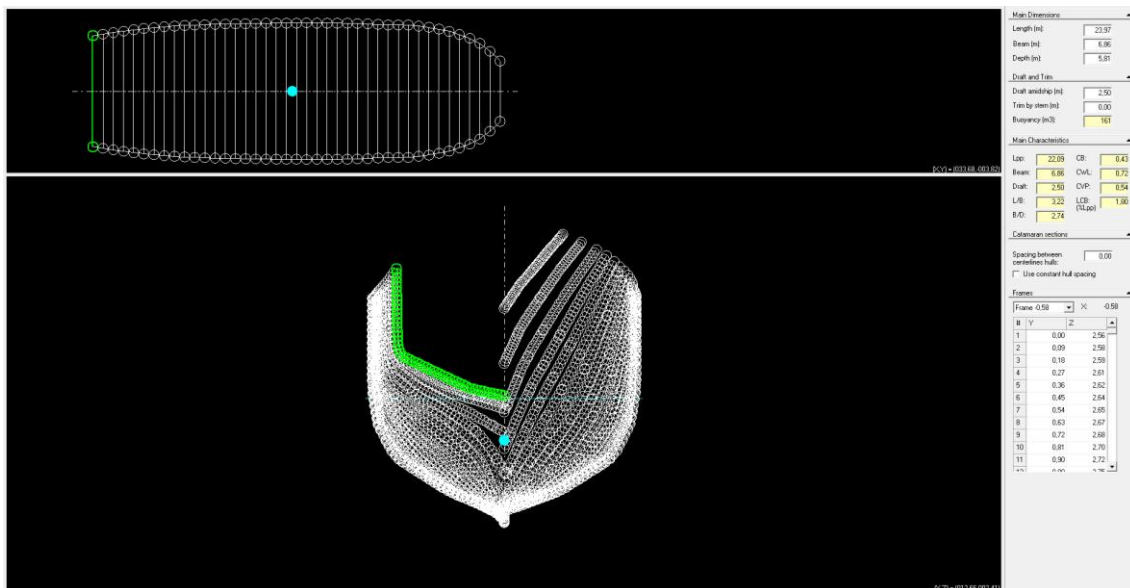


Figura 5.4. Caixa de cadernas e vista en planta no programa *Octopus*.

Unha vez creado o ficheiro en dúas dimensións poderemos crear o ficheiro en tres dimensións. Para iso solicitaranos o ficheiro en 2D para cargar as formas e despois teremos que realizar unha mallado para que o programa teña os seus puntos de cálculo. Nese momento teremos algo como o que vemos a continuación.

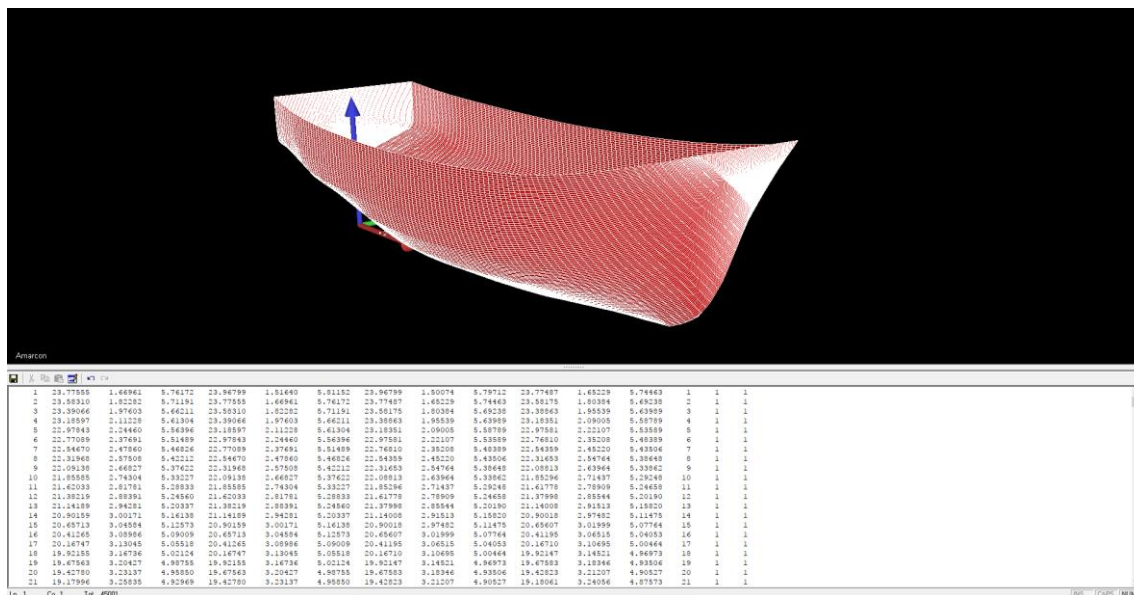


Figura 5.5. Vista 3D con mallado no programa *Octopus*.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

Unha vez temos o ficheiro en 3D só nos queda crear o ficheiro CHDB (Compiled Hydrodynamic Database). Para a creación deste ficheiro necesitamos introducir os dous anteriores. Agora xa só nos queda crear un proxecto a partir do ficheiro CHDB e calcular os resultados. Así obteremos unha serie de parámetros xerais como os que vemos na Figura 5.6 así como os coeficientes de masa engadida que buscábamos para distintas velocidades e distintas frecuencias como vemos na gráfica da Figura 5.7.

No noso caso, dado que temos ondas de costado, a frecuencia que tomaremos será a frecuencia natural do noso buque e a velocidade é 0 xa que non imos mover o buque mentres as ondas lle chegan de costado.

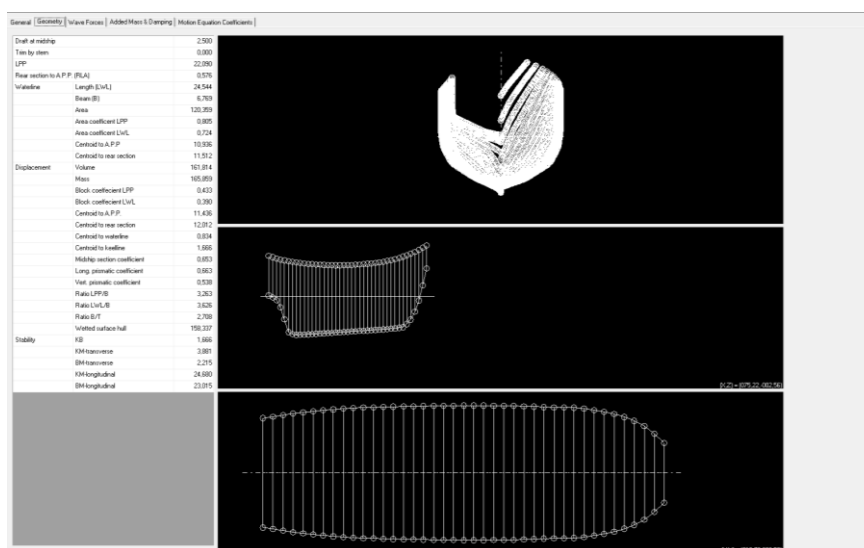


Figura 5.6. Datos xerais do buque obtidos polo programa Octopus.

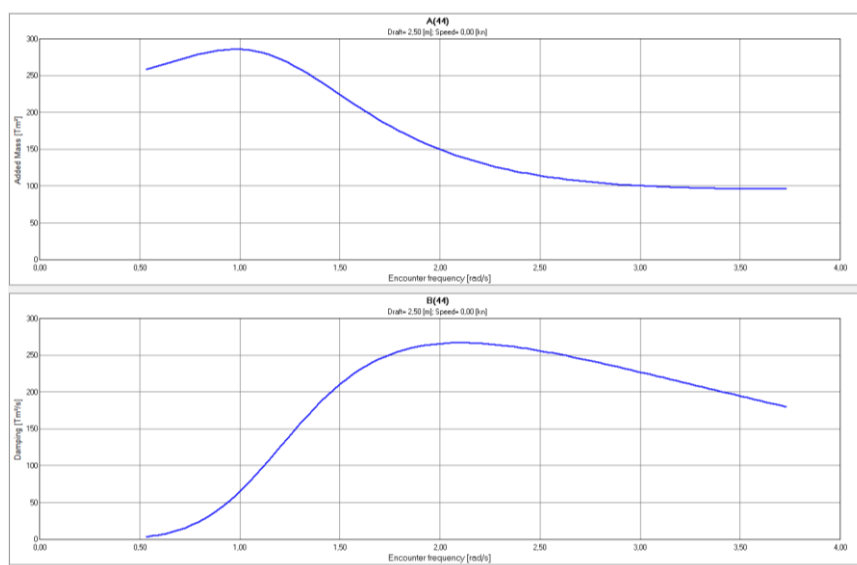


Figura 5.7. Gráfica do coeficiente 44 de masa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

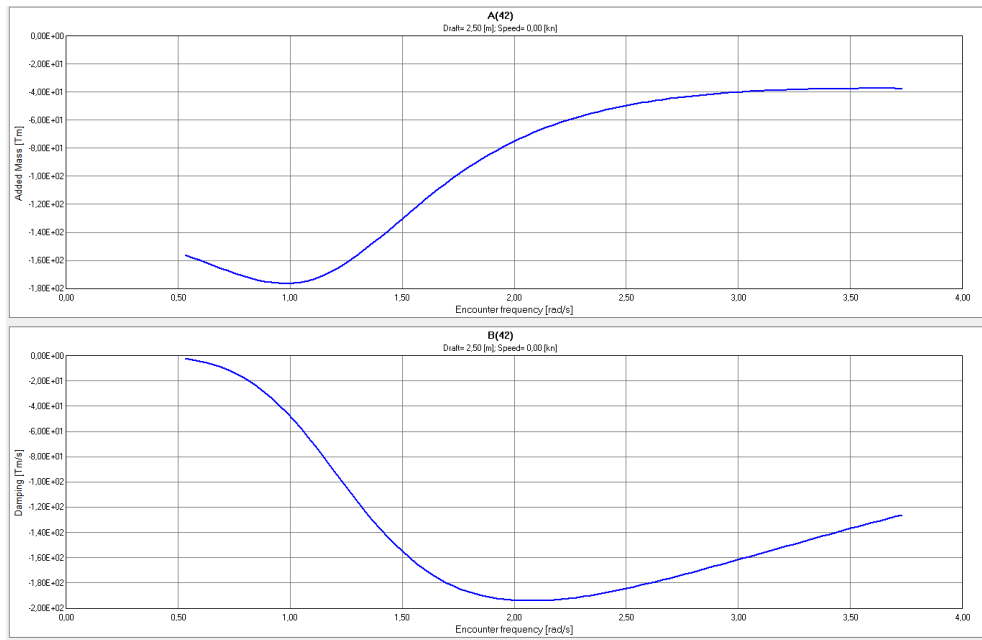


Figura 5.8. Gráfica do coeficiente 42 de massa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.

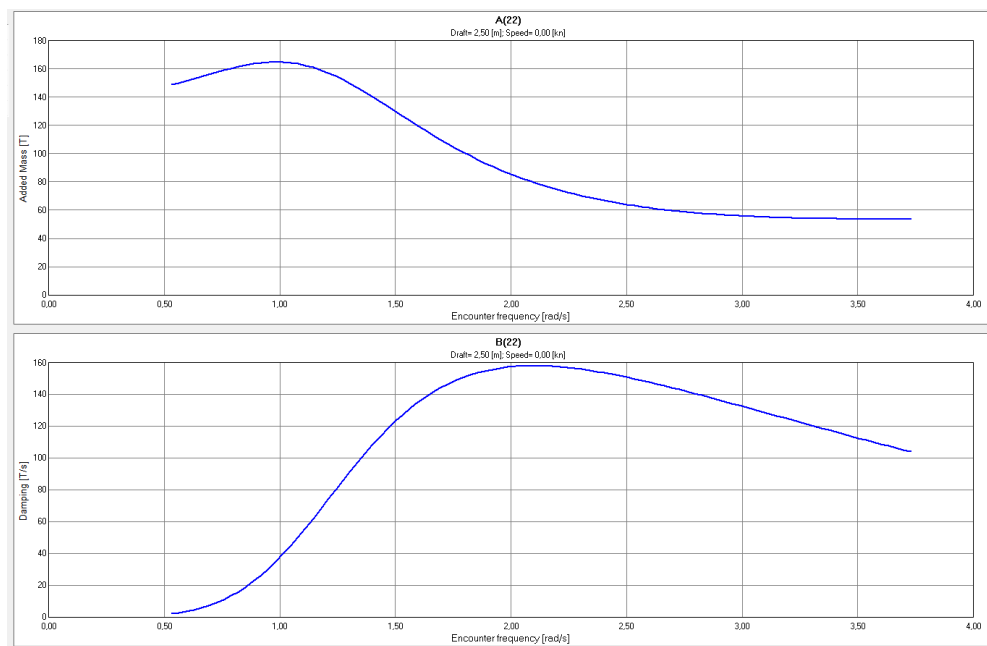


Figura 5.9. Gráfica do coeficiente 22 de massa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.

Os valores destas gráficas correspondentes á masa engadida e o amortecemento para distintas frecuencias, para velocidade 0 nós e calado 2.507 m témolos no *Anexo 6*.

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

Estes valores que obtivemos dos coeficientes teñen como eixo de coordenadas o punto O na superficie da auga, é dicir, á altura do calado, pero o que a nós nos interesa é que este punto se encontre no centro de gravidade do buque. Para iso, e seguindo o desenrolo feito en (Lloyd, 1989), imos a trasladar o valor de masa engadida A_{44} dende O ata G.

Tal e como conclúe en (Lloyd, 1989) a fórmula que deberemos utilizar será a seguinte:

$$a_{44G} = a_{44O} - \overline{OG} \cdot a_{42O} - \overline{OG} \cdot a_{24O} + \overline{OG}^2 \cdot a_{22O} \quad (5.5)$$

Tal e como xa se dixo previamente, deberemos obter o valor deste coeficiente para a frecuencia coincidente coa frecuencia natural do noso buque. Neste caso, esa frecuencia calculámola no Ensaio de decaemento.

Con ese valor e tendo en conta que:

$$\overline{OG} = \overline{KG} - d = 3.263 - 2.507 = 0.756 \text{ m} \quad (5.6)$$

Sendo:

- d : Calado de trazado do buque (m).
- \overline{KG} : Altura do centro de gravidade sobre a liña base, calculada no apartado 7.2.

Obteremos un valor da masa engadida para o noso calado e para a nosa frecuencia natural de 637.10 Tm^2 .

5.1.2 Cálculo da inercia seca(I_{xx})

A partir do dato de masa engadida que xa acabamos de calcular e do valor da frecuencia natural que calculamos no apartado 7.1 e tendo en conta a ecuación (3.21) da cal podemos despexar a inercia seca obtendo o seguinte:

$$I_{xx} = \frac{\Delta \cdot GM}{\omega_0^2} - A_{44} = 276.9265 \text{ Tm}^2 \quad (5.7)$$

Este valor parece pequeno con respecto ao que cabería esperar se utilizásemos o valor clásico do radio de xiro polo que:

$$k_{xx} = 0.4 \cdot B \quad (5.8)$$

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

Polo que sendo a manga 6.86 m, o radio de xiro sería 2.744. Se a inercia a calculamos como:

$$I_{xx} = m \cdot k_{xx}^2 \quad (5.9)$$

E tendo en conta que o desprazamento (m) obtido no apartado 7.2.1 é de 184.984 toneladas, a inercia seca tería un valor de 1392.84 Tm².

Tendo en conta que todos os datos utilizados para o cálculo a través da fórmula (5.7) foron obtidos de forma correcta, a razón de que obteñamos un valor tan baixo podería explicarse tendo en conta que todos os pesos do modelo a partir do cal se obteñen os datos se encontran centrados.

A inercia total suma da inercia seca e da masa engadida sería 914.0265 Tm².

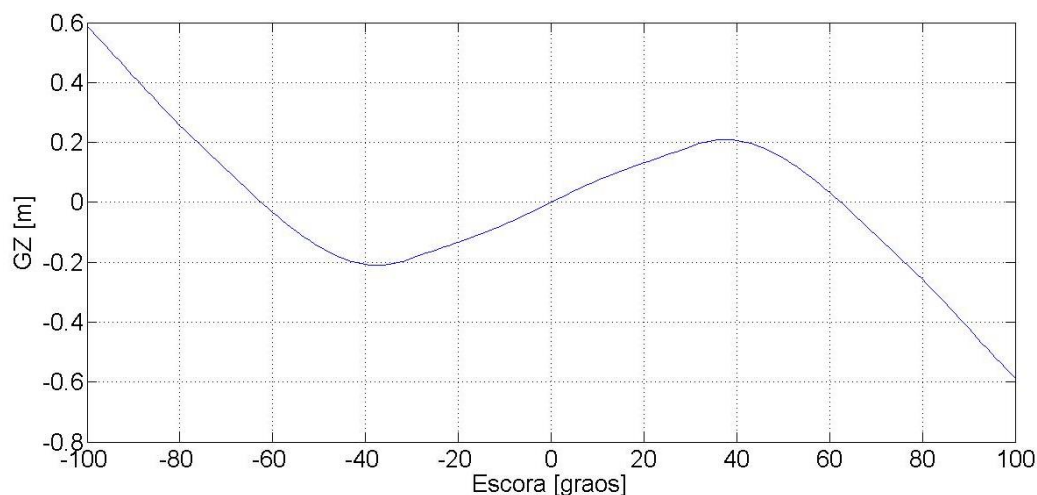
5.1.3 Cálculo dos GZ.

Unha vez máis, a través do programa *Maxsurf*, neste caso co seu módulo *Stability*, imos a proceder ao cálculo da curva de brazos adrizantes ou *GZ*. Para iso deberemos fixar un calado e un rango de ángulos de escora para os realizaremos o cálculo.

No noso caso, e dado que nos interesa saber como é o *GZ* tanto para unha banda como para outra, calcularemos os valores dende 100 graos de escora a babor ata 100 graos a estribor. Ademais debemos establecer un paso que nós fixaremos en 1, de forma que nos calcule o *GZ* para cada ángulo.

Así que temos estes valores só teremos que pasalos a un documento *excel* para que dende o modelo de *MATLAB* que elaboramos leamos os valores que necesitamos en cada momento, como podemos ver no código que se encontra nos Anexos.

Igualmente, os datos do estudo de estabilidade a grandes ángulos sacado do *Stability* concóntanse no **Anexo 7**.



5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

Figura 5.10. Curva de GZ.

5.1.4 Cálculo do coeficiente de pendente da onda (r).

Á hora de calcular este coeficiente o primeiro que debemos é escoller cal será o método que utilizemos xa que existen unha gran variedade. No noso caso imos a utilizar dous que permiten o cálculo deste coeficiente sen a necesidade de levar a cabo cálculos moi complexos, que é o que se está buscando coa metodoloxía que estamos a seguir.

O primeiro obtémolo do criterio de vento recollido en (Maritime Safety Committee IMO, 2009), que no seu Anexo II chamado *Adoption of the International Code on Intact Stability* de 2008, e que como parte do cálculo do ángulo de escora a barlovento debido á acción das ondas utiliza e define o noso coeficiente r como:

$$r = 0.73 + 0.6 \cdot \overline{OG}/d \quad (5.10)$$

O outro método que imos a utilizar será o que encontramos en (Blume, 1979), que a través dunha gráfica dependente do período natural do buque e da súa manga, nos dá o valor do coeficiente que buscamos, como vemos na imaxe a continuación.

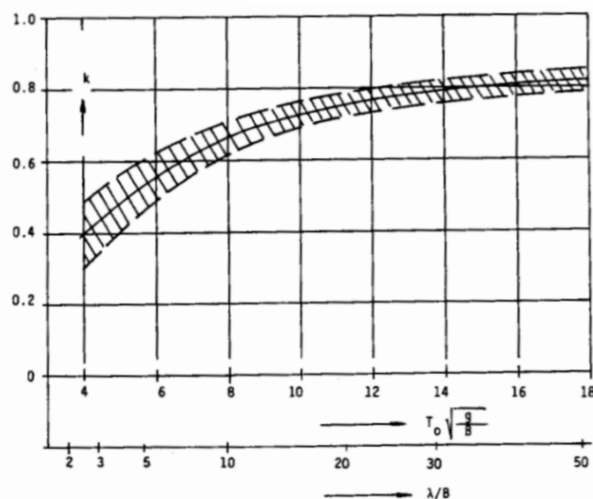


Figura 5.11. Gráfica para a obtención do coeficiente de pendente da onda.

Como vemos nesta gráfica, dánosen tres liñas que definen un intervalo posible para o valor r . No noso caso imos a coller o valor medio destas tres liñas. Obtendo unha gráfica como a que vemos a continuación:

5. Desenrolo do modelo matemático do programa *MATLAB*.

Pedro Ojea González

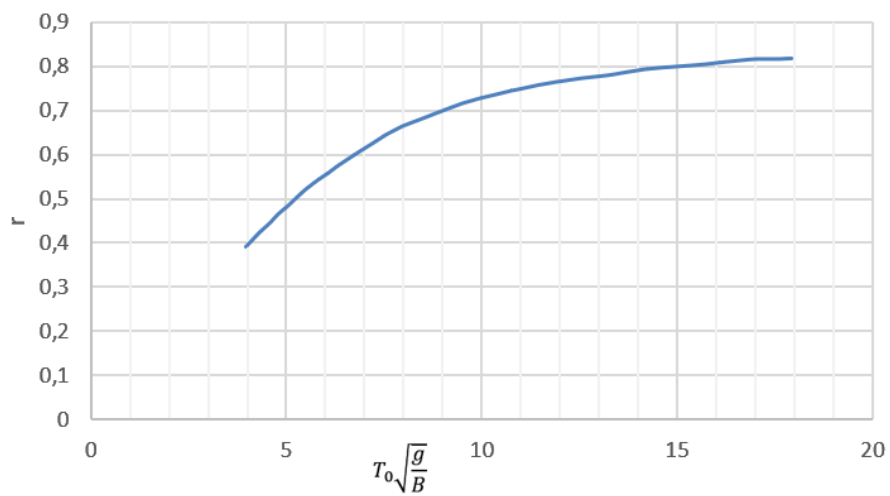


Figura 5.12. Gráfica final para a obtención de r.

Ambos cálculos estão incluídos no modelo matemático feito em *MATLAB* e a partir deles faremos unha media para obter o valor do coeficiente que finalmente utilizaremos e que será de 0.7877.

6 CARACTERÍSTICAS DA CANLE DE ENSAIOS E DO MODELO.

6.1 A canle.

Para levar a cabo os ensaios utilizouse a Canle de Experiencias Hidrodinámicas da Universidade da Coruña, situada no Centro de Investigacións Tecnolóxicas do Campus de Esteiro, Ferrol.

Estas instalacións contan con unha canle principal de 56 metros de longo, 3.8 metros de ancho e 2 metros de fondo.



Figura 6.1. Canle de Experiencias hidrodinámicas.

Esta canle ten 4 elementos principais que describiremos a continuación:

- O xerador de ondas

O xerador de ondas consiste nunha pa transversal á canle que a ocupa dun lado a outro tal e como vemos na Figura 6.2. Esta pa acciónase a través dun motor eléctrico que recibe as ordes dende un controlador do que falaremos a continuación. Conta tamén con unhas galgas que toman a medida da altura da auga na canle para a correcta xeración das ondas.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

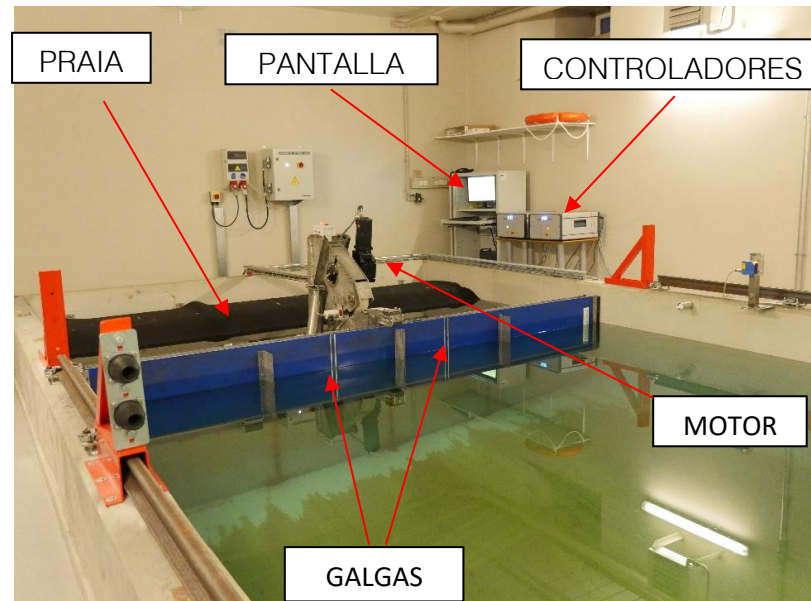


Figura 6.2. Xerador de ondas.

- O carro.

O carro é unha estrutura metálica que se apoia nos raís laterais da canle e que a través de motores eléctricos permite o seu movemento ao longo de todo a canle, obtendo a súa posición a través dun sensor láser. Neste carro hai instalado un armario no que se encontran os racs de toma de datos aos que chega a información dende as sondas instaladas na parte frontal do carro e que nos servirán para medir a altura e período real que xera a pa.

Neste armario conectaremos tamén o ordenador auxiliar que nos servirá para tomar os datos das sondas e da IMU (descrita no apartado 6.4) a través dos programas que explicaremos no apartado 6.2.

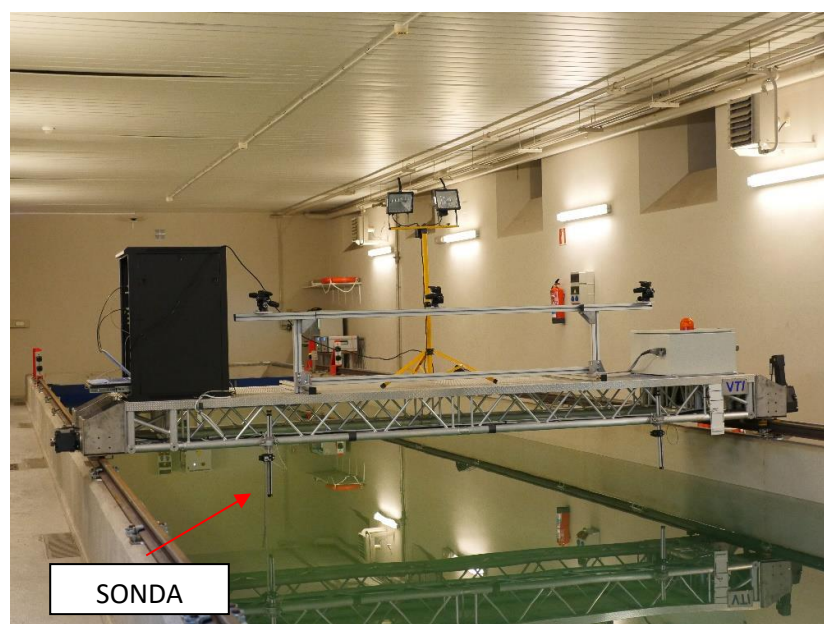


Figura 6.3. Carro da canle.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

- As praias.

As praias son os elementos que tanto detrás da pa como ao final do canal disipan a enerxía das ondas facendo que estas rompan. Ambas son unha estrutura metálica recuberta na parte que simula a praia por un material poroso que permite o paso da auga a través del pero que é máis absorbente que a chapa metálica sobre a que se coloca.

- Os controladores e ordenadores.

Estes elementos vímolos na Figura 6.2 e son os encargados de tratar a información que dende o carro ou a pa debe ser interpretada polos correspondentes softwares para o correcto funcionamento dos mesmos.

Cada un deles está asociado a un só ordenador e que a través de un *switch* permite a súa visualización nunha soa pantalla, como vemos na figura mencionada.

6.2 Software da canle.

O software que utilizamos na canle podemos dividilo en dous grupos, un para a xeración das ondas e o outro de adquisición de datos.

No primeiro grupo imos a ter o programa AwaSys6 que nos permite escoller o tipo de ondas que queremos realizar así como introducir os parámetros das ondas que queiramos xerar. Este programa envía os datos ao programa Wave Generator Desktop que é o encargado de por en funcionamento a pa.

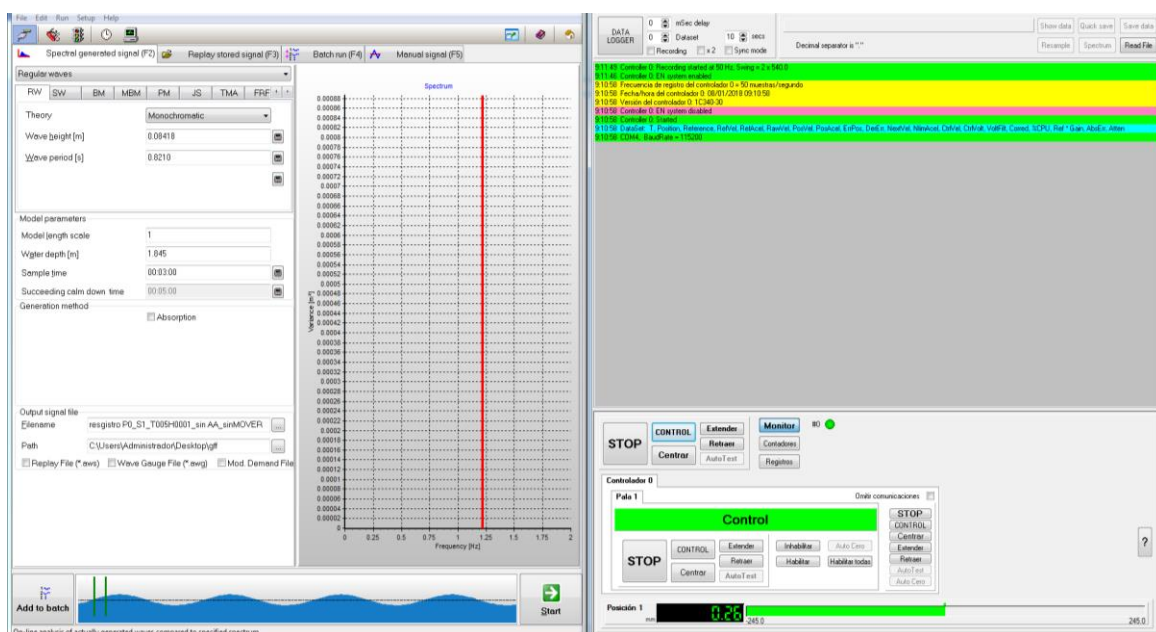


Figura 6.4. Programas do xerador de ondas.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

En canto aos programas de adquisición de datos teremos un que se encargue de recoller os datos da IMU, que é o programa XSens MT Manager, a través do cal podemos activar e desactivar as IMU así como realizar as gravacións que nos interesan e despois exportar estes resultados. Na seguinte imaxe vemos unha reprodución dos datos obtidos nun dos ensaios.

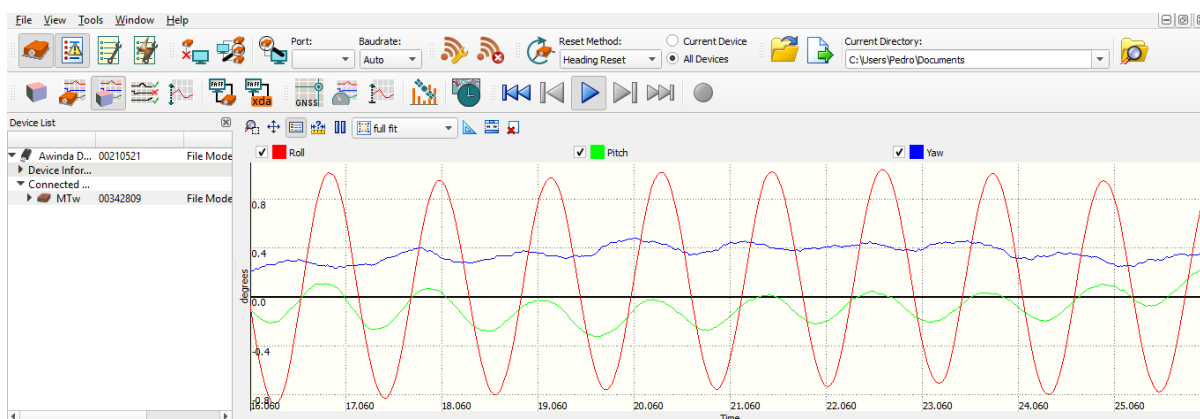


Figura 6.5. Programa MT Manager.

Por último temos o programa Wavelab que é o que nos permite recoller e xestionar os datos da sonda. Do mesmo xeito que no caso do MT Manager, este programa permite realizar unha gravación a partir da cal nos dá xa unha serie de parámetros aínda que nós igualmente poderemos acceder a todos os datos para poder tratalos como queiramos. Neste caso os datos máis importantes que nos dá son a altura e o período medio das ondas que se sucederon durante a gravación.

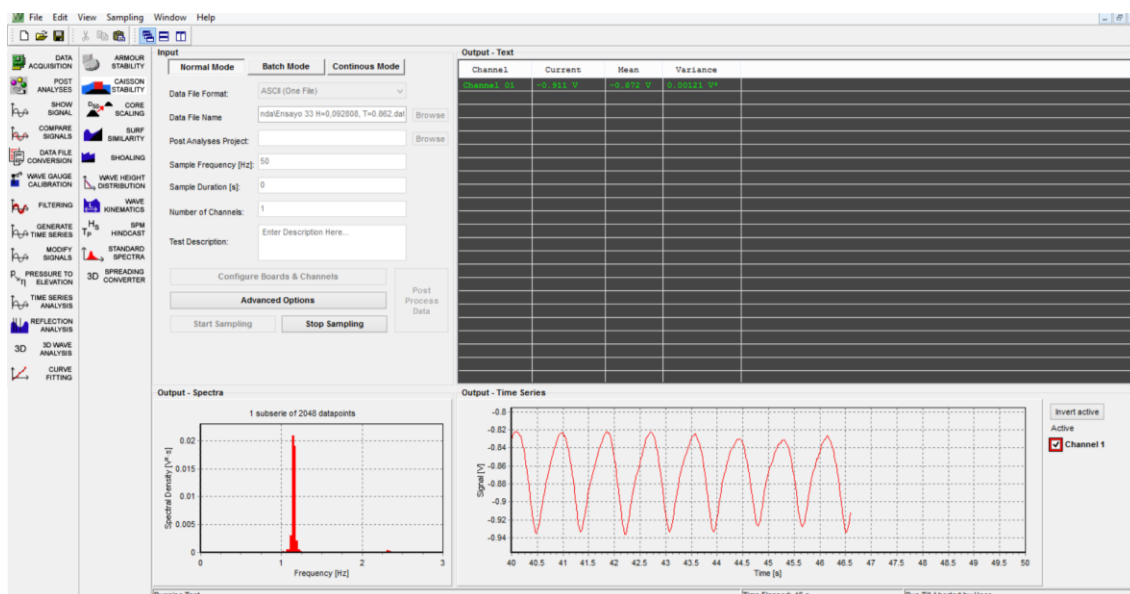


Figura 6.6. Programa WaveLab durante a adquisición de datos nun ensaio.

6.3 Calibración da canle.

Á hora de escoller os ensaios que se van a realizar na Canle de Experiencias Hidrodinámicas deberá terse en conta as limitacións que teñen os compoñentes da mesma. Referímonos, por exemplo, ás limitacións dos tipos de ondas que imos xerar.

No noso caso as ondas que xeraremos serán ondas regulares que identificaremos cunha altura e un período, xa que son estes os valores que nos pide o software de xeración de ondas. O fabricante do xerador de ondas proporcionou un gráfico (Figura 6.7) no que se mostraban as limitacións do xerador de ondas debido á limitación do movemento da pa e debido á excesiva pendente de onda que faría que as ondas rompesen.

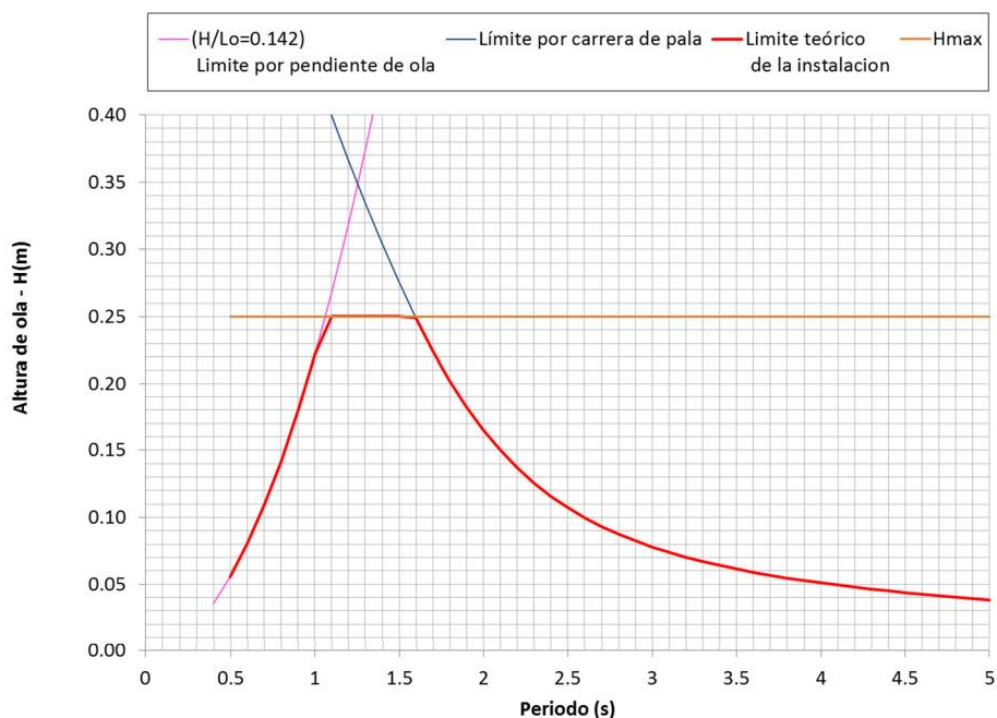


Figura 6.7. Curva de rendemento teórica para ondas regulares e para unha profundidade 1.8 m. Fonte: (Vazquez y Torres Ingeniería S.L, 2015)

Igualmente, antes da campaña de ensaios na canle co modelo a escala, levouse a cabo na Canle de Experiencias unha serie de ensaios de calibración polos cales se realizou un estudo no que se xeraban ondas situadas dentro da curva de rendemento teórica proporcionada polo fabricante, barrendo toda a área de acción da pa, e se comparaban coas medidas obtidas a partir dos datos recollidos coas sondas situadas no carro que se encontraba uns metros por diante da pa. Deste xeito pretendíase comprobar o erro cometido pola xerador de ondas con respecto aos datos introducidos no software de xeración.

Determinouse unha altura de inicio dos ensaios de 0.05 m a partir da cal se foi aumentando en altura de 0.025 en 0.025 metros ata chegar aos límite que establecemos en 0.3 metros.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

Decidiron estudarse os períodos con décimas pares e tamén coa décima 5. Deste modo saíron un total de 108 ensaios levados a cabo ao longo dun mes completo. Para estes ensaios utilizouse o software descrito no apartado anterior, a excepción do correspondente aos datos da IMU, xa que neste caso soamente se pretendía medir altura de ondas.

Para levar a cabo os ensaios, o primeiro que debía facerse para por en marcha a canle era axustar a profundidade da auga enchéndoa ata os 1.8 metros, altura a que estaba calibrada a canle polo fabricante. Unha vez tiñamos a canle coa profundidade axeitada, acendíamos os controladores e os ordenadores dos xeradores de ondas e da pa. Unha vez a auga estaba calmada podíamos realizar un *self-test* co co programa Awasys6 que permitía calibrar o xerador de ondas. Unha vez terminaba o calibrado debíamos actualizar os coeficientes de calibrado e a continuación xerábamos unha serie de ondas para producir o movemento da auga e eliminar a estratificación producida debido ao tempo que levaba a auga sen moverse.

A continuación, unha vez se calmaba a auga, realizábase un segundo *self-test* coa intención de axustar aínda máis os coeficientes de calibrado. En algunha ocasión podían chegar a realizarse ata 3 *self-test* debido a que o erro das galgas non se reducía ata os niveis aceptables establecidos polo programa.

Mentres a auga se volvía a calmar colocábanse as dúas sondas no carro, unha a cada lado do mesmo. Esta encontrábanse a unha distancia de 12.83 metros por diante do xerador de ondas. Unha vez a auga estaba en calma podía proceder a realizar o calibrado das sondas mediante o programa WabeLab do que xa falamos no apartado anterior.

Este proceso de posta a punto diario podía levarnos entono a 1 hora e media ou 2 horas xa que o tempo de espera que debíamos realizar para que a auga se calmase ralentizaba moito o proceso. Estamos falando de que activando o absorbedor da pa, sistema que diminuía o rebote das ondas contra ela e as amortecía, o tempo que podía tardar en calmarse a auga estaba en torno aos 30 minutos con ondas pequenas e cerca de unha hora con ondas superiores aos 20 centímetros.

Unha vez listo o proceso de posta a punto diario, a continuación comezábamos os ensaios. Isto facíase da seguinte maneira; primeiro, introducíanse os datos no programa Awasys6 do xerador de ondas e creábase o ficheiro correspondente para gardar os datos no programa WaveLab que deixábamos xa listo para comezar a gravación. Neste momento activamos a xeración e corremos cara o ordenador do carro para comezar a gravación das sondas. A gravación comezaba unha vez pasaban as 3 primeiras ondas, isto servía para excluir da gravación as primeiras ondas que moi probablemente non estaban totalmente desenroladas, pertencendo ao réxime transitorio do ensaio.

A gravación continuaba ata que o rebote das ondas na praia estaba a piques de chegar de novo ás sondas. Unha vez parábamos a gravación utilizábamos o propio software WabeLab para extraer unha serie de parámetros entre os que se encontraban a altura e o período medio xerados. De todas formas, gardábamos tamén todos os datos tomados en cada ensaio coa frecuencia de muestreo establecida.

Unha vez feito isto parábase o xerador se este inda non acabara e activábase o absorbedor de novo para proceder de novo ao calmado da auga e poder realizar o seguinte ensaio.

Rematada a adquisición de datos levouse a cabo un posterior procesamento dos mesmos de onde se extraeron os erros cometidos polo xerador con respecto ás medidas reais

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

tomadas polas sondas. Comprobouse que mentres que o período das ondas se xeraba de maneira correcta sendo os erros totalmente desprezables, no que se refería a altura de onda, o erro aumentaba así que nos acercábamos aos límites da curva dada polo fabricante. Os resultados deses ensaios móstranse na seguinte figura.

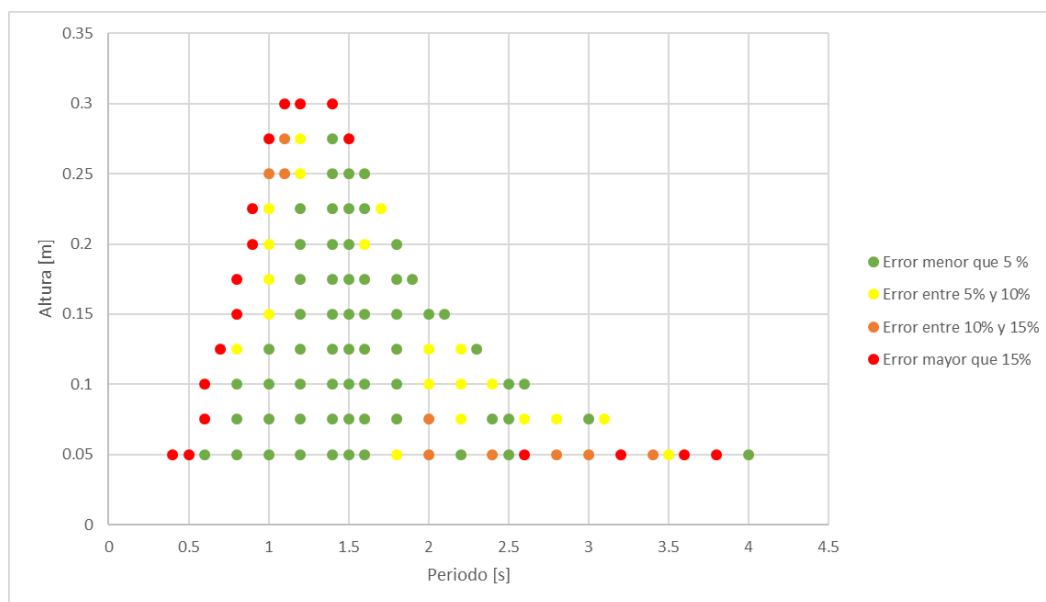


Figura 6.8. Gráfica do erro do xerador de ondas.

A figura anterior representa o porcentaxe de erro de cada un dos ensaios. Cada un dos puntos mostrados corresponde a un ensaio realizado e que se identifica por un período e por unha altura. A cor dos puntos indica o erro relativo de altura fronte a altura esixida, é dicir, os puntos en verde representan os ensaios cuxo erro en altura é menor a un 5%, os puntos en cor amarela representan os ensaios que tiveron un erro entre o 5 e o 10%, os puntos laranxas representan os ensaios que tiveron entre un 10 e un 15% e os puntos vermellos representan os ensaios cun erro maior do 15%.

Como vemos na figura anterior, os puntos cun erro maior encóntranse nos límites de funcionamento, mentres que os ensaios co menor erro sitúanse na parte central ca campá de funcionamento.

Polo tanto, á hora de escoller os ensaios que se van a realizar na canle, debemos ter en conta estas limitacións. Para poder implementalas nun modelo matemático que nos dea os ensaios que si se poden realzar e os que non o que imos a facer vai ser seleccionar todos aqueles ensaios cun erro menor do 10% e unilos establecendo unha nova curva de funcionamento como a que vemos na Figura 6.9. O que fixemos a continuación foi aproximar esa curva obtida por un polinomio de sexto grao que será o que utilizemos finalmente para poder establecer o límite en altura.

Debemos destacar ademais que a pesar de que a altura mínima ensaiada foron 5 cm, vaise a tomar como altura mínima de xeración 2,5 cm. No que se refire ao período nesta zona por debaixo dos 5 cm quedará limitado aos valores entre 0,5 e 3. Como xa dixemos anteriormente, esta curva utilizarase máis adiante no apartado 8, á hora de seleccionar os posibles ensaios a realizar.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

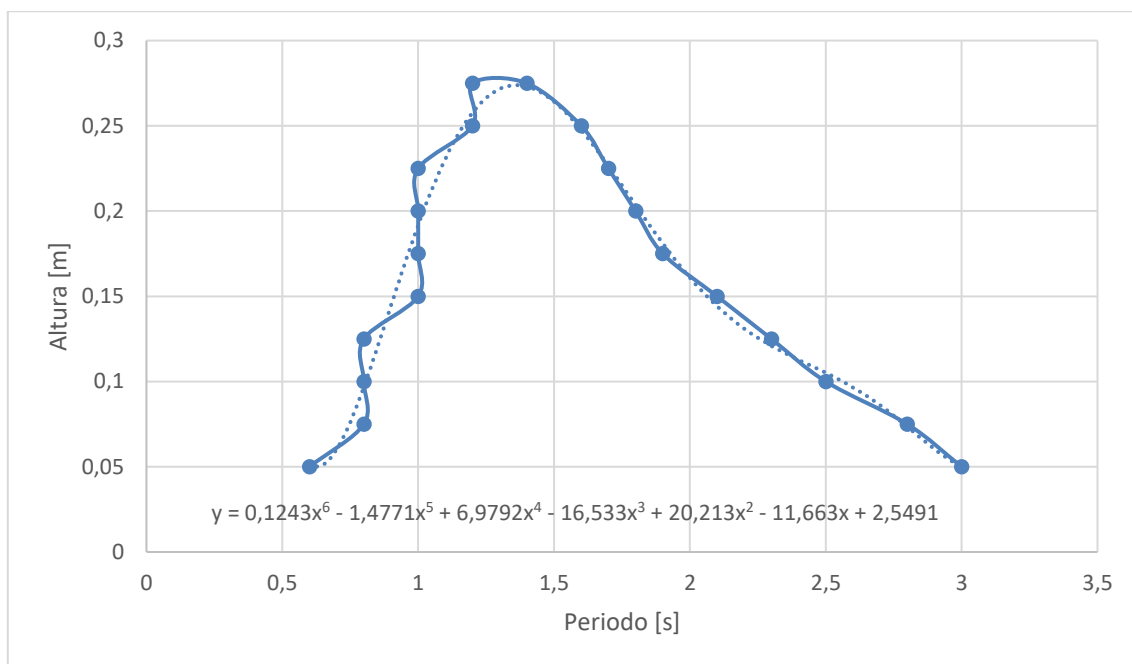


Figura 6.9. Curva límite do xerador de ondas.

6.4 O modelo.

O modelo utilizado é un modelo a escala do buque que xa introducimos no apartado 4. A escala do modelo é 1:15 polo que as súas dimensións principais son as que se recollen a continuación:

Eslora total	1.72	(m)
Eslora entre perpendiculares	1.47	(m)
Manga de trazado	0.46	(m)
Puntal ata a amurada	0.287	(m)
Calado de deseño	0.1671	(m)
Desprazamento	54.810	(kg)

Táboa 6.1. Características principais do modelo.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

Este modelo está feito de poliuretano de alta densidade, pintado externamente e reforzado pola parte interior con fibra de vidro. Ademais, está preparado e equipado para ser autopropulsado, xa sexa a través dun control remoto ou de forma autónoma grazas ao mini PC que leva instalado.

Para poder actuar como un modelo autopropulsado, ademais do mini PC conta cunha serie de elementos que detallaremos a continuación e que se mostran na Figura 6.10.

- Baterías. Son dúas e van colocadas na parte de popa. Aparte de contribuír ao trimado e adrizado do modelo serven de alimentación a todos os compoñentes que van instalados no modelo.
- Sistema de propulsión. Consiste nun motor eléctrico de tres fases e unha reductora que a través dun eixo moven unha hélice de 4 pas. Ademais o temón contrólase a través dun servo electrónico.
- Pesos. Conta tamén con unha serie de pesos para obter as condicións de carga adecuadas, algúns deles son regulables para así poder axustar a condición.

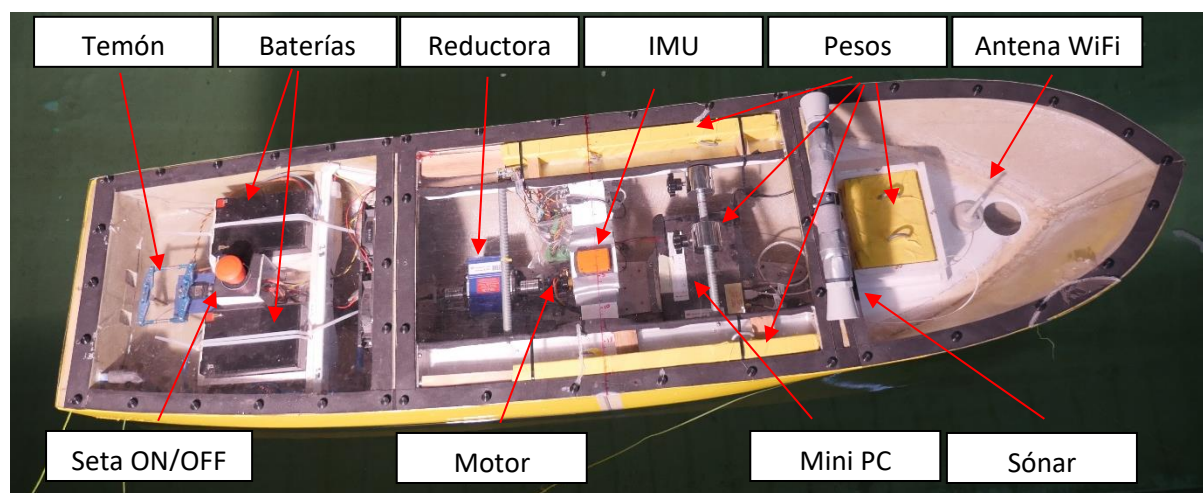


Figura 6.10. Disposición dos distintos elementos dentro do modelo.

A parte destes elementos o modelo conta tamén con un serie de sensores que serven para obter datos dos experimentos que con el se realicen, a continuación detallamos unha relación dos mesmos.

- IMU (Inertial Measurement Unit): Ou en galego, unidade de medidas inerciais.

Tal e como se explica en (Xsens Technologies B.V., 2014) este sistema de monitorización dos movementos consiste nun dispositivo sen fíos, como o que vemos na figura a continuación, e que no seu interior leva instalados un acelerómetro 3D, que nos dá as aceleracións; un giróscopo 3D, que nos dá a velocidade angular; un magnetómetro 3D, que nos dá o campo magnético; e un barómetro, que nos dá a

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

presión atmosférica. Combinando todos estes datos e grazas ao algoritmo do sistema, este proporcionáanos a orientación en tres dimensións.



Figura 6.11. IMU. Fonte: (Xsens Technologies B.V., 2014)

Dado que é un dispositivo sen fíos, conta con unha batería con un tempo útil en modo de medición de en torno a dúas horas polo que deberemos cambiar a IMU que temos no modelo aproximadamente cada ese tempo, e por iso necesitamos dúas; unha que teremos cargando e outra en funcionamento. Nas especificacións técnicas dáenos uns valores de funcionamento e erros da propia IMU e que se mostran a continuación:

	Angular velocity	Acceleration	Magnetic field	Pressure
Dimensions	3 axes	3 axes	3 axes	-
Full Scale	± 1200 deg/s	± 160 m/s ²	± 1.5 Gauss	300 -1100 mBar ¹²
Linearity	0.1 % of FS	0.2 % of FS	0.2 % of FS	0.05 % of FS
Bias stability ¹³	20deg/hr	-	-	100 Pa/year
Noise	0.05deg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.003m/s ² / $\sqrt{\text{Hz}}$	0.15mGauss/ $\sqrt{\text{Hz}}$	0.85 Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Alignment error	0.1 deg	0.1 deg	0.1 deg	-
Bandwidth ¹⁴	140Hz	120 Hz (max.)	10-60 Hz (var.)	-

Figura 6.12. Características de funcionamento da IMU.

Dynamic Range	all angles in 3D
Angular Resolution ¹⁵	0.05 deg
Static accuracy (Roll/Pitch)	<0.5 deg
Static Accuracy ¹⁶ (Heading)	1 deg
Dynamic Accuracy ¹⁷	2 deg RMS

Figura 6.13. Características de orientación da IMU.

6. Características da canle de ensaios e do modelo.

Pedro Ojea González

Para conectar este dispositivo co software mencionado no apartado 6.2 contamos con un dispositivo USB como o que vemos na seguinte imaxe:



Figura 6.14. Conector USB. Fonte: (Xsens Technologies B.V., 2014)

- Sensor de empuxe: O modelo leva instalada unha galga extensiométrica no coxinete de empuxe e que permite medir o empuxe que a hélice está xerando sobre o modelo.
- Medidor de par e de revolucións: Instalado para medir o réxime de funcionamento do motor en cada instante.
- Sónar: O sónar está instalado coa intención de que este mida a distancia dende o modelo ata as paredes da canle de forma que a través do mini PC e das medicións do propio sónar o buque poida facer unha carreira pola canle manténdose centrado.

No caso dos ensaios que se van a realizar, o único sensor que nos interesará será a IMU xa que os nosos ensaios será a velocidade cero e polo tanto non imos utilizar o modelo de forma autopropulsada.

7 ENSAIOS DE DECAEMENTO E PROBA DE ESTABILIDADE.

7.1 Ensaio de decaemento.

Con este ensaio buscamos obter unha serie de datos do buque que a priori non podemos obter doutra forma. Estes datos son a frecuencia natural e os coeficientes de amortecemento, parámetros que xa describimos anteriormente.

A análise deste ensaio imos a descompoñela en tres apartados, segundo a orde na que se realizaron.

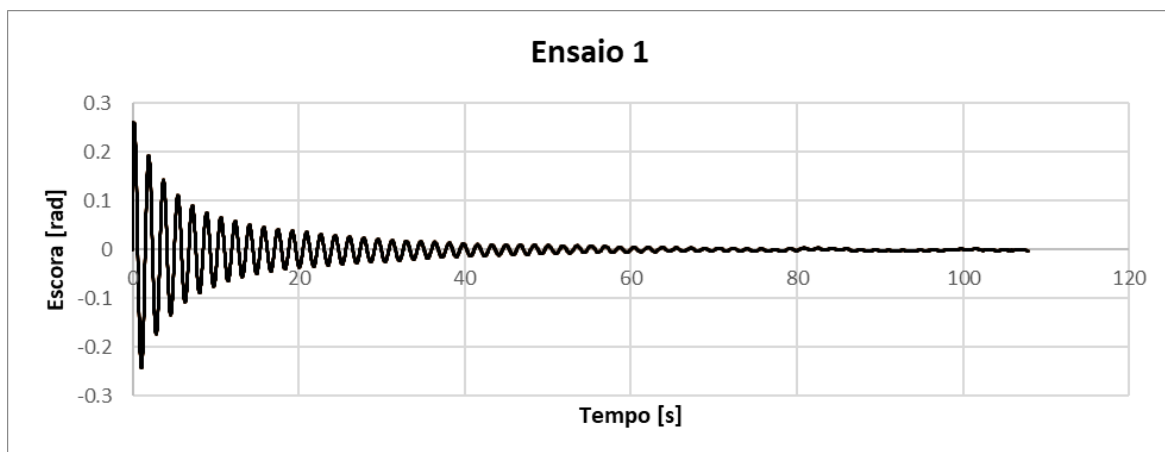
7.1.1 Obtención de datos.

Para a obtención de datos levouse a cabo unha serie de ensaios, na canle de ensaios hidrodinámicos, nos cales o que se fixo foi excitar o modelo con un grado de escora e soltalo para que oscilase libremente. Durante esta oscilación utilizouse a IMU xa descrita no apartado 6.4 e de aí obtivéronse os ficheiros cos valores medidos por esta con unha frecuencia de mostraxe de 50 herzios.

Leváronse a cabo 7 ensaios partindo de ángulos de escora distintos, dende máis pequenos, a máis grandes para así poder extraer uns datos máis fiables do termo cuadrático do amortecemento.

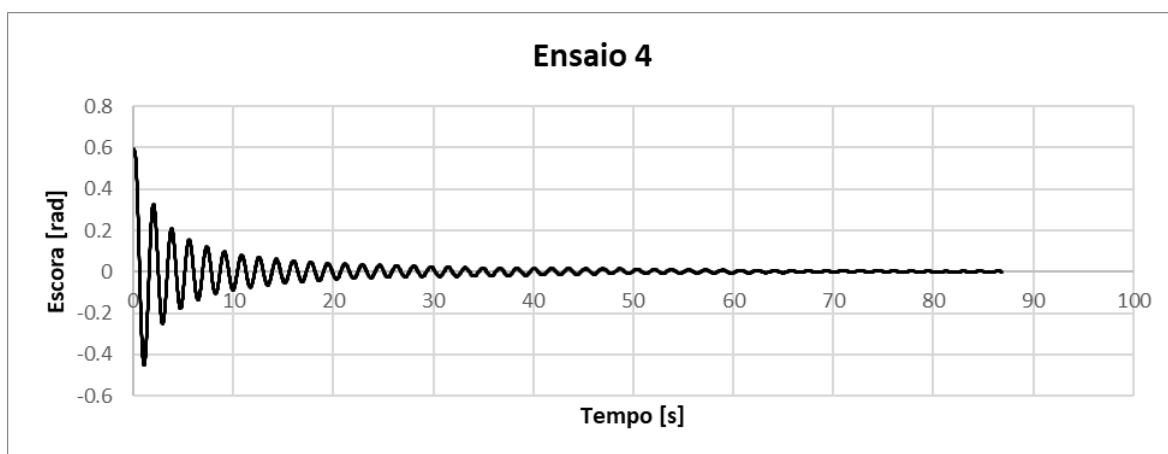
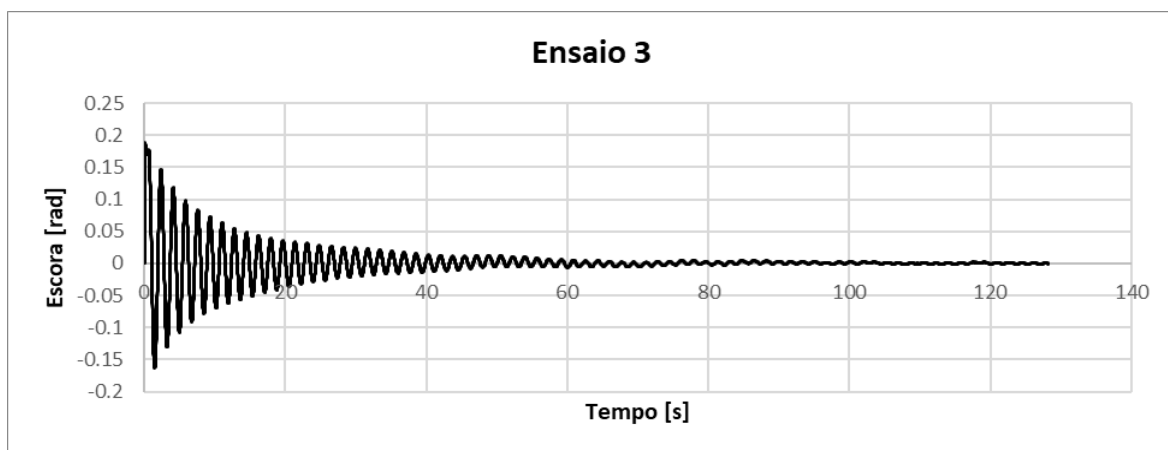
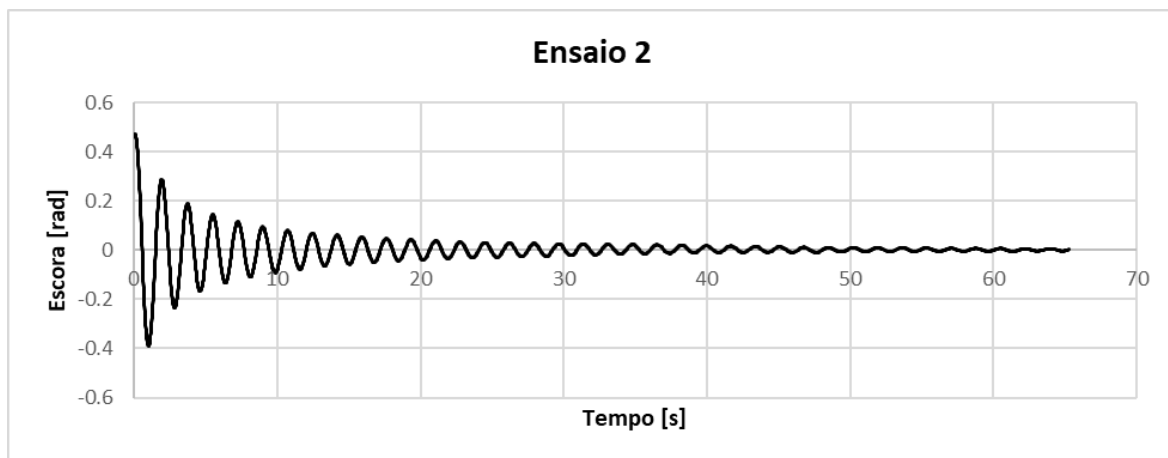
7.1.2 Procesado dos datos.

Como xa dixemos anteriormente, o que buscamos é obter os valores de amortecemento lineal e cuadrático, así como a frecuencia natural do noso buque modelo, que despois poderemos escalar ao noso buque real. A continuación móstranse de forma gráfica os datos obtidos a partir dos sete ensaios.



7. Ensaio de decaimento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González



7. Ensaio de decaimento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

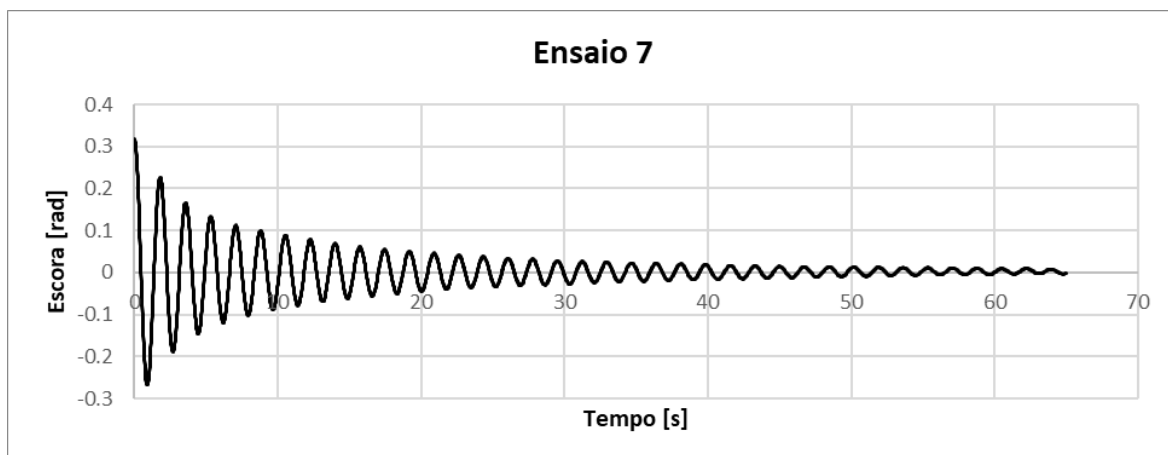
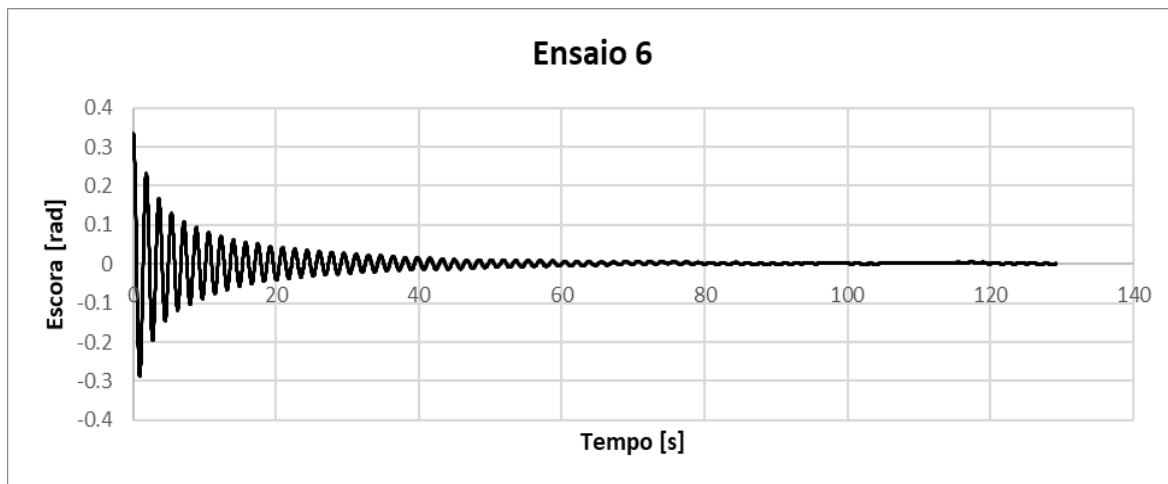
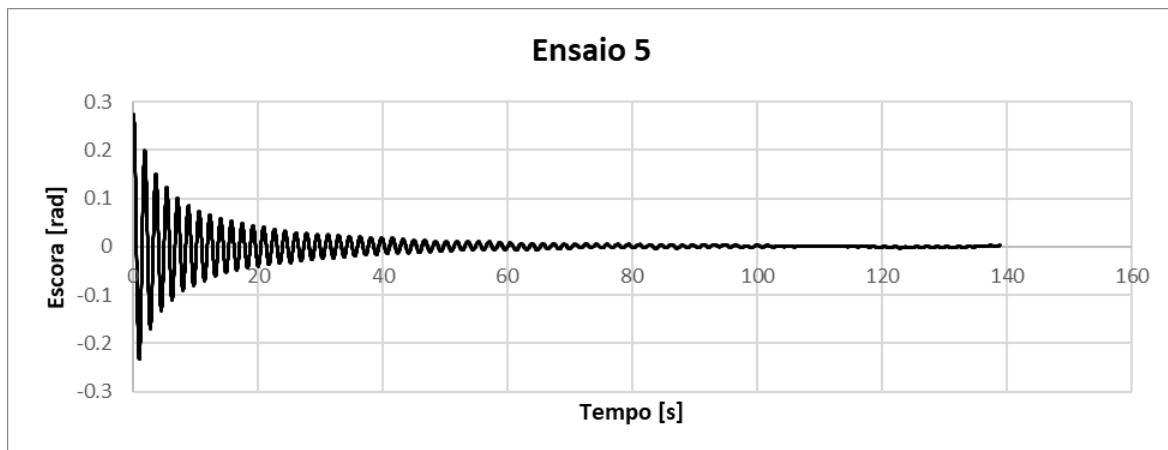


Figura 7.1. Gráficas dos dados obtidos dos sete ensaios de decaimento.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Como vemos nas gráficas anteriores, cada un dos ensaios tivo unha duración diferente polo que agora decidimos tomar de cada un deles un rango de datos igual. Neste caso imos a tomar 2 rangos de datos, un de 30 segundos dende o momento en que se solta o modelo para que comece a oscilar e outro de 60 segundos. Con isto o que buscamos é ter dous resultados en paralelo que poidamos comparar no seguinte apartado co ensaio de decaemento feito a partir do noso modelo matemático.

Unha vez temos estes datos separados e listos para traballar con eles elaboraremos un código de *MATLAB* que nos permita levar a cabo os cálculos. Este código pode consultarse no *Anexo 8*.

Para levar a cabo este ensaio seguiremos o método explicado en (Bhattacharyya, 1978), no cal extrae só o coeficiente lineal, e en (Himeno, 1981), levando a cabo este último unha serie de cálculos polos que obtén unha ecuación do amortecemento de terceira orde. Por último, (Marcos Míguez González, 2012) leva tamén a cabo o estudo do amortecemento como unha ecuación de segunda orde.

Polo tanto, baseándonos en todas estas referencias, o que deberemos sacar dos datos que xa temos serán os máximos e mínimos, así como o tempo correspondente a cada un deles. Isto facémolo no código que estamos elaborando coa función *f_findextr* (Bulian, 2014), da que xa falamos no Apartado 5, e que neste caso nos serve para extraer os máximos e mínimos de cada un dos 7 ensaios así como o tempo correspondente a cada un deles, tanto no caso dos 60 segundos como no caso de 30.

Os tempos entre cada un dos máximos ou entre cada un dos mínimos dannos o período natural do noso modelo e polo tanto a súa frecuencia natural. Para calcular os períodos levamos a cabo a seguinte conta en todo o vector de tempos:

$$T_i = t_{i+2} - t_i \quad (7.1)$$

Desta forma, temos un vector de períodos ao cal deberemos facerlle á media para obter o valor do período do noso modelo, neste caso obtivéronse os seguintes valores:

	Estudo de 60 segundos [s]	Estudo de 30 segundos [s]
Período do modelo	1.7234	1.7305
Período do buque real	6.6748	6.7022

Táboa 7.1. Valores do período do modelo e do buque real.

Agora, e a partir dos datos mostrados na táboa anterior, poderemos calcular a frecuencia natural do modelo e do buque tendo en conta que:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (7.2)$$

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Polo tanto, os valores da frecuencia natural serán:

	Estudo de 60 segundos [rad/s]	Estudo de 30 segundos [rad/s]
Frecuencia natural do modelo	3.6458	3.6308
Frecuencia natural do buque real	0.941	0.9375

Táboa 7.2. Valores da frecuencia natural do modelo e do buque real.

Tal e como se explica nas referencias previamente citadas, o que debemos levar a cabo é unha gráfica na que enfrontemos o decaemento, $\Delta\phi$, fronte ao ángulo medio ϕ_m . O primeiro que faremos será tomar todos os valores de balance positivos, sexan á banda que sexan e despois calcular o decaemento e o ángulo medio da seguinte forma:

$$\Delta\phi_i = \phi_i - \phi_{i+2} \quad (7.3)$$

$$\phi_{m_i} = \frac{\phi_i + \phi_{i+2}}{2} \quad (7.4)$$

Deste xeito obteremos dous vectores, un de decaementos e outro de ángulos medios, que poderemos enfrontar nunha gráfica como a que vemos a continuación.

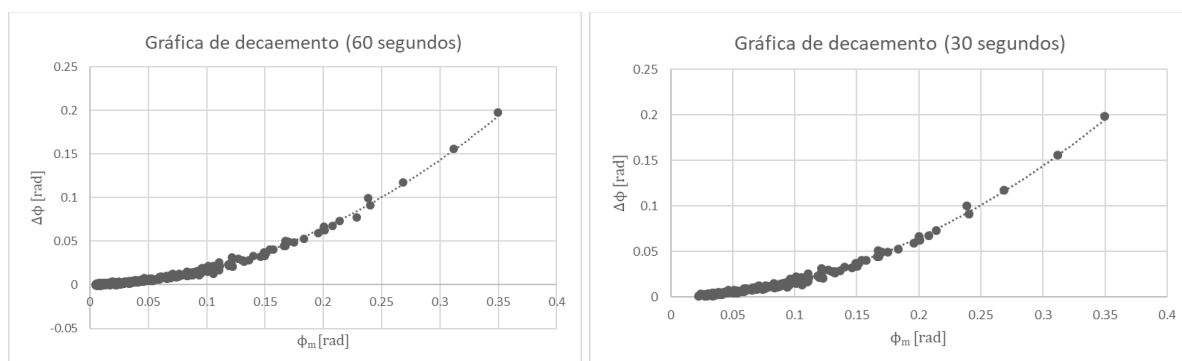


Figura 7.2. Gráficas de decaemento fronte a ángulo medio coas súas liñas de tendencia.

Como viñamos falando, nas referencias coas que estamos tratando fórmulanse distintos modelos para o decaemento, pero neste caso nós imos a realizar un de segunda orde como o seguinte:

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

$$\Delta\phi = K_1 \cdot \phi + K_2 \cdot \phi^2 \quad (7.5)$$

Para obter estes coeficiente K_1 e K_2 , coñecidos como coeficientes de extinción, engadimos á nosa gráfica unha liña de tendencia que nos mostra a ecuación de segunda orde que mellor se axusta aos nosos datos. Os valores obtidos vémoslos na seguinte táboa:

	Estudo de 60 segundos [s]	Estudo de 30 segundos [s]
K_1	0.0251	0.0212
K_2	1.5063	1.5299

Táboa 7.3. Coeficientes de extinción.

Con estes coeficientes e seguindo a formulación dada por (Himeno, 1981) teremos que:

$$K_1 = \frac{\pi \cdot \omega_0 \cdot B_{44a}}{2 \cdot \Delta \cdot GM} \quad (7.6)$$

$$K_2 = \frac{4 \cdot \omega_0^2 \cdot B_{44b}}{3 \cdot \Delta \cdot GM} \quad (7.7)$$

Polo tanto, despxando os coeficientes de amortecemento lineal e cuadráticos teremos que:

$$B_{44a} = \frac{2 \cdot \Delta \cdot GM \cdot K_1}{\pi \cdot \omega_0} \quad (7.8)$$

$$B_{44b} = \frac{3 \cdot \Delta \cdot GM \cdot K_2}{4 \cdot \omega_0^2} \quad (7.9)$$

Debemos ter en conta que estes valores están calculados para medio ángulo de balance polo que no noso caso deberemos dividilos por 2, quedando como se ve a continuación:

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

$$B_{44a} = \frac{\Delta \cdot GM \cdot K_1}{\pi \cdot \omega_0} \quad (7.10)$$

$$B_{44b} = \frac{3 \cdot \Delta \cdot GM \cdot K_2}{8 \cdot \omega_0^2} \quad (7.11)$$

Facendo estes cálculos obteremos os valores finais que vemos a continuación:

	Estudo de 60 segundos	Estudo de 30 segundos
B_{44a} [tm ² /s]	6.8714	5.909
B_{44b} [tm ²]	516.22	525.9965

Táboa 7.4. Coeficientes de amortecemento.

7.1.3 Comparación co ensaio de decaemento en MATLAB.

Xa como último apartado deste ensaio de decaemento o que se levou a cabo foi unha comparativa dos datos obtidos nos ensaios con un modelo elaborado para simular o ensaio de decaemento utilizando para este os datos obtidos no apartado 7.1.2. Este código recóllese no Anexo 9.

A ecuación que se utilizou para simular o ensaio de decaemento foi a do movemento absoluto para grandes ángulos pero tendo en conta que neste caso non había excitación externa das ondas, é dicir, que a ecuación diferencial a resolver sería a seguinte:

$$\ddot{\phi} + d(\dot{\phi}) + \omega_0^2 \cdot R(\phi) = 0 \quad (7.12)$$

Esta ecuación resolveuse do mesmo xeito que fixemos co modelo matemático tal e como se explicou no apartado 5. A continuación móstranse as gráficas resultantes dos sete ensaios.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

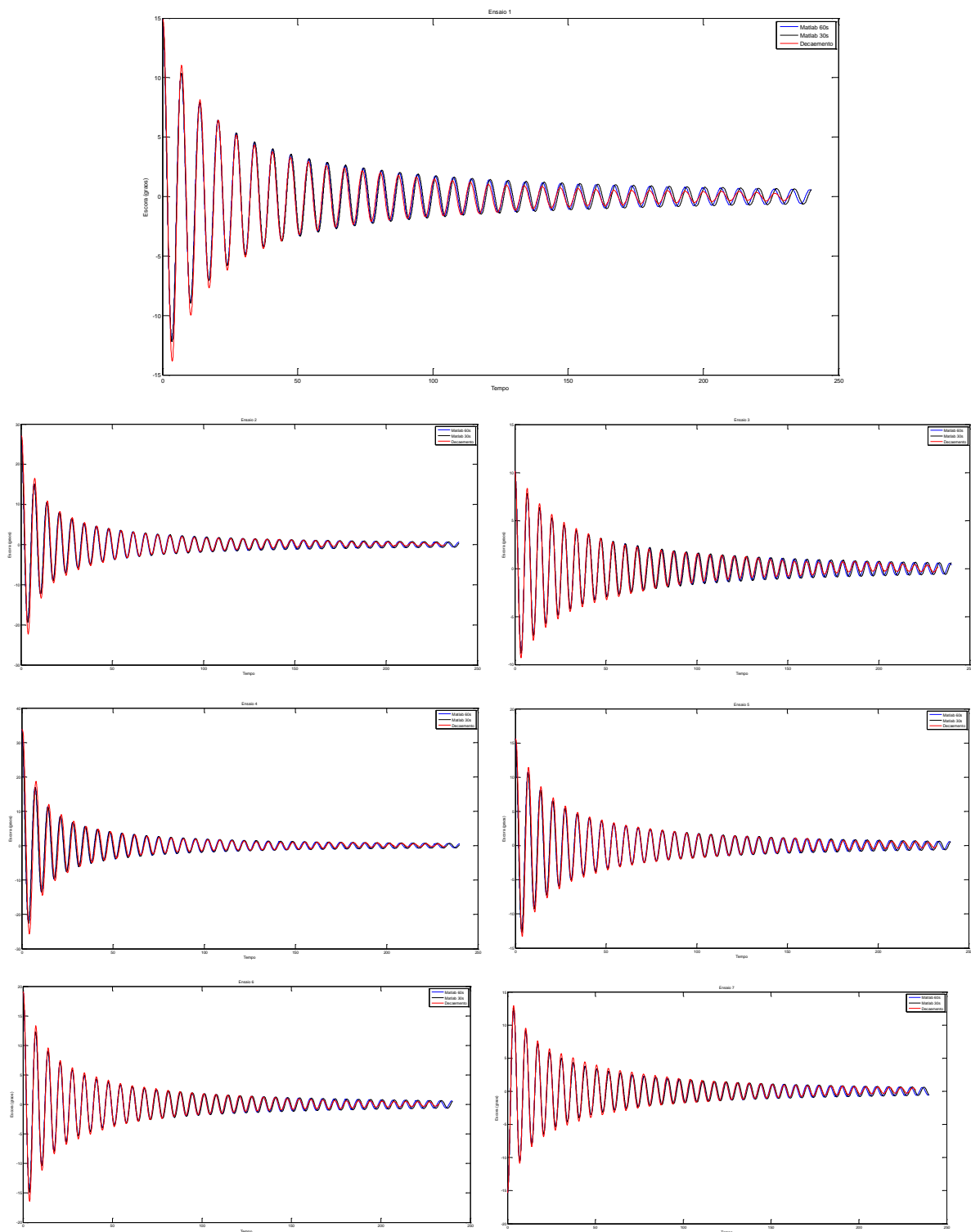


Figura 7.3. Gráficas comparativas do modelo matemático e do ensaio de decaemento.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Como podemos apreciar tanto o modelo con 30 segundos como o modelo con 60 segundos axústanse de maneira correcta ao ensaio real. De todas formas e se o vemos con un pouco máis de zoom, como na Figura 7.4, en xeral é o modelo de 60 segundos o que máis se asemella e, polo tanto, serán os datos obtidos a partir deste os que utilizaremos de aquí en diante. Na Táboa 7.5 móstranse os datos definitivos.

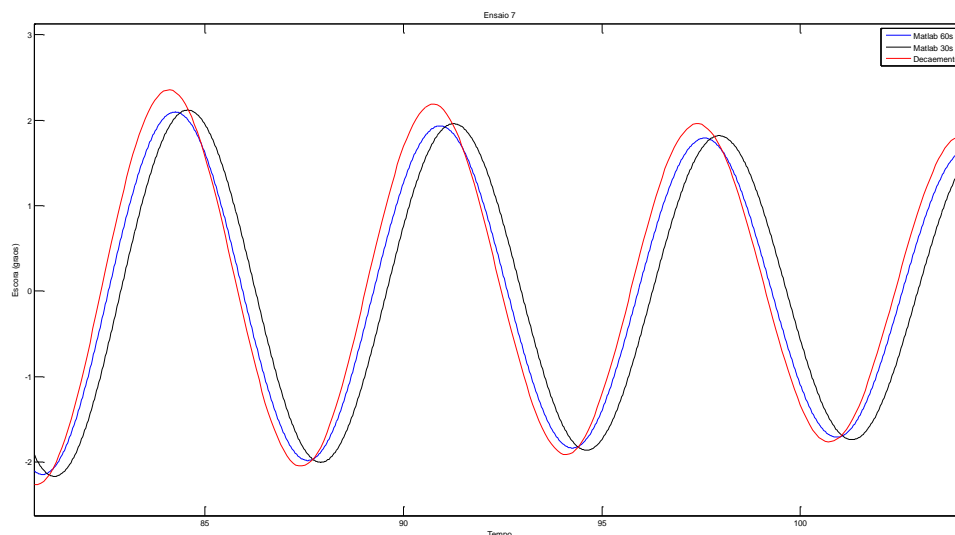


Figura 7.4. Zoom dos modelos matemáticos de decaemento.

B_{44a} [tm ² /s]	B_{44b} [tm ²]	Frecuencia natural do modelo [rad/s]	Frecuencia natural do buque real [rad/s]	Período do modelo [s]	Período do buque real [s]
6.8714	516.22	3.6458	0.941	1.7234	6.6748

Táboa 7.5. Resultados finais do ensaio de decaemento.

7.2 Proba de estabilidade.

7.2.1 Obtención de datos.

Esta proba levouse a cabo na canle de probas de estabilidade que se encontra anexa á Canle de Experiencias e realizouse antes que o ensaio de decaemento. A continuación describiremos como foi levada a cabo esta proba paso a paso tentando ser o máis concisos posibles en canto ao procedemento levado a cabo.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

O primeiro que se fixo foi colocar e axustar todos os compoñentes que se encontran dentro do modelo, que vimos xa na Figura 6.10, compoñentes que non se volverían a tocar ata o final de todos os ensaios, facendo deste xeito que a condición do buque fose sempre a mesma ao longo de todos os ensaios. Só houbo unha excepción con respecto a non tocar ningún dos compoñentes e é que a IMU necesitábase cambiala con frecuencia para poder recargarlle a batería.

Unha vez tíñamos o modelo con todos os seus elementos colocados, cerramos a cuberta mediante unha lámina de metacrilato e unha serie de parafusos. Despois disto procedemos ao pesado do modelo, obtendo un peso de 54.81 kg. Este peso será o que determine a nosa condición de carga xa que debe ser a partir do modelo que realmente temos de onde extrapolamos á escala real, e así obteñamos as dimensións reais do buque.

Deste xeito, e como o peso vai co cubo da escala, que como xa mencionamos é 15, o desprazamento real do noso buque será de 184.984 toneladas.

A continuación, o seguinte foi tomar as dimensións dos dous pesos que utilizamos na proba de estabilidade e tamén do clinómetro usado para medir a escora do buque. A continuación anéxanse os datos recollidos destes tres elementos.

PESO 1	X	Y	Z
DIMENSIONES (cm)	10	4,95	0,9
G (cm)	5	2,475	0,45
PESO (g)	540		

PESO 2	X	Y	Z
DIMENSIONES (cm)	10	4,95	0,9
G (cm)	5	2,475	0,45
PESO (g)	540		

CLINÓMETRO	X	Y	Z
DIMENSIONES (cm)	2,5	17,4	6
G (cm)	1,25	9,2	2,5
PESO (g)	345		

Táboa 7.6. Dimensión e pesos dos elementos utilizados na proba de estabilidade.

Unha vez temos todos os datos que nos fan falta tomados, pasaremos a realizar o ensaio. No noso caso decidimos facer un primeiro ensaio movendo un só peso, como se mostra na imaxe a continuación, e outro ensaio movendo os dous pesos.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González



Figura 7.5. Modelo durante a proba de estabilidade.

En cada un dos dous casos tomáronse as seguintes medicións.

CON 1 PESO		
Distancia a cruxía (cm)	Escora clinómetro peso a babor (graos)	Escora clinómetro peso a estribor (graos)
0	0,25	0,25
2	-0,15	0,65
4	-0,55	1
6	-0,9	1,45
8	-1,25	1,8
10	-1,6	2,2
12	-2	2,6
14	-2,3	2,95
16	-2,65	3,3

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

CON 2 PESOS		
Distancia a cruxía (cm)	Escora clinómetro peso a babor (°)	Escora clinómetro peso a estribor (°)
0	0,25	0,25
2	-0,6	1,1
4	-1,35	1,9
6	-2,1	2,65
8	-2,9	3,4
10	-3,6	4,2
12	-4,4	5
14	-5,2	5,7
16	-5,8	6,5

Táboa 7.7. Ángulos de escora obtidos na proba de estabilidade.

7.2.2 Procesado dos datos.

Unha vez rematamos a proba de estabilidade e temos os datos que nos interesaban o seguinte paso será levar a cabo os cálculos para obter a altura metacéntrica transversal (GM) da nosa condición de carga. O primeiro que fixemos foi obter a escora relativa, é dicir, a escora respecto da posición estable sen pesos. A continuación fixemos as medias das escoras a babor e a estribor para un mesmo desprazamento do peso e obtivemos o seguinte:

Distancia a cruxía (cm)	CON 1 PESO			CON 2 PESOS		
	Escora relativa a babor	Escora relativa a estribor	Escora media	Escora relativa a babor	Escora relativa a estribor	Escora media
2	0.4	0.4	0.4	0.85	0.85	0.85
4	0.8	0.75	0.775	1.6	1.65	1.625
6	1.15	1.2	1.175	2.35	2.4	2.375
8	1.5	1.55	1.525	3.15	3.15	3.15
10	1.85	1.95	1.9	3.85	3.95	3.9
12	2.25	2.35	2.3	4.65	4.75	4.7
14	2.55	2.7	2.625	5.45	5.45	5.45
16	2.9	3.05	2.975	6.05	6.25	6.15

Táboa 7.8. Escoras relativas e escora media.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

A continuación pasaremos esta escora media a radiáns e poderemos xa calcular o GM do modelo, mediante a seguinte fórmula, para cada unha das distancias que se desprazou o peso ou pesos.

$$GM = \frac{p \cdot d}{\Delta \cdot \tan(\phi)} \quad (7.13)$$

Sendo:

- p: o peso desprazado [Kg]
- d: a distancia que se despraza o peso anterior [m]
- Δ: o desprazamento do buque co peso e o clinómetro [Kg]
- Φ: o ángulo de escora [rad]

Unha vez temos os distintos GM do modelo para cada unha das distancias poderemos calcular o GM real multiplicando o do modelo pola escala, que neste caso é 15.

A continuación poderemos calcular o KG do buque real restándolle o GM ao KM. Este último obterémolo do módulo *Stability* do programa *Maxsurf* para a condición de carga correspondente que se mostran na Figura 7.6 e na Figura 7.7.

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	184,984	184,984			10,975	0,000	3,263	0,000	User Spec
2	Total Loadc			184,984	0,000	0,000	10,975	0,000	3,263	0,000	
3	FS correctio								0,000		
4	VCG fluid								3,263		

Figura 7.6. Condición de carga utilizada para o cálculo no *Stability*.

1	Draft Amidships m	2,507
2	Displacement t	185,0
3	Heel deg	0,0
4	Draft at FP m	2,507
5	Draft at AP m	2,507
6	Draft at LCF m	2,507
7	Trim (+ve by stern) m	0,000
8	WL Length m	22,733
9	Beam max extents on WL m	6,824
10	Wetted Area m^2	171,39
11	Waterpl. Area m^2	124,80
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,636
13	Block coeff. (Cb)	0,427
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,745
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,805
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,975
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	10,175
18	KB m	1,580
19	KG fluid m	3,263
20	BMT m	2,129
21	BML m	21,363
22	GMt corrected m	0,446
23	GML m	19,679
24	KMt m	3,709
25	KML m	22,942
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,248
27	MTc tonne.m	1,648
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	1,440
29	Max deck inclination deg	0,0000
30	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000

Figura 7.7. Valores do equilibrio hidrostático no *Stability*.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Na seguinte táboa móstranse unha serie de valores necesarios para os cálculos tanto con un peso como con dous, entre eles os KM mencionados.

	1 PESO	2 PESOS	
Pesos totais do modelo	0.885	1.425	Kg
Pesos totais reais	2986.875	4809.375	Kg
Pesos desprazados modelo	0.54	1.080	Kg
Pesos desprazados reais	1822.5	3645	Kg
Manga do modelo	457.333		mm
Escala	15		
Desprazamento do modelo sen pesos	54.81		Kg
Desprazamento do modelo na experiencia	55.695	56.235	Kg
Desprazamento real sen pesos	184.984		t
Desprazamento real con pesos	187.970	189.793	t
KMt con pesos	3.711	3.713	m
KMt sen pesos	3.709		m
Puntal do modelo	0.28		m
Altura do metacrilato	0.007		m
KG dos pesos no modelo	0.299	0.296	m
KG dos pesos real	4.492	4.447	m

Táboa 7.9. Táboa de datos para o cálculo da experiencia de estabilidade.

Agora que xa temos o KG do buque cos pesos o seguinte paso será retirar os pesos para obter o KG real do buque. Para iso elaboraremos a seguinte táboa a partir da cal desdixaremos o valor do KG do buque:

Δ real con pesos	KG real con pesos	$(\Delta \text{ real con pesos}) \cdot (\text{KG real con pesos})$
-Pesos totais reais	KG dos pesos real	$(-\text{Pesos totais reais}) \cdot (\text{KG dos pesos real})$
Δ real sen pesos	KG real sen pesos	$(\Delta \text{ real sen pesos}) \cdot (\text{KG real sen pesos})$

Táboa 7.10. Táboa de cálculo do KG sen pesos.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Polo tanto, se despexamos o KG real sen pesos quedaramos que é:

$$KG \text{ sen pesos} = \frac{(\Delta \text{ con pesos}) \cdot (KG \text{ con pesos}) - (\text{Pesos totais}) \cdot (KG \text{ dos pesos})}{\Delta \text{ real sen pesos}} \quad (7.14)$$

Polo tanto, os resultados de KG finais son os seguintes:

Distancia a cruxía (cm)	KG real sen pesos (ensaio de 1 peso)	KG real sen pesos (ensaio de 2 pesos)
2	3.2750	3.2955
4	3.2614	3.2772
6	3.2661	3.2663
8	3.2543	3.2643
10	3.2529	3.2604
12	3.2568	3.2625
14	3.2471	3.2602
16	3.2434	3.2550

Táboa 7.11. Altura do centro de gravidade do buque para cada unha da distancias.

Por último, só nos queda obter o GM restándolle ao KMt obtido do *Stability* ao KG que acabamos de calcular. Os datos que obtemos finalmente son os seguintes:

Distancia a cruxía (cm)	GM real sen pesos (ensaio de 1 peso)	GM real sen pesos (ensaio de 2 pesos)
2	0.4340	0.4135
4	0.4476	0.4318
6	0.4429	0.4427
8	0.4547	0.4447
10	0.4561	0.4486
12	0.4522	0.4465
14	0.4619	0.4488
16	0.4656	0.4540

Táboa 7.12. GM do buque para cada unha da distancias.

7. Ensaio de decaemento e proba de estabilidade.

Pedro Ojea González

Xa para rematar, e como necesitamos un só valor de GM e un só valor de KG, realizouse unha media obtendo como valores finais de GM e KG os seguintes:

GM [m]	KG [m]
0.446	3.263

8 ENSAIOS CO MODELO MATEMÁTICO.

Como xa se expuxo nos apartados 3 e 5, levouse a cabo un desenrolo matemático xunto co seu posterior programado no software *MATLAB* de catro modelos distintos. A continuación tratarán de mostrarse os resultados de cada un deles.

Todas as variables necesarias para o programa matemático están xa calculadas pero falta por definir cales son as pendentes de onda e os ratios de frecuencias que utilizaremos.

As primeiras pendentes de ondas propostas foron as seis seguintes: 1/200, 1/100, 1/50, 1/30, 1/20 e 1/15. Estas pendentes de onda xunto coa frecuencia de onda dannos a altura da onda e o seu período xa que:

$$\lambda = \frac{T^2 \cdot g}{2\pi} \quad (8.1)$$

$$H = \lambda \cdot \alpha_w \quad (8.2)$$

Os ratios escollidos para o estudo foron entre 0.2 da frecuencia natural ata o dobre da frecuencia natural. Isto ten que ver con que a resonancia sempre se producirá no caso en que a frecuencia de onda e a frecuencia natural do buque coincidan, é dicir, cando o ratio sexa un. Polo tanto, coa elección feita queremos abarcar tamén as zonas próximas a ese punto de resonancia.

Á hora de decidir se estas eran ou non as pendentes e ratios axeitados decidimos comprobar cales destes posibles ensaios se poderían realizar na canle de experiencias tendo en conta as limitacións de altura de onda e de período da mesma así como que o paso entre o ratio de frecuencias sería de 0.1.

Ademais estableceuse un límite de escora do modelo para que non houbera a posibilidade de que este zozobrase dando lugar a unha posible inundación do mesmo que supuxese o estrago de moitos dos sistemas que leva a bordo. Os resultados móstranse a continuación:

8. Ensaio co modelo matemático.

Pedro Ojea González

	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1
1/200	Período	Período	Período	Período	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Altura
1/100	Período	Período	Período	Período	Altura	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/50	Período	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Posible	Posible	Posible
1/30	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Posible	Posible
1/20	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Posible
1/15	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Posible

	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
1/200	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura
1/100	Posible	Posible	Posible	Posible	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura
1/50	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/30	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/20	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/15	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible

Táboa 8.1. Ensaio posibles na canle coa primeira proposta de pendentes.

As celas en verde son as que se poden levar a cabo mentres que as brancas reflexan a limitación que impide a súa realización. Como podemos apreciar, nas pendentes máis grandes, 1/20 e 1/15, os ensaios que se poden realizar, tendo en conta as limitacións da canle, son só dende o ratio 1.1 ata 2, polo que obteríamos só unha das ramas da curva esperada. Por esta razón, decidiuse introducir unha nova pendente nunha zona na que puidésemos sacar valores a ambos lados do pico de resonancia que é o ratio 1. A escollida foi a pendente 1/75. Ao mesmo tempo eliminouse a frecuencia 1/15 por esixir valores de alturas moi altos e porque xa íamos obter unha curva de unha soa rama coa pendente 1/20.

Agora que xa temos definidas as pendentes e o rango de ratios de frecuencias só nos queda comentar que no caso dos ensaios co modelo imos a utilizar un paso moito máis pequeno, 0.01, para desta forma obter unhas curvas moito máis suaves.

Como xa se mencionaba no apartado 5, o que imos estudar será o réxime permanente e neste apartado comentábase que despois dalgunha proba establecíamos que a partir do segundo 500 o modelo encontrábase xa en réxime permanente. Agora que temos o modelo listo podemos levar a cabo un ensaio, neste caso será para a pendente de onda 1/50 e para o ratio de frecuencia 1, e corroborar a afirmación que realizábamos no devandito apartado. Neste caso imos a usar o modelo con GZ e o ángulo absoluto obtendo o seguinte resultado.

8. Ensaio co modelo matemático.

Pedro Ojea González

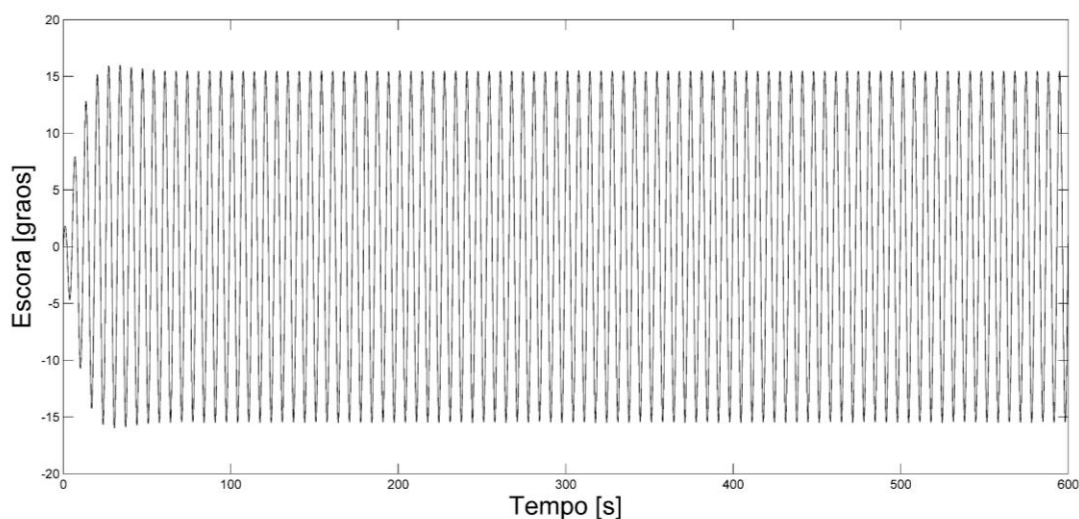


Figura 8.1. Ensaio de balance coa pendente 1/50 e o ratio de frecuencia 1.

Como podemos apreciar na figura anterior, ao comezo do ensaio prodúcese unha zona de réxime transitorio que ven seguida a continuación de unha de réxime permanente na que o balance mantén o seu máximo nun valor constante. Esta é a zona que a nós nos interesa estudar e que como podemos apreciar, tomar dende o segundo 500 ata o final é totalmente correcto para asegurarnos que estamos dentro do réxime permanente.

A continuación, e xa por último, quedaranos presentar os resultados de balances máximos en cada pendente de onda tal e como se explicou no apartado 5. Mostraremos os catro modelos xuntos para así poder comparalos. A continuación móstranse os resultados de cada pendente por separado:

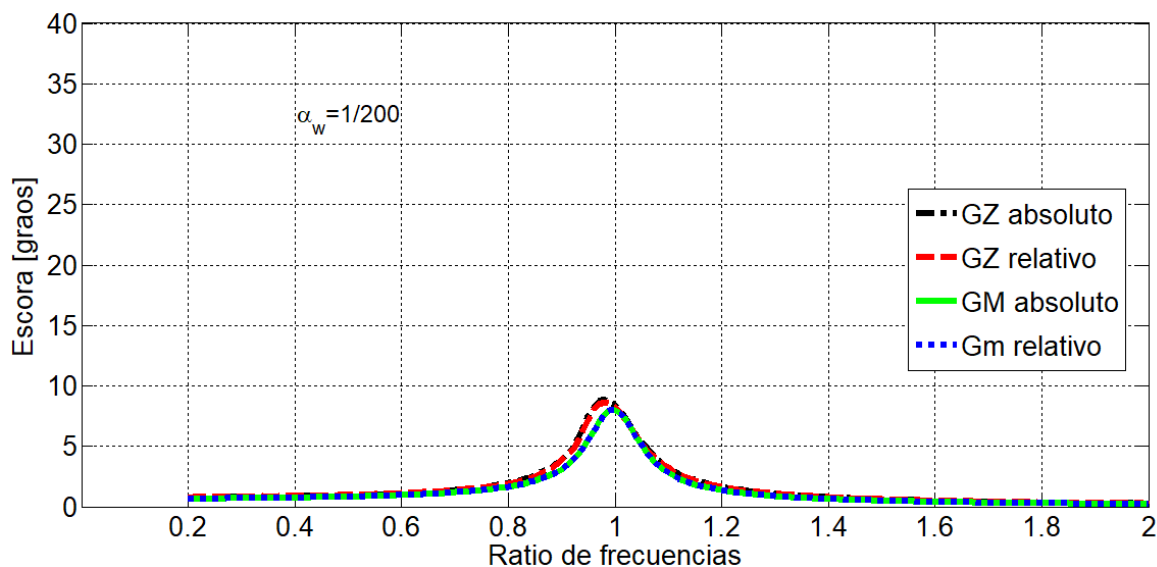


Figura 8.2. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/200.

8. Ensaio co modelo matemático.

Pedro Ojea González

Nesta primeira gráfica correspondente á pendente 1/200 vemos unha clara diferenza entre os modelos lineais, cuxo termo de restauración depende do GM, e os modelo non lineais, cuxo termo de restauración depende do GZ. Máis concretamente, os modelos non lineais reportan uns valores superiores aos dados polos modelos lineais. Ademais, entre o modelo relativo e o absoluto, vemos que no caso lineal, a diferenza é case inapreciable, encontrándose os dous case superpostos.

No caso do modelo non lineal vemos que a diferenza é algo maior pero aínda así é moi pequena. Igualmente, podemos dicir que o modelo co ángulo absoluto é lixeiramente superior ao modelo co ángulo relativo.

Por último mencionar que mentres que o modelo lineal ten o seu máximo no ratio 1, os máximos dos modelos non lineais parecen estar lixeiramente desprazados cara a esquerda fenómeno relacionado de forma directa coa non linearidade do termo de restauración.

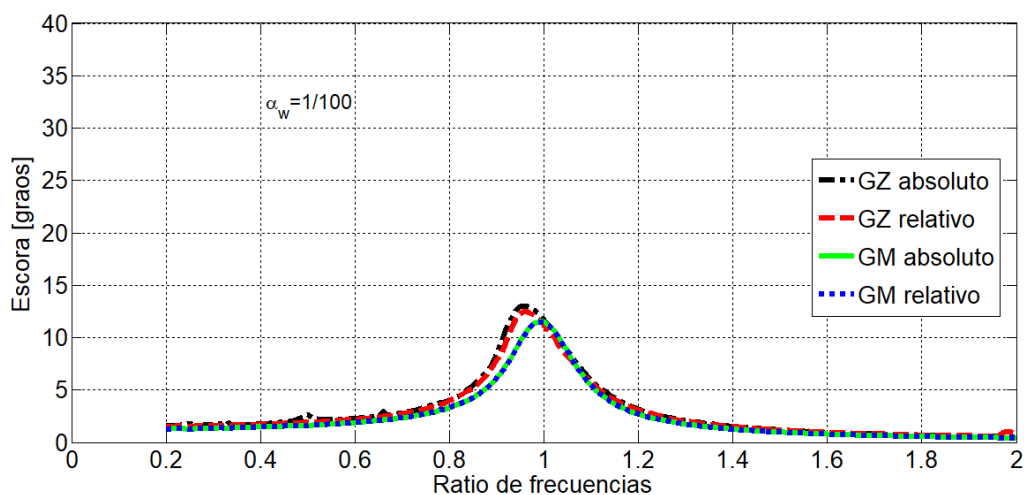


Figura 8.3. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/100.

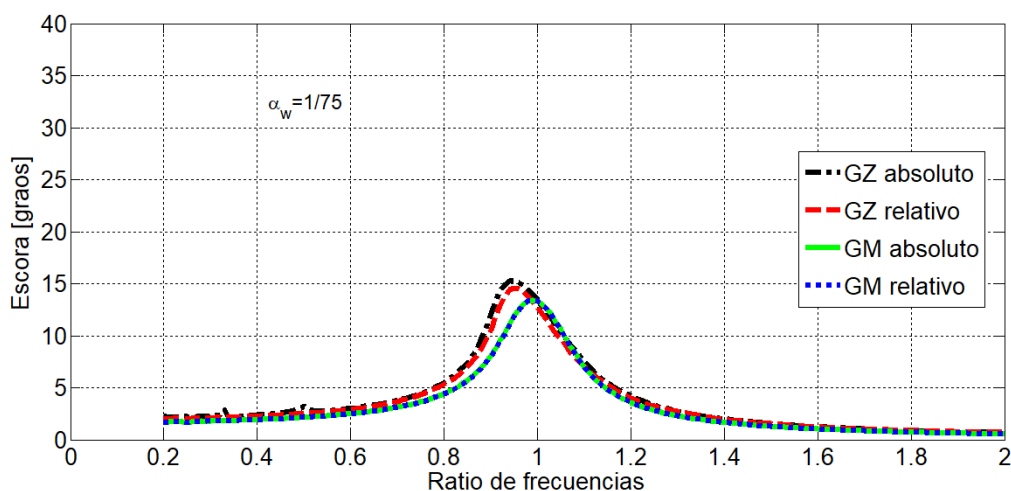


Figura 8.4. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/75.

8. Ensaio co modelo matemático.

Pedro Ojea González

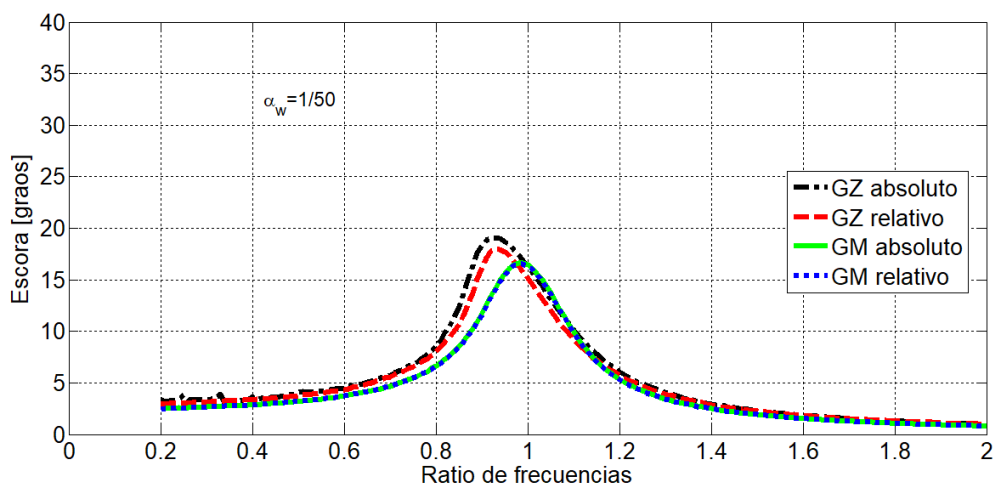


Figura 8.5. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/50.

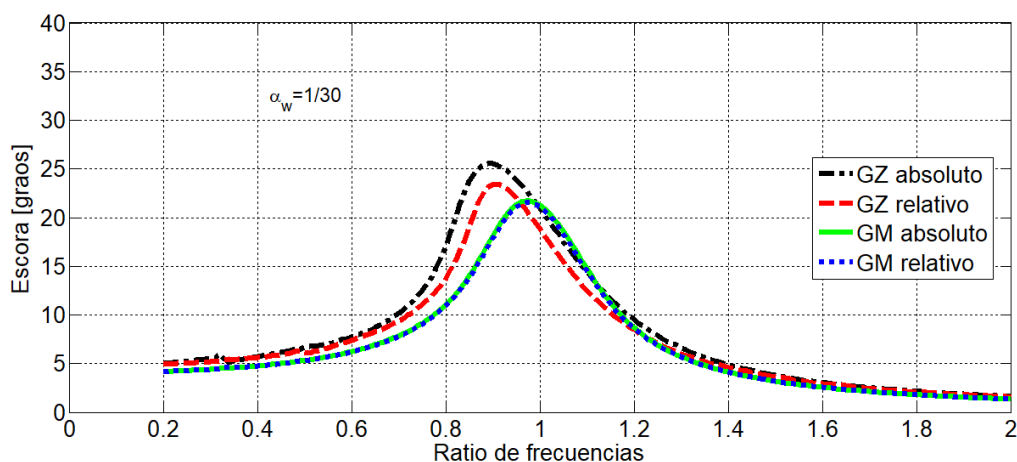


Figura 8.6. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/30.

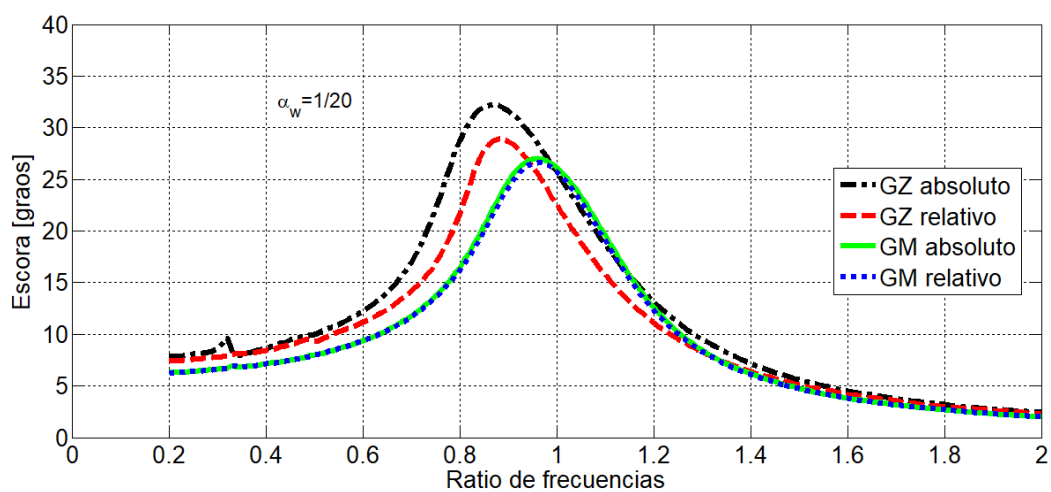


Figura 8.7. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/20.

8. Ensaio co modelo matemático.

Pedro Ojea González

Como se pode apreciar dende a Figura 8.2 ata a Figura 8.7 a medida que crece a pendente de onda coa que excitamos o buque o ángulo de escora aumenta, como cabía esperar. Igualmente, así que crece a pendente vemos que os modelos non lineais comezan a distinguirse mellor e tal e como dicíamos xa anteriormente, o modelo non lineal co ángulo absoluto (GZ absoluto) é o que maiores valores de escora reporta. Do mesmo xeito, os modelos lineais tamén se diferencian situándose tamén neste caso o modelo do ángulo absoluto por encima do modelo co ángulo relativo.

Podemos ver tamén, que o modelo lineal non mantén o seu pico máximo no ratio un, cousa que é debida ao amortecemento. E dicir, un sistema lineal amortecido non vai a moverse á frecuencia de resonancia senón a unha frecuencia amortecida, dependente do amortecemento, e que sempre será menor que a frecuencia natural, por esta razón o pico se despraza cara a esquerda.

Dun xeito similar, os picos dos modelos non lineais decaen tamén cara a esquerda, pero neste caso é debido a non linearidade do brazo adrizante GZ. Este fenómeno coñécese como softening GZ. O que ocorre é que como vemos na imaxe a continuación, as pendentes da curva de GZ son inferiores á pendente do orixe ou GM. Se fose ao revés e tivéssemos pendentes de GZ superiores as do GM teríamos o fenómeno coñecido como hardening GZ e neste caso os picos caerían cara a dereita.

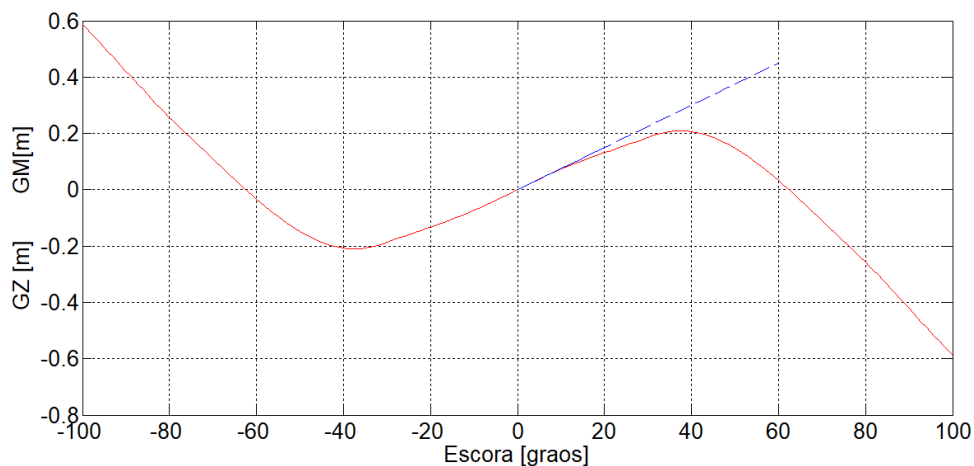


Figura 8.8. Curvas de GZ e GM.

O lado cara o que decaen explicase analizando a ecuación (3.21) e tendo en conta que poderíamos establecer un GM virtual calculado a partir do GZ en cada ángulo. Pensando desta forma, a frecuencia natural crece se o GZ é superior ao GM, xa que o GM correspondente ao GZ sería maior que o GM en cero e polo tanto o pico de máximo decaería cara ratios da frecuencia inicial maiores que un. No noso caso sucede totalmente o contrario, é dicir, o GM correspondente a cada GZ é menor que o GM inicial, polo tanto, o pico dos máximos decae cara ratios inferiores a un.

Debemos destacar tamén que nalgúns das imaxes dos modelos, no caso do GZ absoluto se ven uns pequenos picos na zona de ratio pequenos. Isto probablemente se deba a resonancias subharmónicas que neste caso non revisten especial importancia no estudo que estamos a realizar e non imos a estudar máis en profundidade. Este fenómeno explicase con máis detalle na seguinte referencia (Bulian and Francescutto, 2011).

9 ENSAIOS NA CANLE DE EXPERIENCIAS.

No apartado 6 xa se explicou cales eran as instalacións coas que contábamos para realizar os ensaios así como o modelo que íamos a utilizar. Neste apartado faremos unha descrición de como se levaron a cabo os ensaios, que datos se obtiveron, e cales foron os resultados obtidos deses datos.

9.1 Procedemento de recollida de datos.

Os datos recolléronse en 4 sesións os días 20,22 e 28 de decembro de 2017 e o 9 de xaneiro de 2018. Nestas sesións participaron o propio alumno que elabora este traballo así como Juan González Santomé que tamén debía realizar ensaios na canle para o seu Traballo Fin de Máster titulado Análise numérica e experimental da resonancia paramétrica dun buque de pesca. Dita colaboración foi recíproca.

Nestas sesións participaron tamén o titor deste traballo así como unha traballadora do Grupo Integrado de Ingeniería e experta na canle que nos explicou o funcionamento de todos os programas que necesitábamos e dos que se falou no apartado 6.2.

Agora imos a pasar a detallar a mecánica que se debía repetir en cada unha das sesións. O primeiro era sempre facer un self-test no programa Awasy6 para calibrar o xerador de ondas. Despois de realizar este primeiro test procedíase a xerar unha serie de ondas para mover a auga e eliminar a estratificación que provocaba estar bastante tempo sen moverse a auga.

Mentres se agardaba a que a auga se calmase colocábase o ordenador do carro no seu sitio, colocábase o foco, colocábase a sonda no seu soporte e conectábanse os cables correspondentes para levar a información dende a sonda ata o ordenador, ademais conectábase co cargador das IMU con ambas conectadas á espera de que se puxese o modelo na canle e se lle colocase unha delas.

Unha vez a auga se calmaba realizábase un segundo self-test. De novo, mentres se esperaba que a auga se calmase sacábase o modelo do almacén e colocábase nas cinchas para poder levantalo coa grúa e colocalo na canle. Neste momento levábase sen a prancha central de metacrilato xa que faltaba por colocar a IMU. Unha vez temos o modelo xa cerca do que será a súa situación final colocamos a IMU, activámola, poñemos a tapa de metacrilato e colocamos o modelo como vemos na seguinte figura.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

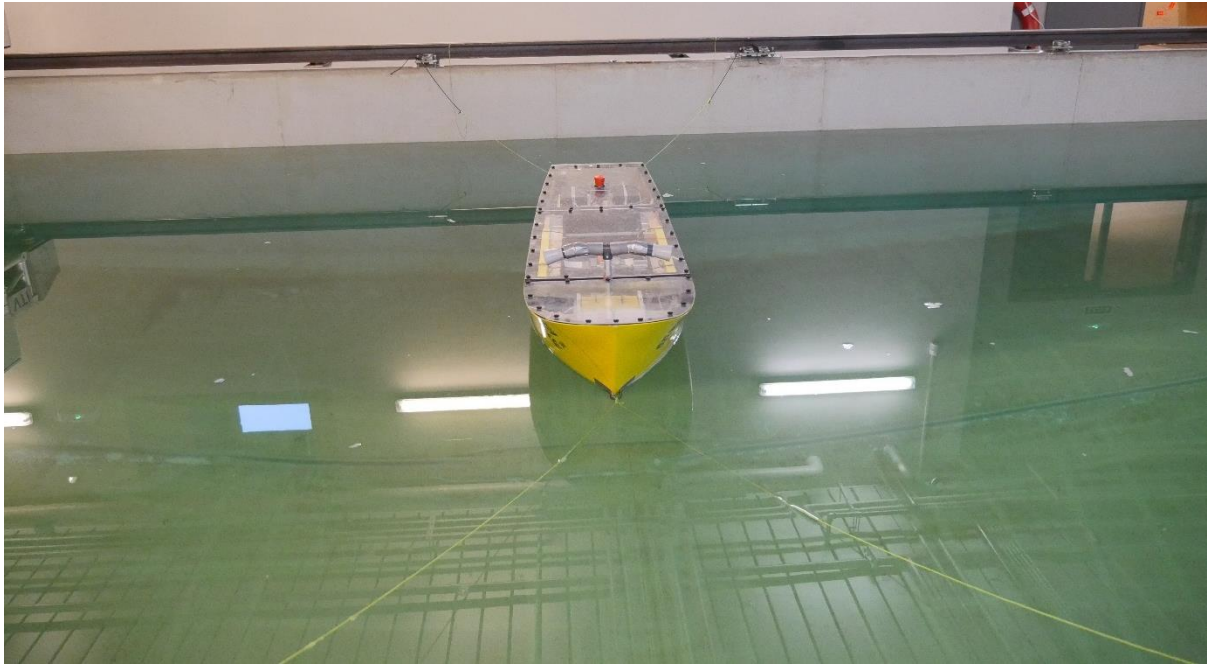


Figura 9.1. Modelo colocado na posición na que se realizan os ensaios.

Como vemos na imaxe, o modelo encóntrase posto de forma transversal ao canal, de xeito que poida recibir as ondas de costado e amarrado por 4 cabos para poder manter a posición.

Estes catro cabos teñen nos seus extremos un tramo de goma que fará de amortecedora para que no caso de ter que actuar os cabos non se produzan tiróns que poidan repercutir na realidade dos datos tomados.

Unha vez teñamos a auga en calma de novo teremos que realizar o calibrado da sonda. Unha vez levados a cabo todos estes pasos poderemos comezar a realizar os ensaios. Debemos ter en conta que cada 2 horas aproximadamente deberemos soltar os cabos de popa para cambiar a IMU xa que se lle esgota a batería.

Agora que xa temos todo listo, os ensaios lévanse a cabo da seguinte forma. Un dos alumnos introduce o período e a altura de onda no programa Awasy6 do xerador de ondas e comeza a xeración. O segundo alumno arranca as gravacións tanto da sonda como da IMU así como inicia a gravación das cámaras, se non estivesen o titor ou a experta da canle para axudar. Unha vez se ve que as ondas rebotaron xa na praia e están chegando de novo ao modelo córtanse as gravacións. Ademais, como é lóxico, detense a xeración de ondas e actívase o amortecemento do xerador de ondas que permite reducir o tempo de espera xa que axuda a que a auga se calme máis rapidamente.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

9.2 Adquisición de datos.

Como xa se explicou no apartado 8 as pendentes de onda finalmente escollidas foron 1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30 e 1/20. Ademais o rango de ratios de frecuencias como dixemos tamén nese apartado será de 0.2 a 2 con paso de 0.1. Con estas consideracións teremos que probar cales desas posibles combinacións se poden levar a cabo na canle tendo en conta as limitacións explicadas no apartado 6.3 e tendo en conta que debemos por un límite ao balance do buque para que este non envorque e poidan danarse os sistemas que se encontran no seu interior.

Polo tanto, de novo ao igual que se fixo no apartado 8, probáronse cales destas posibilidades eran realizables obtendo os seguintes resultados:

	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1
1/200	Período	Período	Período	Período	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Altura
1/100	Período	Período	Período	Período	Altura	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/75	Período	Período	Período	Período	Altura	Altura	Posible	Posible	Posible	Posible
1/50	Período	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Posible	Posible	Posible
1/30	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Posible	Posible
1/20	Período	Período	Período	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Posible

	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
1/200	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura
1/100	Posible	Posible	Posible	Posible	Altura	Altura	Altura	Altura	Altura
1/75	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Altura	Altura	Altura
1/50	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/30	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible
1/20	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible

Táboa 9.1. Ensaio posibles e realizados na canle de experiencias.

Como se pode intuír os ensaios en verde son os que finalmente se realizaron mentres que os que aparecen en laranxa son os que se deixaron sen facer. Realizáronse un total de 34 ensaios xunto con un ensaio máis que se repetiu debido á gran diferenza entre a altura de onda que debía haber e a realmente xerada.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

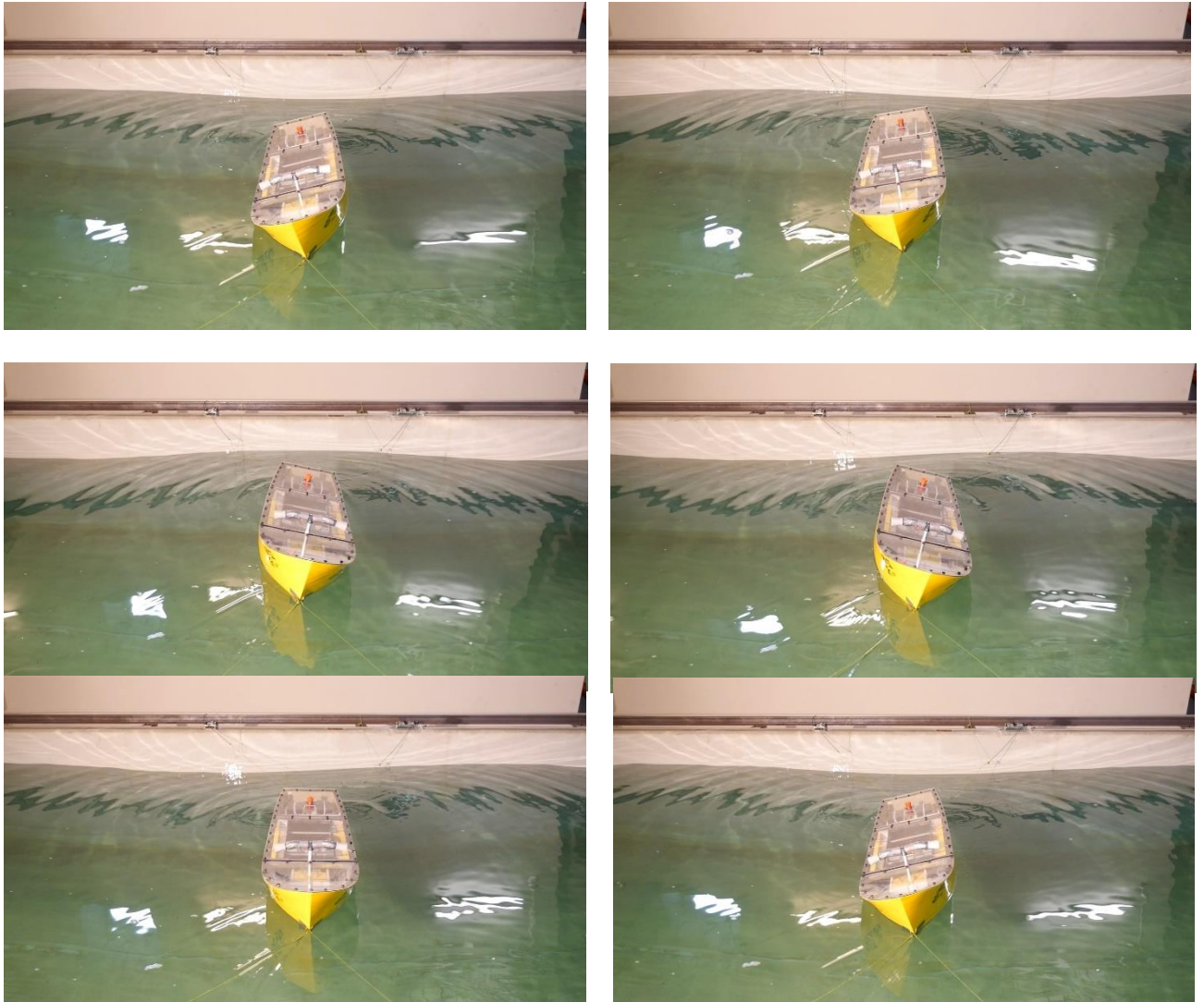


Figura 9.2. Representación dun ensaio. Orde de esquerda a dereita e de arriba a abaixo.

Na imaxe anterior móstrase como o buque se balancea fronte a acción das ondas que a pesar de non ser moi grandes crean un gran balance debido a que este caso é xusto o do ratio 1 para a pendente 1/50.

9.3 Procesado dos datos e resultados.

Unha vez se realizaron todos os ensaios é o momento de analizar os datos para poder sacar deles unhas gráficas semellantes ás que obtíñamos co modelo, é dicir, gráficas de balance máximo para cada unha das pendentes.

O primeiro que se fixo foi graficar os datos obtidos da IMU para poder ver que representaban eses datos e a partir de aí poder escoller ou filtrar os datos que a nós nos interese utilizar. A continuación vemos un exemplo do caso que estamos utilizando que é o da pendente 1/50 e o ratio de frecuencia 1.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

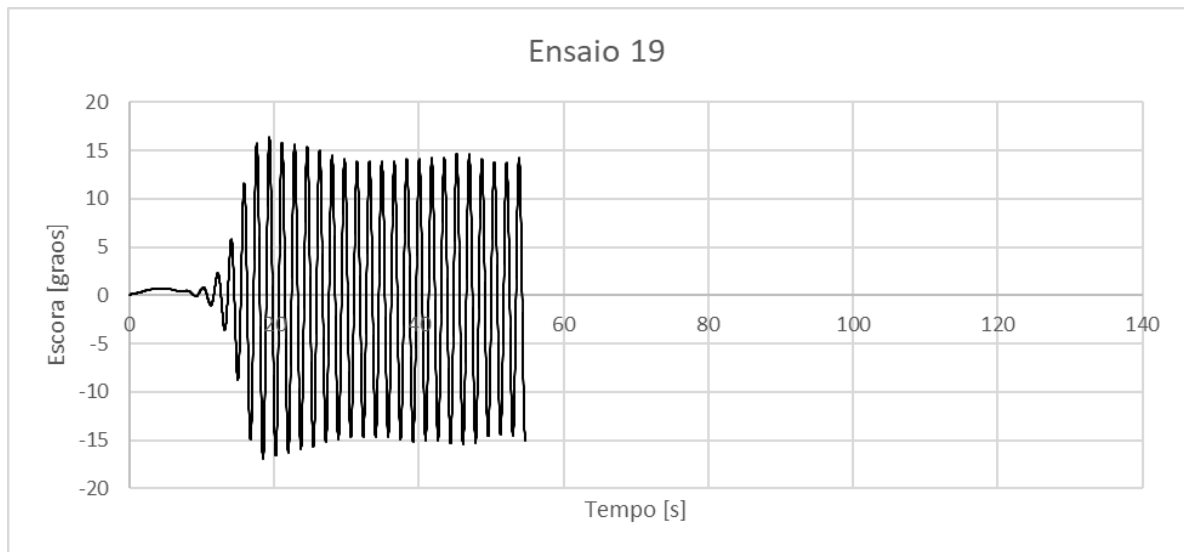


Figura 9.3. Datos obtidos da IMU no ensaio 19 (pendente 1/50 e ratio 1).

Como podemos apreciar na figura anterior, ao comezo do ensaio hai un tramo de case 10 segundos que é o tramo dende que se puxo a gravar ata que as ondas comezaron a chegar ao modelo. A continuación vemos a zona de réxime transitorio que provoca unha gran escora superior a 15 graos pero que despois diminúe e comeza o réxime permanente un pouco por debaixo dos 15 graos, con algunha variación pero relativamente estable. A continuación inclúense algúns outros exemplos onde se ve claramente a diferenza entre o réxime transitorio e o réxime permanente.

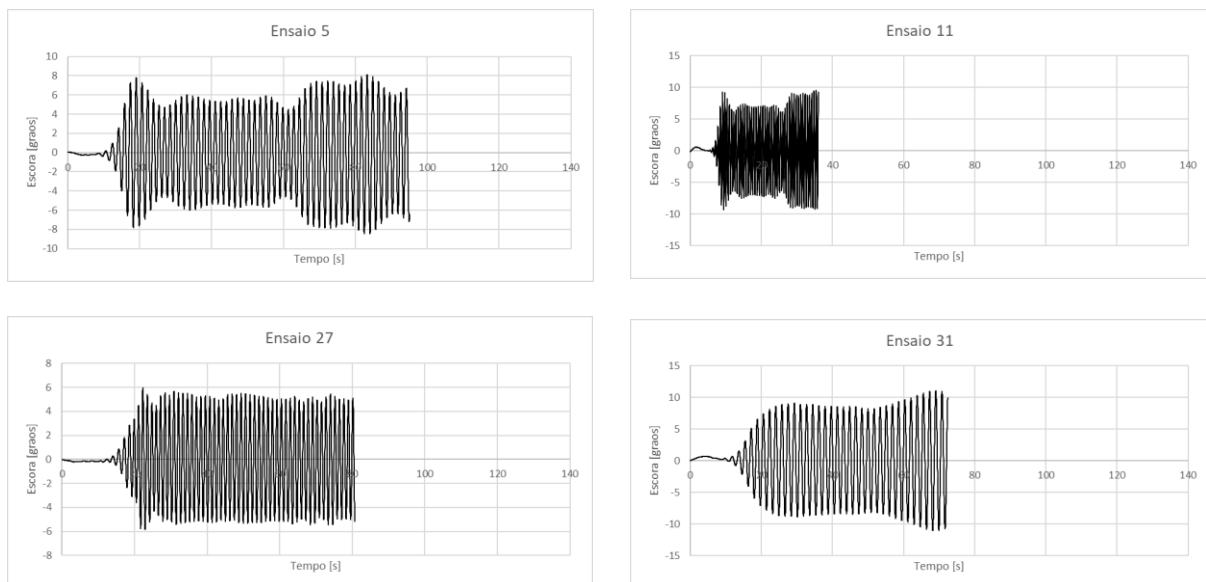


Figura 9.4. Exemplos dos datos obtidos pola IMU nos ensaios.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

Nalgún destes exemplos, como no 5 ou no 11 máis claramente, podemos apreciar catro zonas moi ben diferenciadas: a primeira sería o inicio sen balance, despois o réxime transitorio, despois o réxime permanente e por último unha nova excitación que provoca o fin do réxime permanente que non é máis que as ondas que chegan de novo ao modelo despois de rebotar na praia. De todos os datos recollidos, o que a nós nos vai a interesar serán unicamente os datos dos réximes permanentes.

Antes de escoller eses valores, e dado que moitos dos datos dos ensaios non están centrados en cero imos a facer a media de cada un deles e restarlla, pero antes disto eliminaremos os datos do inicio, previos ao comezo do balance, deixando deste modo os datos centrados en cero.

Por último quedaranos escoller os datos do réxime permanente. Para iso analizaremos gráfica a gráfica para determinar cal é o rango no que este réxime se mantén. Deste xeito teremos xa os datos que nos interesan para poder buscar os balances máximos en cada un dos ensaios.

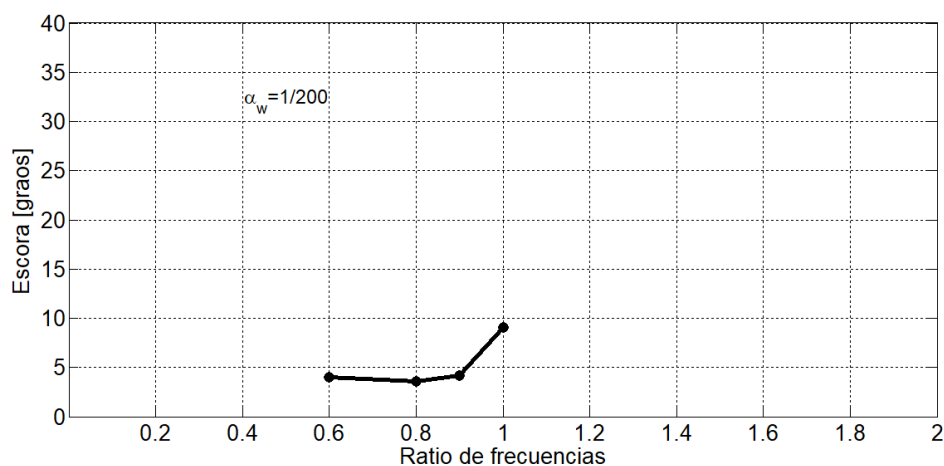


Figura 9.5. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/200.

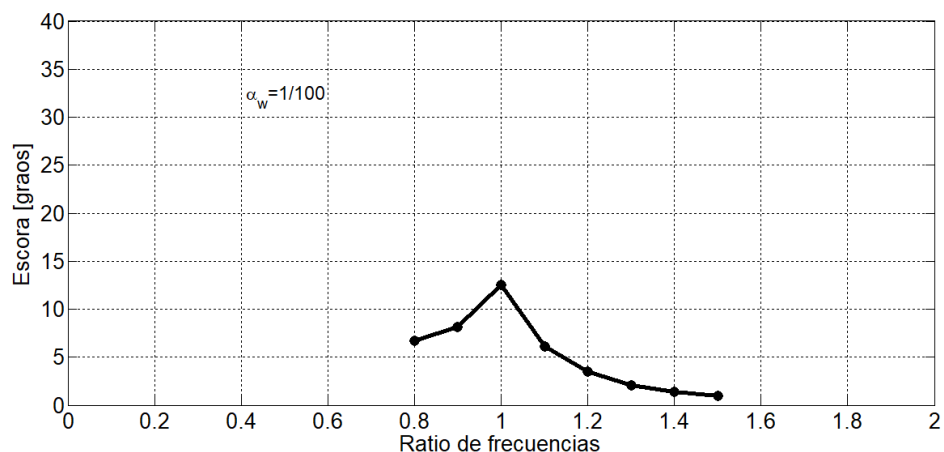


Figura 9.6 Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/100.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

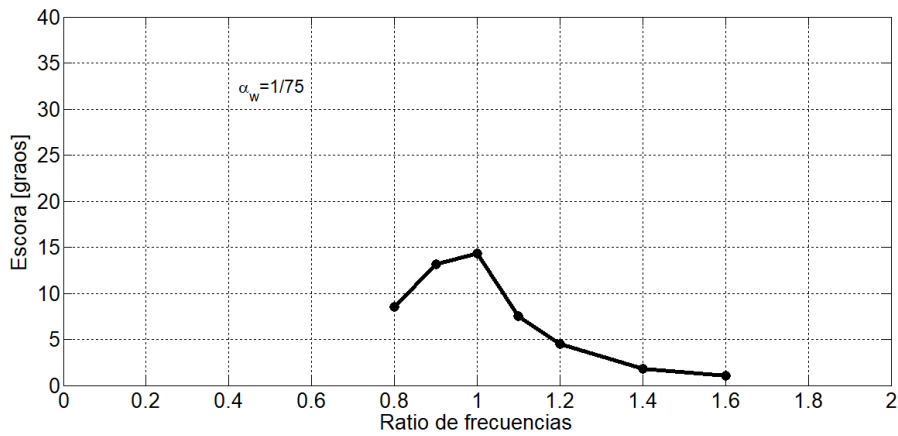


Figura 9.7. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/75.

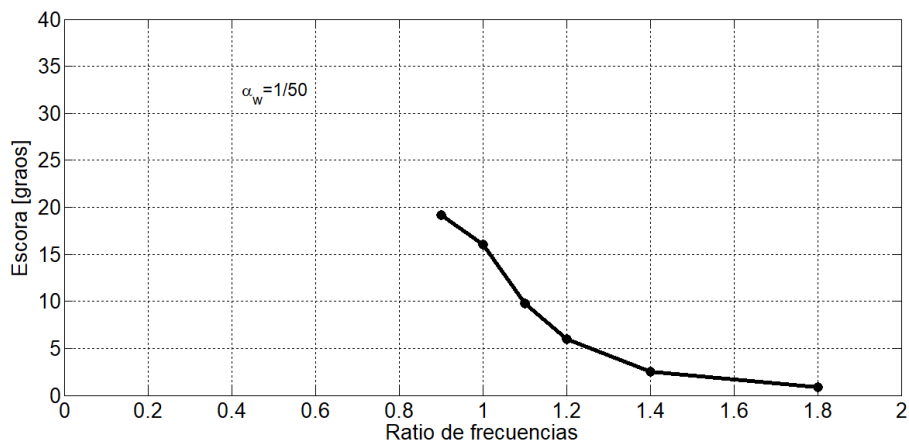


Figura 9.8. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/50.

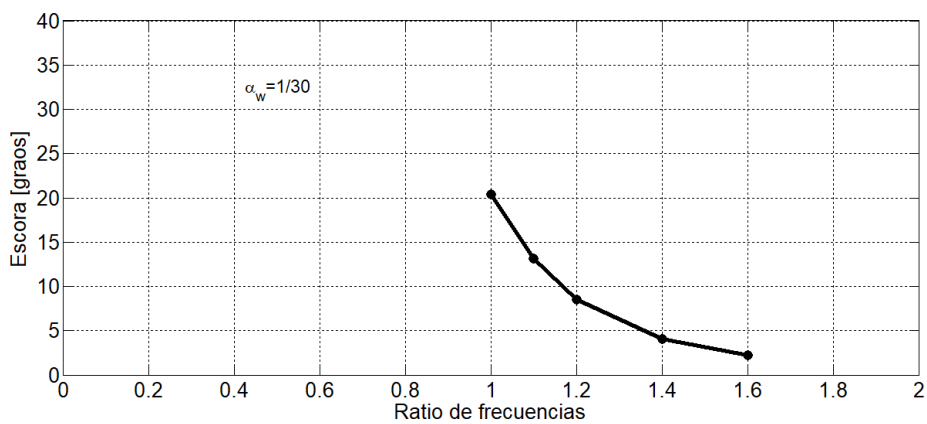


Figura 9.9. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/30.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

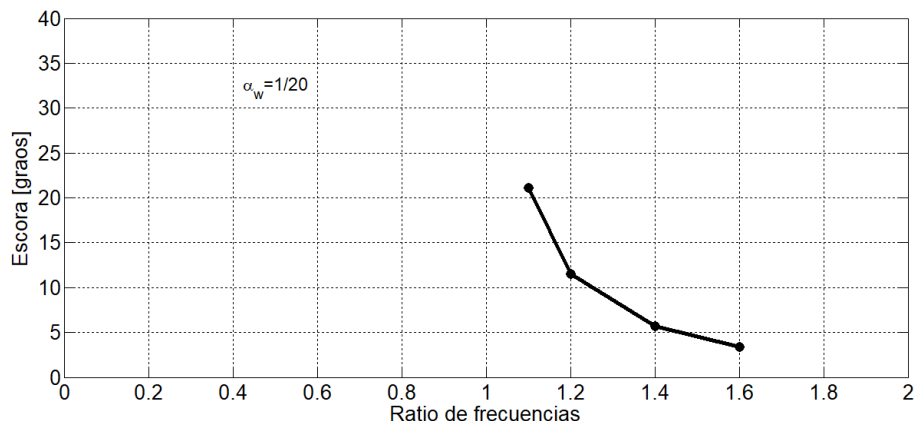


Figura 9.10. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/20.

Na gráficas anteriores móstranse os resultados de balances máximos obtidos. Para calculalos utilizamos a función $f_findextr$ (Bulian, 2014) que nos devolve os valores dos máximos e mínimos de cada período. Unha vez temos todos os máximos e mínimos un ensaios podemos determinar cal é o maior de todos eles, obtendo así os puntos que se mostran nas gráficas.

Debemos resaltar que os datos obtidos presentan un porcentaxe de erro con respecto á pendente que lles corresponde. Este erro, mostrado nas táboas da Táboa 9.2 ata a Táboa 9.7, representa a diferenza de pendente entre as pendentes que se escolleron e as pendentes calculadas a partir dos datos proporcionados polas medidas da sonda.

Pendente	1/200 (0.005)			
	1	0.9	0.8	0.6
Ratio frecuencia	1	0.9	0.8	0.6
Altura	0.0232	0.0286	0.0363	0.0644
Período	1.7240	1.9156	2.1550	2.8730
Altura da sonda	0.0240	0.0346	0.0340	0.0460
Período da sonda	1.7220	1.9230	2.1440	2.8610
Lambda real	4.6297	5.7736	7.1769	12.7798
Pendente real	0.0052	0.0060	0.0047	0.0036
Erro pendente	4%	20%	5%	28%

Táboa 9.2. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/200.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

Pendente	1/100 (0.01)							
Ratio frecuencia	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	0.8
Altura	0.0206	0.0237	0.0274	0.0322	0.0383	0.0464	0.0573	0.0725
Período	1.1490	1.2310	1.3260	1.4360	1.5167	1.7230	1.9150	2.1550
Altura da sonda	0.0212	0.0302	0.0276	0.0334	0.0400	0.0468	0.0524	0.0732
Período da sonda	1.1490	1.2310	1.3250	1.4340	1.5680	1.7230	1.9170	2.1450
Lambda real	2.0612	2.3659	2.7411	3.2106	3.8387	4.6351	5.7376	7.1836
Pendente real	0.0103	0.0128	0.0101	0.0104	0.0104	0.0101	0.0091	0.0102
Erro pendente	3%	28%	1%	4%	4%	1%	9%	2%

Táboa 9.3. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/100.

Pendente	1/75 (0.013333)						
Ratio frecuencia	1.6	1.4	1.2	1.1	1	0.9	0.8
Altura	0.0242	0.0315	0.0429	0.0511	0.0618	0.0763	0.0967
Período	1.0770	1.2310	1.4360	1.5660	1.7230	1.9150	2.1550
Altura da sonda	0.0226	0.0328	0.0446	0.0542	0.0672	0.0714	0.0922
Período da sonda	1.0770	1.2310	1.4350	1.5680	1.7220	1.9200	2.1460
Lambda real	1.8110	2.3659	3.2151	3.8387	4.6297	5.7556	7.1903
Pendente real	0.0125	0.0139	0.0139	0.0141	0.0145	0.0124	0.0128
Erro pendente	6%	4%	4%	6%	9%	7%	4%

Táboa 9.4. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/75.

Pendente	1/50 (0.02)					
Ratio frecuencia	1.8	1.4	1.2	1.1	1	0.9
Altura	0.0286	0.0473	0.0644	0.0767	0.0928	0.1146
Período	0.9577	1.2314	1.4630	1.5673	1.7240	1.9155
Altura da sonda	0.0340	0.0488	0.0642	0.0800	0.0920	0.1134
Período da sonda	0.9568	1.2310	1.4370	1.5670	1.7230	1.9210
Lambda real	1.4293	2.3659	3.2241	3.8338	4.6351	5.7616
Pendente real	0.0238	0.0206	0.0199	0.0209	0.0198	0.0197
Erro pendente	19%	3%	0%	4%	1%	2%

Táboa 9.5. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/50.

9. Ensaio na Canle de Experiencias.

Pedro Ojea González

Pendente	1/30 (0.03333)				
Ratio frecuencia	1.6	1.4	1.2	1.1	1
Altura	0.0604	0.0789	0.1074	0.1278	0.1546
Período	1.0775	1.2314	1.4367	1.5673	1.7240
Altura da sonda	0.0588	0.0824	0.1024	0.1412	0.1540
Período da sonda	1.0770	1.2320	1.4360	1.5700	1.7240
Lambda real	1.8110	2.3698	3.2196	3.8485	4.6405
Pendente real	0.0325	0.0348	0.0318	0.0367	0.0332
Erro pendente	3%	4%	5%	10%	0%

Táboa 9.6. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/30.

Pendente	1/20 (0.05)			
Ratio frecuencia	1.6	1.4	1.2	1.1
Altura	0.0906	0.1184	0.1611	0.1917
Período	1.0775	1.2314	1.4367	1.5673
Altura da sonda	0.0880	0.1242	0.1740	0.1780
Período da sonda	1.0760	1.2320	1.4370	1.5680
Lambda real	1.8076	2.3698	3.2241	3.8387
Pendente real	0.0487	0.0524	0.0540	0.0464
Erro pendente	3%	5%	8%	7%

Táboa 9.7. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/20.

Como podemos ver a porcentaxe de erro, salvo en contadas excepcións non é moi grande e pode ser aceptable. Este erro deberíamos sumalo ao xa proporcionado pola IMU así como outros posibles erros durante o proceso de obtención dos datos para poder reflexar o erro total co que estas medidas se están proporcionando. Para a obtención destes datos seguiu-se un proceso similar ao levado a cabo para escoller os datos de réxime permanente da IMU. Primeiro elimináronse os datos previos a que as ondas chegaran á sonda, despois centráronse os datos restando a media dos mesmos e por último tomouse o tramo considerado de réxime permanente. Unha vez tiñamos identificados os datos que nos interesaban solo restaba facer a media dos máximos e mínimos para obter a altura media.

10 COMPARACIÓN DOS ENSAIOS.

A intención deste apartado é a de comparar os resultados obtidos do modelo matemático cos resultados obtidos dos ensaios e validar o modelo matemático proposto.

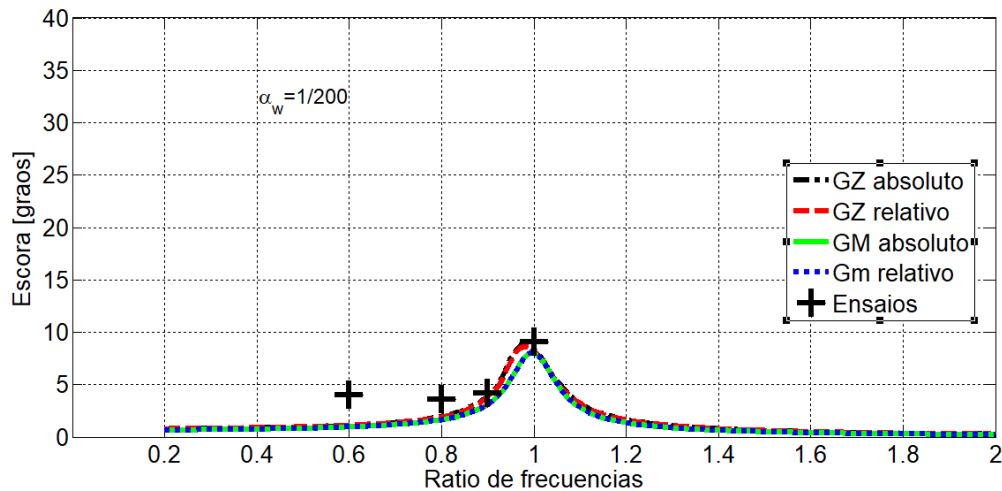


Figura 10.1. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/200.

Nesta primeira pendente, vemos que os puntos correspondentes aos ratios 1 e 0.9 aseméllanse bastante aos valores que os modelos non lineais reportan, mentres que os outros dous valores dos que dispomos, os ratios 0.8 e 0.6, distan xa dos modelos.

Se vemos a Táboa 9.2 podemos apreciar que o erro do ratio 0.6 é bastante alto, do que cabe concluír que os valores de máxima escora reportados non serán correctos para esta pendente e esta podería ser unha das causas desta discrepancia cos valores dados polos modelos.

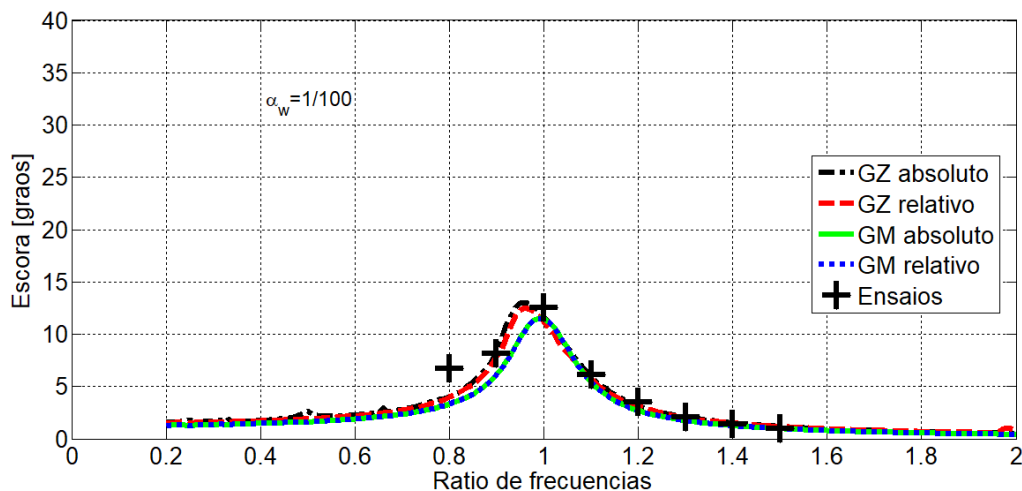


Figura 10.2. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/100.

10. Comparación dos ensaios.

Pedro Ojea González

Nesta segunda pendente, volvemos a ver como todos os puntos obtidos dos ensaios se asemellan aos valores obtidos dos modelos non lineais salvo no ratio 0.8 que volve a encontrarse por encima dos datos reportados polo modelo.

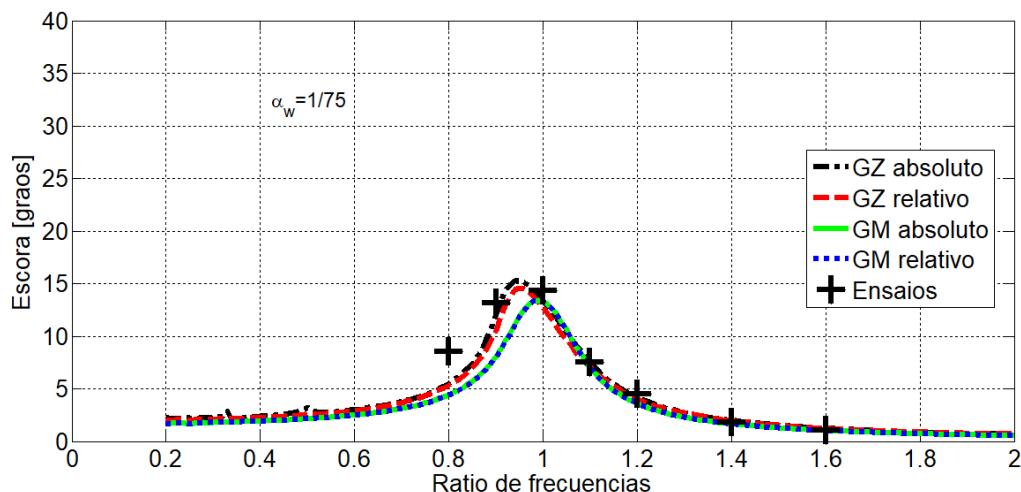


Figura 10.3. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/75.

No caso da pendente 1/75, vemos de novo que os resultados dos ensaios tenden a semellarse aos valores dos modelos non lineais, e incluso se podería dicir que se asemellan lixeiramente máis aos valores do modelo non lineal co ángulo absoluto (GZ absoluto). Unha vez máis temos un valor que se afasta do modelo no ratio 0.8 e o erro que podemos ver na Táboa 9.4 non é o suficientemente grande como para achacar esa diferenza ao erro na pendente. Antes esta situación, parece interesante que a posteriori se debería realizar unha serie de ensaios centrándose nesta zona na que parece que os modelo se quedan un pouco curtos.

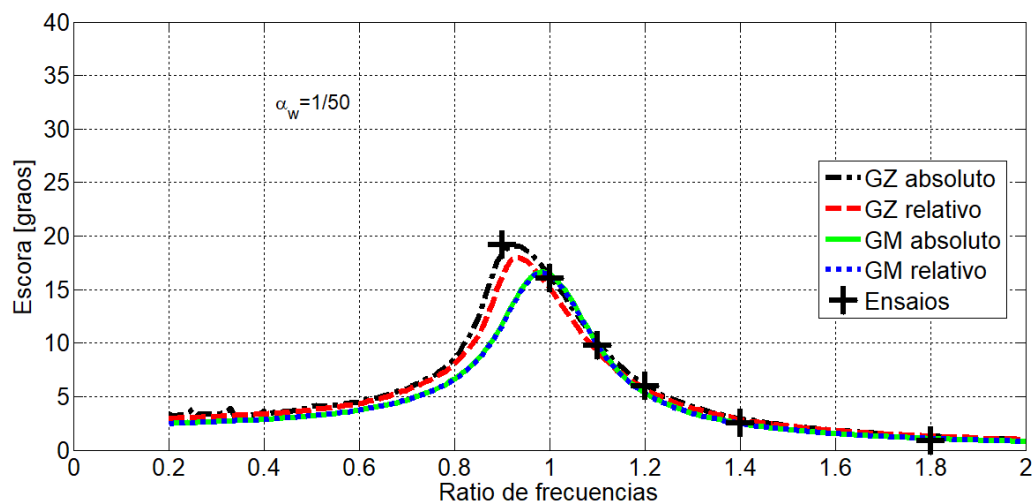


Figura 10.4. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/50.

10. Comparación dos ensaios.

Pedro Ojea González

Nesta cuarta pendente contamos xa con resultados dos ensaios só dunha das ramas da campá debido a imposibilidade de realizar os ensaios que xa explicamos en apartados anteriores.

De todas formas, os datos cos que contamos parecen estar en consonancia cos datos ofrecidos polos modelos non lineais, como xa ven pasando nas pendentes anteriores, e sobre todo co modelo non lineal do ángulo absoluto.

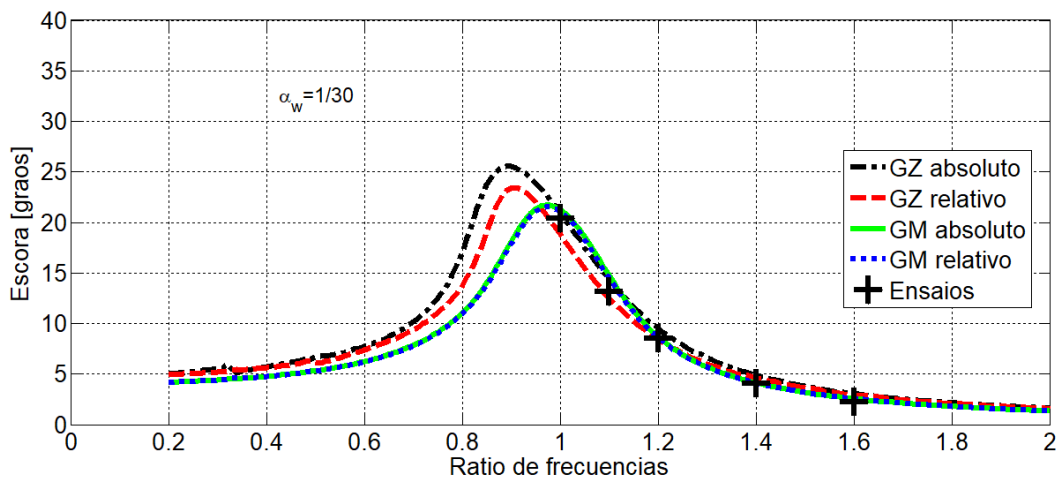


Figura 10.5. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/30.

Destá pendente podemos destacar que en xeral, os resultados obtidos dos ensaios encóntranse por debaixo dos datos reportados polo modelo non lineal co ángulo absoluto, cousa que ata este momento non estaba a suceder. Debemos pensar tamén que se vemos a Táboa 9.6 poderemos observar que os erros nas pendentes son relativamente grandes o que nos leva a intuír que esta posible diferenza ten moito que ver co erro asumido.

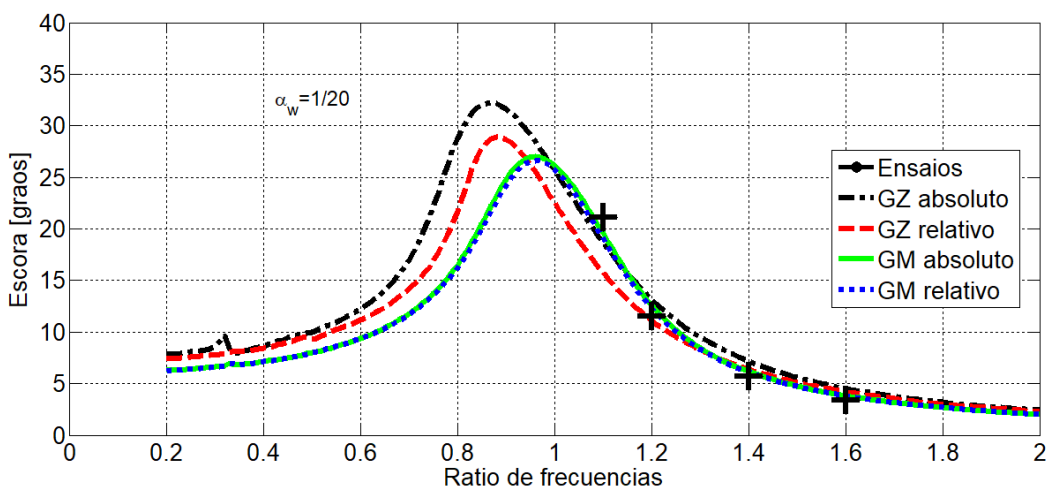


Figura 10.6. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/20.

10. Comparación dos ensaios.

Pedro Ojea González

Nesta última gráfica vemos que volve a suceder o que comentábamos na anterior, é dicir, que os valores dos ensaios se encontran por debaixo dos valores dados polo modelos non lineais, pero neste caso temos unha excepción, e é o punto do ratio 1,1. Ademais, neste caso é difícil intuír cal será a tendencia dos valores reais ao contar con tan poucos datos.

Por último, imos a elaborar unha gráfica que mostre a evolución dos valores dos picos para cada pendente dos 4 modelos e dos ensaios.

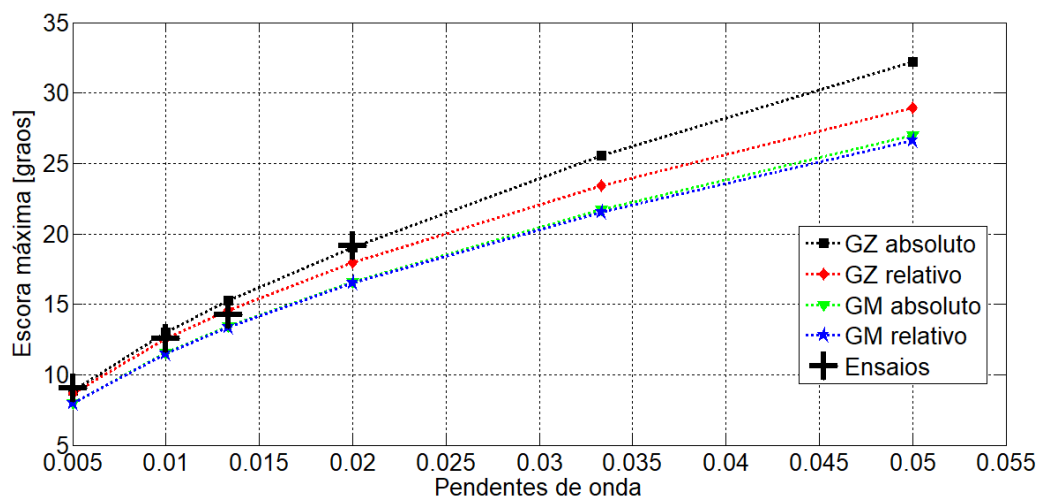


Figura 10.7. Gráfica de escoras máximas por cada pendente.

Como podemos apreciar, e como xa mencionamos anteriormente, a medida que a pendente de onda crece a escora máxima crece tamén. Como ven sucedendo ata agora, os datos reais obtidos dos ensaios seméllanse aos datos dos modelos non lineais, quedando os lineais un pouco curtos na predición da escora.

Como vemos na gráficas, no caso dos ensaios só hai valores para 4 das 6 pendentes e iso ten que ver con que nas dúas últimas pendentes, e como se pode ver na Figura 10.5 e na Figura 10.6, non puidemos levar a cabo os ensaios que nos darían os datos de escora máxima polo que non ten sentido incluír o dato máximo que temos deses ensaios xa que non correspondería cos datos mostrados polo modelos.

11 DISCUSIÓN.

Unha vez temos todos os datos, podemos pasar a debater a utilidade e ámbito de aplicación que finalmente pode ser o traballo levado a cabo. Primeiro de todo debemos dicir que este é só un estudo preliminar e que para obter uns resultados moito máis precisos deberíamos realizar unha campaña de ensaios moito máis longa e precisa onde obtivésemos moitos máis datos, é dicir, ensaiar moitas máis pendentes de onda e cun paso de ratio de frecuencias moito menor que nos dese unha maior definición na curva obtida.

Algo que sería moi interesante se se fose a aplicar a un buque real sería estudar a zona de traballo do buque para coñecer as condicións típicas do mar na zona na que navega para poder escoller o rango de pendentes e ratio de frecuencias que máis non interesan.

Unha vez dito isto, e cos datos que nós obtivemos, podemos afirmar que en xeral, os modelos non lineais reproducen de forma moi fiable os datos obtidos dos ensaios, mentres que os modelos lineais se quedan un pouco curtos na estimación do balance máximo en cada ratio, aínda que serían tamén aceptables. Dentro dos modelos non lineais o que mellor parece adaptarse aos datos obtidos dos ensaios é o modelo co ángulo absoluto e que adoita ser o máis amplamente utilizado (Bulian and Francescutto, 2011).

Debemos mencionar que a nosa análise experimental só nos permite asegurar o bo funcionamento do modelo por enriba do ratio 0.9 e ata o ratio 1.8 tal e como vemos que sucede na Figura 10.4. Isto débese ás limitacións que tivemos para realizar os ensaios na canle e que non nos permitiron chegar a realizar ensaios en outros ratios a excepción da pendente 1/200, coa que chegamos ata os valores de ratio 0.6 pero cos que non obtivemos valores moi exactos debido ao erro producido na xeración provocado, entre outras cousas, polas pequenas alturas coas que debíamos tratar. De todas formas, podemos dicir tamén que en xeral a tendencia que representan os puntos ensaiados parece seguir a tendencia que os modelos representan. Como xa dixemos, para comprobar isto bastaría con poder realizar ensaios nos ratios que nós non realizamos.

Ademais, nas pendentes máis grandes, 1/30 e 1/20, o rango de estudo foi aínda menor, indo dende 1 ou 1,1 ata 1.6. Neste dous casos parece que o modelo que mellor se aproxima é o non lineal co ángulo relativo xa que parece que o modelo co ángulo absoluto se coloca lixeiramente por encima dos datos obtidos.

Do mesmo xeito que ocorre co ratio, cos datos que nós obtivemos podemos validar os modelos para as pendentes que estudamos e por extrapolación para pendentes intermedias, pero non para pendentes inferiores ou superiores xa que estarían probablemente chegando a condicións máis extremas nas que a avaliación do modelo debería ser moi precisa.

Polo tanto, e como xa dicíamos anteriormente, de querer utilizar este modelo dun grao de liberdade para a súa inclusión nun sistema embarcado de axuda á tripulación de embarcacións de pesca, o que necesitamos é que o sistema que se desenrole sexa, como xa se mencionou neste traballo, sinxelo e económico.

11. Discusión.

Pedro Ojea González

Ademais, para elaborar este sistema necesitaremos obter as mesmas variables que obtivemos ao longo deste traballo do buque no que queiramos aplicalo como serían a masa engadida, a frecuencia natural, o GM e os distintos valores das hidrostáticas do equilibrio, etc. Para isto deberíamos seguir un proceso similar a levado a cabo neste TFM, é dicir, obter os coeficientes de masa engadida a partir dun programa de cálculo hidrodinámico e levar a cabo ensaios de decaemento, xunto coa proba de estabilidade. Só unha vez feito iso poderemos adaptar o modelo ao buque ao que se lle queira aplicar o sistema.

Deberemos realizar tamén un sistema que permita coñecer o estado da mar e polo tanto as ondas que están a excitar o buque en cada instante para poidamos ter unha excitación que incluír no noso modelo matemático.

12 CONCLUSIÓN.S.

Neste traballo levouse a cabo un estudo mediante o cal se compararon 4 modelos matemáticos distintos do balance dun buque de pesca con ondas de costado fronte aos valores extraídos de ensaios nunha canle de experiencias hidrodinámicas cun modelo a escala.

Para levar a cabo este proceso o primeiro que se fixo foi facer o desenrolo matemático a partir das ecuacións de movemento para máis adiante centrarnos unicamente na ecuación de balance desacoplada do resto de movementos. Servíndonos de informacións que xa desenrolaron modelos similares previamente conseguimos finalmente as ecuacións para os 4 modelos que nos interesaban, dous modelo lineais e outros dous non lineais, un baseado no ángulo absoluto de escora do buque e outro baseado no ángulo relativo entre a escora do buque e a pendente efectiva da onda excitadora.

Á hora de escoller o buque, varios factores cobraron importancia, pero a existencia dun modelo a escala co que poder realizar os ensaios foi o determinante, facendo que o buque escollido fose un antigo arrastreiro británico.

A continuación elaboramos un programa no software *MATLAB* que permitía a resolución da ecuación diferencial que determinaba o movemento. Neste punto debemos calcular as variables dependentes do buque como o amortecemento, a frecuencia natural, o GM, etc.

Principalmente facémolo a través de programas informáticos, no caso da masa engadida e a través de ensaios na canle para os demais casos. Máis concretamente, realizamos un ensaio de decaemento e unha proba de estabilidade. Unha vez tratados os datos obtidos dos ensaios puidemos extraer os valores finais que nos interesaban.

Unha vez contábamos con todos os datos necesarios puidemos xa correr o programa e obter as solucións dos catro modelos. Como xa se analizou no apartado correspondente, os modelos non lineais reportaban uns valores lixeiramente superiores aos modelos lineais. Ademais, mentres que os modelos lineais eran practicamente semellantes, os modelos non lineais diferenciábanse un pouco máis sendo o modelo do ángulo absoluto o que reportaba as maiores escoras.

Outro fenómeno destacable encontrado foi o do softening GZ que facía desprazar o pico de resonancia cara ratios inferiores ao ratio da frecuencia de resonancia e ao igual que pasaba con outros parámetros, este fenómeno incrementábase así que a pendente de onda era maior.

A continuación, realizouse unha campaña de ensaios na canle de experiencias hidrodinámicas da Universidade da Coruña situada no Centro de Investigacións Tecnolóxicas do Campus de Esteiro, Ferrol. Nesta campaña realizáronse un total de 34 ensaios repartidos entre 6 pendentes de onda. Deses ensaios extraéronse os datos necesarios para comparalos cos modelos previamente elaborados. Antes desta campaña de ensaios levouse a cabo unha campaña de ensaios para a calibración do xerador de ondas.

12. Conclusións.

Pedro Ojea González

Por último, tras procesar os datos dos ensaios, superpuxéronse cos datos dos modelos obtendo uns moi satisfactorios resultados. Os modelos que máis parecían semellarse aos datos reais eran os modelos non lineais xa que mostraban o fenómeno do softening GZ do que xa falamos e polo cal o máximo dos valores se despraza cara a esquerda. Máis concretamente, dos modelos non lineais, o modelo co ángulo absoluto era o que mellor se axustaba aos datos dos ensaios.

Á vista destes datos, podemos concluír que este modelo de un só grao de liberdade sería perfectamente válido para introducilo nun sistema que axude á monitorización en tempo real da estabilidade do buque axudando deste modo a patróns ou capitáns.

13 BIBLIOGRAFÍA.

- Bhattacharyya, R., 1978. DYNAMICS OF MARINE VEHICLES.
- Blume, P., 1979. Experimentelle Bestimmung von Koeffizienten der wirksamen Rolldämpfung und ihre Anwendung zur Abschätzung extremer Rollwinkel. SCHIFFSTECHNIK.
- Bulian, G., 2014. Extreme values/Envelope determination from a time series.
- Bulian, G., Francescutto, A., 2011. Effect of roll modelling in beam waves under multi-frequency excitation. Ocean Eng. 38, 1448–1463. doi:10.1016/j.oceaneng.2011.07.004
- Bulian, G., Francescutto, a, 2004. A simplified modular approach for the prediction of the roll motion due to the combined action of wind and waves. Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ. 218, 189–212. doi:10.1243/1475090041737958
- Davie Tait, 2009. Trident families receive report [WWW Document]. URL <http://www.trawlerphotos.co.uk/forums/showthread.php?1684-Trident-families-receive-report&highlight=trident> (accessed 11.9.17).
- DryTank Shipping – Shipping broker company [WWW Document], n.d. URL <https://drytank.dk/> (accessed 11.21.17).
- EMSA, 2017. Annual overview of marine casualties and incidents 2017 76.
- European Commission, 2016. Facts and figures on the Common Fisheries Policy. doi:10.2771/607841
- FAO, 2016. Resumen. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. doi:978-92-5-306675-9
- Gimson, G.S., 1975. Report of Court No. S 497. Formal Investigation on MFV Trident (on PD111). London.
- Himeno, Y., 1981. PREDICTION OF SHIP ROLL DAMPING - STATE OF THE ART.
- Instituto Galego de Estatística, 2015. Análise do sector da pesca. Xunta Galicia. Cons. Facenda 45.
- Lloyd, A.R.J.M., 1989. Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather.
- Marcos Míguez González, 2012. A STUDY OF SHIP PARAMETRIC ROLL RESONANCE FOR THE EVALUATION OF PREVENTIVE STRATEGIES. Universidade da Coruña.
- Maritime Safety Committee IMO, 2009. MSC 85/26. REPORT OF THE MARITIME SAFETY COMMITTEE ON ITS EIGHTY-FIFTH SESSION.
- Míguez González, M., Bulian, G., 2018. Influence of ship dynamics modelling on the prediction of fishing vessels roll response in beam and longitudinal waves. Ocean Eng. 148, 312–330. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.11.032

13. Bibliografía.

Pedro Ojea González

- Neves, M.A.S., Pérez, N.A., Lorca, O.M., 2002. Experimental Analysis on Parametric Resonance for Two Fishing Vessels in Head Seas.
- Neves, M.A.S., Pérez, N.A., Valerio, L., 1999. Stability of small fishing vessels in longitudinal waves. *Ocean Eng.* 26, 1389–1419. doi:10.1016/S0029-8018(98)00023-7
- Neves, M.A.S., Rodríguez, C.A., 2007. Influence of non-linearities on the limits of stability of ships rolling in head seas. *Ocean Eng.* 34, 1618–1630. doi:10.1016/j.oceaneng.2006.11.010
- Neves, M.A.S., Rodríguez, C.A., 2006. On unstable ship motions resulting from strong non-linear coupling. *Ocean Eng.* 33, 1853–1883. doi:10.1016/j.oceaneng.2005.11.009
- Neves, M.A.S., Rodríguez, C.A., Vivanco, J.E.M., 2009. On the limits of stability of ships rolling in head seas. doi:10.1243/14750902JEME144
- Paffett, J.A.H., 1976. Experiments with a model of MFV TRIDENT and an alternative round-stern design.
- Scepanovic, D., 2008. Introduction to programming in MATLAB, Lecture 3: Solving Equations and Curve Fitting.
- Umeda, N., 2013. Current Status of Second Generation Intact Stability Criteria Development and Some Recent Efforts. *Proc. 13th Int. Sh. Stab. Work.* 1–20.
- Umeda, N., Francescutto, A., 2016. Current state of the second generation intact stability criteria - achievements and remaining issues. *Proc. 15th Int. Sh. Stab. Work.* 13–15.
- Vazquez y Torres Ingeniería S.L, 2015. MANUAL DE INSTRUCCIONES Generador de Oleaje Unidireccional (GOU).
- Xsens Technologies B.V., 2014. MTw User Manual.

14 ANEXOS.

Anexo 1. Código MATLAB da resolución da ecuación do movemento absoluto co GZ.

```
%DATOS:

%Valores de s_w escollidos
s_w=[1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20];

%Frecuencia natural do buque calculada
w_nat=0.941; %rad/s

%O ratio de frecuencias é a frecuencia de encontro entre a frecuencia
%natural
ratio_frecuencias=0.2:0.01:2;

%Gravidade
g=9.81; %m/s^2

%CARACTERÍSTICAS DO MFV TRIDENT
%Manga
B=6.86; %m

%Calado
Calado=2.507; %m

%Desprazamento
Desprazamento=184.984; %toneladas;

%KG
KG=3.263; %m

%Termos de amortiguamento sacados do ensaio de decaemento
B_44_a=6.8714; %tm^2/s
B_44_b=516.22; %tm^2

%Valores da Masa engadida

A_44_o_interp=276.9389;

A_42_o_interp=-174.94;

A_24_o_interp=-174.94;

A_22_o_interp=167.2163;

A_44_G=637.10;
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

`%Altura metacéntrica`

`GM=0.446; %m`

`%Fase inicial`

`psi=0;`

`%Inercia seca`

`I_xx=(g*Desprazamento*GM/w_nat^2)-A_44_G; %tm2`

`%Inercia total`

`I = I_xx+A_44_G; %tm2`

`%Lectura e almacenamento dos GZ`

`GZ=zeros(201,1); %guardas primero el espacio`

`GZ=xlsread('GZ','Sheet1','C8:GU8'); %lo lees`

`Angulos_gz=-100:1:100;`

`Angulos_gz_rad=Angulos_gz*pi/180;`

`%Cálculo de r a partir da gráfica de Blume.`

`Posicion_x_blume=2*pi/w_nat*sqrt(g/B);`

`X_tablaBlume=zeros(71,1);`

`X_tablaBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','H2:H72');`

`r_tablaBlume=zeros(71,1);`

`r_tableBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','I2:I72');`

`r_interpolado=interp1(X_tablaBlume,r_tableBlume,Posicion_x_blume,'linear');`

`%Cálculo de r a partir do IS Code`

`r_IS=0.73+0.6*OG/Calado;`

`%Media de r`

`r_media=(r_IS+r_interpolado)/2;`

`%Contador auxiliar.`

`cont=1;`

`for i=1:length(s_w)`

`for j=1:length(ratio_frecuencias)`

`%Calculamos a frecuencia de encontro`

`w_encontro=w_nat*ratio_frecuencias(j);`

`%E agora utilizando a función ode45 resolvemos a ecuación diferencial e
 %obtemos a posición e a velocidade para cada instante de tempo entre 0
 %e 600, coa posición inicial e a velocidade inicial nulas.`

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
[t,x]=ode45(@ (t,x)
oscilacion(t,x,s_w(i),w_encontro,GZ,Angulos_gz_rad,g,r_media,Desprazamento,
B_44_a,B_44_b,I,GM,psi),[0:0.05:600],[0,0]);

%Coa seguinte variable creamos unha matriz para saber que pendente e
que ratio de frecuencia corresponde a cada solución
%xa que as solucións se gardan nunha matriz tridimensional
num_soll(i,j)=cont;

%Nesta matriz de tres dimensións gardamos os resultados de cada
%iteración.
solucion1(:, :, cont)=x;

cont=cont+1;

end

end

%A continuación imos a proceder ao ploteado das solucións.
figure
for i=1:length(s_w)

    for j=1:length(ratio_frecuencias)

        %Esta función devólvenos o valor máximo no rango que nos
        %establecemos que xa está calculado para que sexa a partit do tempo
        %500 en diante, onde o réxime do movemento de balance xa é
        %permanente.

[Cmaxmin,tmaxmin,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_findex
tr(t(10001:end),solucion1(10001:end,1,num_soll(i,j)));

        %Nesta variable almacenámos os máximos de cada unha das iteracións.
        maximol(i,j)=max(abs(Cmaxmin));

    end

end

%Unha vez temos feitas todas as iteracións dunha pendente de onda
%podemos plotear xa a súa gráfica. Como pretendemos que todas as
%gráficas das 6 pendentes de onda saian nunha soa pantalla utilizamos o
%comando subplot
subplot(2,3,i);
plot(ratio_frecuencias,maximol(i,:)*180/pi,'k');
title(['s_w=',num2str(s_w(i))],'Color','r');
axis([0,2,0,40]);
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

end

%Nesta función o que facemos é introducir as variables que tiñamos para que
%a través da función ode45 resolva esta ecuación diferencial.

function

```
dxdt=oscilacion(t,x,s_w,w_encontro,GZ,Angulos_gz_rad,g,r_media,Desprazament  
o,B_44_a,B_44_b,I,GM,psi);
```

%Calculamos a pendente de onda efectiva.

```
alpha_eff=r_media*pi*s_w*cos(w_encontro*t+psi);
```

%E calculamos o momento exterior producido pola onda

```
M_ox=alpha_eff*Desprazamento*GM*g;
```

%Agora creamos unha matriz onde se nos almacenen as derivadas do noso

%vector x

```
dxdt=zeros(2,1);
```

%Agora utilizamos un truco xa que a función ode45 non resolve ecuación

%diferencias de segundo grado polo que imos transformar a nosa ecuación de

%segundo grado nun sistema de dúas ecuación de primeiro grado que si é

%capaz de resolver.

```
dxdt(1)=x(2);
```

%Ademais calculamos o GZ correspondente ao ángulo que estamos a estudar

```
GZ_interpolado=interp1(Angulos_gz_rad,GZ,x(1),'linear');
```

```
dxdt(2)=(-B_44_a/I)*x(2)-(B_44_b/I)*x(2)*abs(x(2))-
```

```
(g*Desprazamento*GZ_interpolado)/I + M_ox/I;
```

Anexo 2. Código MATLAB da resolución da ecuación do movemento relativo co GZ.

%DATOS:

%Valores de s_w escollidos

```
s_w=[1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20];
```

%Frecuencia natural do buque calculada

```
w_nat=0.941; %rad/s
```

%O ratio de frecuencias é a frecuencia de encontro entre a frecuencia

%natural

```
ratio_frecuencias=0.2:0.01:2;
```

%Gravidade

```
g=9.81; %m/s^2
```

%CARACTERÍSTICAS DO MFV TRIDENT

14. Anexos.

Pedro Ojea González

`%Manga`

`B=6.86; %m`

`%Calado`

`Calado=2.507; %m`

`%Desprazamento`

`Desprazamento=184.984; %toneladas;`

`%KG`

`KG=3.263; %m`

`%Termos de amortiguamento sacados do ensaio de decaemento`

`B_44_a=6.8714; %tm^2/s`

`B_44_b=516.22; %tm^2`

`%Valores da Masa engadida`

`A_44_o_interp=276.9389;`

`A_42_o_interp=-174.94;`

`A_24_o_interp=-174.94;`

`A_22_o_interp=167.2163;`

`A_44_G=637.10;`

`%Altura metacéntrica`

`GM=0.446; %m`

`%Fase inicial`

`psi=0;`

`%Inercia seca`

`I_xx=(g*Desprazamento*GM/w_nat^2)-A_44_G; %tm2`

`%Inercia total`

`I = I_xx+A_44_G; %tm2`

`%Lectura e almacenamento dos GZ`

`GZ=zeros(201,1); %guardas primero el espacio`

`GZ=xlsread('GZ','Sheet1','C8:GU8'); %lo lees`

`Angulos_gz=-100:1:100;`

`Angulos_gz_rad=Angulos_gz*pi/180;`

`%Cálculo de r a partir da gráfica de Blume.`

`Posicion_x_blume=2*pi/w_nat*sqrt(g/B);`

`X_tablaBlume=zeros(71,1);`

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
X_tablaBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','H2:H72');

r_tablaBlume=zeros(71,1);
r_tableBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','I2:I72');

r_interpolado=interp1(X_tablaBlume,r_tableBlume,Posicion_x_blume,'linear');

%Cálculo de r a partir do IS Code

r_IS=0.73+0.6*OG/Calado;

%Media de r
r_media=(r_IS+r_interpolado)/2;

%Contador auxiliar.
cont=1;

for i=1:length(s_w)

    for j=1:length(ratio_frecuencias)

        %Calculamos a frecuencia de encontro
        w_encontro=w_nat*ratio_frecuencias(j);

        %E agora utilizando a función ode45 resolvemos a ecuación diferencial e
        %obtemos a posición e a velocidade para cada instante de tempo entre 0
        %e 600, coa posición inicial e a velocidade inicial nulas.
        [t,x]=ode45(@(t,x)
oscilacion_relativa(t,x,s_w(i),w_encontro,GZ,Angulos_gz_rad,g,r_media,Despr
azamento,B_44_a,B_44_b,I,psi),[0:0.05:600],[0,0]);

        %Coa seguinte variable creamos unha matriz para saber que pendente e
que ratio de frecuencia corresponde a cada solución
        %xa que as solucións se gardan nunha matriz tridimensional
        num_sol2(i,j)=cont;

        %Nesta matriz de tres dimensións gardamos os resultados de cada
        %iteración.
        solucion2(:, :, cont)=x;

        cont=cont+1;

    end

end

%A continuación imos a levar a proceder ao ploteado das solucións.
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
for i=1:length(s_w)

for j=1:length(ratio_frecuencias)

    %Esta función devólvenos o valor máximo no rango que nos
    %establecemos que xa está calculado para que sexa a partit do tempo
    %500 en diante, onde o réxime do movemento de balance xa é
    %permanente.

[Cmaxmin,tmaxmin,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_findex
tr(t(10001:end),solucion2(10001:end,1,num_sol2(i,j)));

    %Nesta variable almacenámos os máximos de cada unha das iteracións.
    maximo2(i,j)=max(Cmaxmin);

end

%Unha vez temos feitas todas as iteracións dunha pendente de onda
%podemos plotear xa a súa gráfica. Como pretendemos que todas as
%gráficas das 6 pendentes de onda saian nunha soa pantalla utilizamos o
%comando subplot
subplot(2,3,i);
plot(ratio_frecuencias,maximo2(i,:)*180/pi,'r');
title(['s_w=',num2str(s_w(i))],'Color','r');
axis([0,2,0,40]);

end

%Nesta función o que facemos o introducir as variables que tiñamos para que
%a través da función ode45 resolva esta ecuación diferencial.

function
dxdt=oscilacion_relativa(t,x,s_w,w_encontro,GZ,Angulos_gz_rad,g,r_media,Des
prazamento,B_44_a,B_44_b,I,psi);

%Calculamos a pendente de onda efectiva.
alpha_eff=r_media*pi*s_w*cos(w_encontro*t+psi);

%Agora creamos unha matriz onde se nos almacenen as derivadas do noso
%vector x
dxdt=zeros(2,1);

%Agora utilizamos un truco xa que a función ode45 non resolve ecuación
%diferencias de segundo grado polo que imos transformar a nosa ecuación de
%segundo grado nun sistema de dúas ecuación de primeiro grado que si é
%capaz de resolver.
dxdt(1)=x(2);

%Como neste caso o que imos é a usar o ángulo relativo entre o ángulo de
%escora do buque e o ángulo da pendente efectiva, calculamos ese ángulo.
angulo_relativo=x(1)-alpha_eff;
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%Calculamos o GZ para o ángulo que acabamos de calcular.
GZ_interpolado=interp1(Angulos_gz_rad,GZ,angulo_relativo,'linear');

%Aplicamos a ecuación do movemento relativo desdexando a aceleración.
dxdt(2)=(-B_44_a/I)*x(2)-(B_44_b/I)*x(2)*abs(x(2))-
g*Desprazamento*GZ_interpolado/I;
```

Anexo 3. Código MATLAB da resolución da ecuación do movemento absoluto co GM.

```
%DATOS:

%Valores de s_w escollidos
s_w=[1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20];

%Frecuencia natural do buque calculada
w_nat=0.941; %rad/s

%O ratio de frecuencias é a frecuencia de encontro entre a frecuencia
%natural
ratio_frecuencias=0.2:0.01:2;

%Gravidade
g=9.81; %m/s^2

%CARACTERÍSTICAS DO MFV TRIDENT
%Manga
B=6.86; %m

%Calado
Calado=2.507; %m

%Desprazamento
Desprazamento=184.984; %toneladas;

%KG
KG=3.263; %m

%Termos de amortiguamento sacados do ensaio de decaemento
B_44_a=6.8714; %tm^2/s
B_44_b=516.22; %tm^2

%Valores da Masa engadida

A_44_o_interp=276.9389;

A_42_o_interp=-174.94;

A_24_o_interp=-174.94;
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
A_22_o_interp=167.2163;
```

```
A_44_G=637.10;
```

```
%Altura metacéntrica  
GM=0.446; %m
```

```
%Fase inicial  
psi=0;
```

```
%Inecia seca  
I_xx=(g*Desprazamento*GM/w_nat^2)-A_44_G; %tm2
```

```
%Inercia total  
I = I_xx+A_44_G; %tm2
```

```
%Lectura e almacenamento dos GZ  
GZ=zeros(201,1); %guardas primero el espacio  
GZ=xlsread('GZ','Sheet1','C8:GU8'); %lo lees
```

```
Angulos_gz=-100:1:100;  
Angulos_gz_rad=Angulos_gz*pi/180;
```

```
%Cálculo de r a partir da gráfica de Blume.  
Posicion_x_blume=2*pi/w_nat*sqrt(g/B);
```

```
X_tablaBlume=zeros(71,1);  
X_tablaBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','H2:H72');
```

```
r_tablaBlume=zeros(71,1);  
r_tableBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','I2:I72');
```

```
r_interpolado=interp1(X_tablaBlume,r_tableBlume,Posicion_x_blume,'linear');
```

```
%Cálculo de r a partir do IS Code
```

```
r_IS=0.73+0.6*OG/Calado;
```

```
%Media de r  
r_media=(r_IS+r_interpolado)/2;
```

```
%Contador auxiliar.  
cont=1;
```

```
for i=1:length(s_w)
```

```
    for j=1:length(ratio_frecuencias)
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%Calculamos a frecuencia de encontro
w_encontro=w_nat*ratio_frecuencias(j);

%E agora utilizando a función ode45 resolvemos a ecuación diferencial e
%obtemos a posición e a velocidade para cada instante de tempo entre 0
%e 600, coa posición inicial e a velocidade inicial nulas.

[t,x]=ode45(@ (t,x)
oscilacion_GM(t,x,s_w(i),w_encontro,g,r_interpolado,Desprazamento,B_44_a,B_
44_b,I,GM,psi), [0:0.05:600], [0,0]);

%Coa seguinte variable creamos unha matriz para saber que pendente e
que ratio de frecuencia corresponde a cada solución
%xa que as solucións se gardan nunha matriz tridimensional
num_sol3(i,j)=cont;

%Nesta matriz de tres dimensións gardamos os resultados de cada
%iteración.
solucion3(:, :, cont)=x;

cont=cont+1;

end

end

%A continuación imos a levar a proceder ao ploteado das solucións.
for i=1:length(s_w)

    for j=1:length(ratio_frecuencias)

        %Esta función devólvenos o valor máximo no rango que nos
        %establecemos que xa está calculado para que sexa a partir do tempo
        %500 en diante, onde o réxime do movemento de balance xa é
        %permanente.

[Cmaxmin,tmaxmin,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_findex
tr(t(10001:end),solucion3(10001:end,1,num_sol3(i,j)));

        %Nesta variable almacenámos os máximos de cada unha das iteracións.
        maximo3(i,j)=max(Cmaxmin);

    end

end

%Unha vez temos feitas todas as iteracións dunha pendente de onda
%podemos plotear xa a súa gráfica. Como pretendemos que todas as
%gráficas das 6 pendentes de onda saian nunha soa pantalla utilizamos o
```


14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%comando subplot
subplot(2,3,i);
plot(ratio_frecuencias,maximo3(i,:)*180/pi,'g');
title(['s_w=',num2str(s_w(i))],'Color','g');
axis([0,2,0,40]);

end

%Nesta función o que facemos o introducir as variables que tiñamos para que
%a través da función ode45 resolva esta ecuación diferencial.

function
dxdt=oscilacion_GM(t,x,s_w,w_encontro,g,r_interpolado,Desprazamento,B_44_a,
B_44_b,I,GM,psi);

%Calculamos a pendiente de onda efectiva.
alpha_eff=r_interpolado*pi*s_w*cos(w_encontro*t+psi);

%E calculamos o momento exterior producido pola onda
M_ox=alpha_eff*Desprazamento*GM*g;

%Agora creamos unha matriz onde se nos almacenen as derivadas do noso
%vector x
dxdt=zeros(2,1);

%Agora utilizamos un truco xa que a función ode45 non resolve ecuación
%diferencias de segundo grado polo que imos transformar a nosa ecuación de
%segundo grado nun sistema de dúas ecuación de primeiro grado que si é
%capaz de resolver.
dxdt(1)=x(2);

%E plantexamos a ecuación do movemento absoluto co GM en vez de co GZ
dxdt(2)=(-B_44_a/I)*x(2)-(B_44_b/I)*x(2)*abs(x(2))-
(g*Desprazamento*GM*sin(x(1)))/I + M_ox/I;
```

Anexo 4. Código MATLAB da resolución da ecuación do movemento relativo co GM.

```
%DATOS:

%Valores de s_w escollidos
s_w=[1/200, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30, 1/20];

%Frecuencia natural do buque calculada
w_nat=0.941; %rad/s

%O ratio de frecuencias é a frecuencia de encontro entre a frecuencia
%natural
ratio_frecuencias=0.2:0.01:2;

%Gravidade
g=9.81; %m/s^2
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%CARACTERÍSTICAS DO MFV TRIDENT
```

```
%Manga
```

```
B=6.86; %m
```

```
%Calado
```

```
Calado=2.507; %m
```

```
%Desprazamento
```

```
Desprazamento=184.984; %toneladas;
```

```
%KG
```

```
KG=3.263; %m
```

```
%Termos de amortiguamento sacados do ensaio de decaemento
```

```
B_44_a=6.8714; %tm^2/s
```

```
B_44_b=516.22; %tm^2
```

```
%Valores da Masa engadida
```

```
A_44_o_interp=276.9389;
```

```
A_42_o_interp=-174.94;
```

```
A_24_o_interp=-174.94;
```

```
A_22_o_interp=167.2163;
```

```
A_44_G=637.10;
```

```
%Altura metacéntrica
```

```
GM=0.446; %m
```

```
%Fase inicial
```

```
psi=0;
```

```
%Inercia seca
```

```
I_xx=(g*Desprazamento*GM/w_nat^2)-A_44_G; %tm2
```

```
%Inercia total
```

```
I = I_xx+A_44_G; %tm2
```

```
%Lectura e almacenamento dos GZ
```

```
GZ=zeros(201,1); %guardas primero el espacio
```

```
GZ=xlsread('GZ','Sheet1','C8:GU8'); %lo lees
```

```
Angulos_gz=-100:1:100;
```

```
Angulos_gz_rad=Angulos_gz*pi/180;
```

```
%Cálculo de r a partir da gráfica de Blume.
```

```
Posicion_x_blume=2*pi/w_nat*sqrt(g/B);
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
X_tablaBlume=zeros(71,1);
X_tablaBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','H2:H72');

r_tablaBlume=zeros(71,1);
r_tableBlume=xlsread('grafica_blume','grafica_blume','I2:I72');

r_interpolado=interp1(X_tablaBlume,r_tableBlume,Posicion_x_blume,'linear');

%Cálculo de r a partir do IS Code

r_IS=0.73+0.6*OG/Calado;

%Media de r
r_media=(r_IS+r_interpolado)/2;

%Contador auxiliar.
cont=1;

for i=1:length(s_w)

    for j=1:length(ratio_frecuencias)

        %Calculamos a frecuencia de encontro
        w_encontro=w_nat*ratio_frecuencias(j);

        %E agora utilizando a función ode45 resolvemos a ecuación diferencial e
        %obtemos a posición e a velocidade para cada instante de tempo entre 0
        %e 600, coa posición inicial e a velocidade inicial nulas.
        [t,x]=ode45(@(t,x)
oscilacion_relativa_GM(t,x,s_w(i),w_encontro,GM,g,r_interpolado,Desprazamen
to,B_44_a,B_44_b,I,psi),[0:0.05:600],[0,0]);

        %Coa seguinte variable creamos unha matriz para saber que pendente e
        que ratio de frecuencia corresponde a cada solución
        %xa que as solucións se gardan nunha matriz tridimensional
        num_sol4(i,j)=cont;

        %Nesta matriz de tres dimensións gardamos os resultados de cada
        %iteración.
        solucion4(:, :, cont)=x;

        cont=cont+1;

    end

end
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%A continuación imos a levar a proceder ao ploteado das solucións.

for i=1:length(s_w)

    for j=1:length(ratio_frecuencias)

        %Esta función devólvenos o valor máximo no rango que nos
        %establecemos que xa está calculado para que sexa a partit do tempo
        %500 en diante, onde o réxime do movemento de balance xa é
        %estacionario.

        [Cmaxmin,tmaxmin,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_findex
        tr(t(10001:end),solucion4(10001:end,1,num_sol4(i,j)));

        %Nesta variable almacenámos os máximos de cada unha das iteracións.
        maximo4(i,j)=max(Cmaxmin);

    end

    %Unha vez temos feitas todas as iteracións dunha pendente de onda
    %podemos plotear xa a súa gráfica. Como pretendemos que todas as
    %gráficas das 6 pendentes de onda saian nunha soa pantalla utilizamos o
    %comando subplot
    subplot(2,3,i);
    plot(ratio_frecuencias,maximo4(i,:)*180/pi,'b');
    title(['s_w=',num2str(s_w(i))],'Color','r');
    axis([0,2,0,40]);

end

%Nesta función o que facemos o introducir as variables que tiñamos para que
%a través da función ode45 resolva esta ecuación diferencial.

function
dxdt=oscilacion_relativa_GM(t,x,s_w,w_encontro,GM,g,r_interpolado,Desprazam
ento,B_44_a,B_44_b,I,psi);

%Calculamos a pendente de onda efectiva.
alpha_eff=r_interpolado*pi*s_w*cos(w_encontro*t+psi);

%Agora creamos unha matriz onde se nos almacenen as derivadas do noso
%vector x
dxdt=zeros(2,1);

%Agora utilizamos un truco xa que a función ode45 non resolve ecuación
%diferencias de segundo grado polo que imos transformar a nosa ecuación de
%segundo grado nun sistema de dúas ecuación de primeiro grado que si é
%capaz de resolver.
dxdt(1)=x(2);
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

%Como neste caso o que imos é a usar o ángulo relativo entre o ángulo de escora do buque e o ángulo da pendente efectiva, calculamos ese ángulo.
 $\text{angulo_relativo} = x(1) - \alpha_{\text{eff}}$;

%Aplicamos a ecuación do movemento relativo despexando a aceleración.
 $\text{dxdt}(2) = (-B_{44_a}/I) * x(2) - (B_{44_b}/I) * x(2) * \text{abs}(x(2)) - g * \text{Desprazamento} * GM * \sin(\text{angulo_relativo}) / I$;

Anexo 5. Archivo hul de Octopus.

6.2									
arrastreiro_TFM_modificacion									
2.4800	0.0000	22.0900	0.553						
25									
0.9370	0.9430	0.9420	0.9430	0.9430	0.9420	0.9430	0.9430	0.9430	0.9420
0.9430	0.9430	0.9420	0.9430	0.9430	0.9420	0.9430	0.9430	0.9420	0.9430
0.9430	0.9430	0.9420	0.9430	0.9430					
1									
-0.5530	4	0.0000							
2.7750	4.5570	2.7670	3.8640	2.7280	3.1720	0.8610	2.4800	0.0	2.3400
0.3870	4	0.0000							
2.9050	4.5570	2.9080	3.8640	2.8880	3.1720	1.5380	2.4800	0.0	2.1500
1.3300	4	0.0000							
3.0140	4.5570	3.0240	3.8640	3.0190	3.1720	2.3300	2.4800	0.0	1.9100
2.2720	7	0.0000							
3.1060	4.5570	3.1170	3.8640	3.1250	3.1720	2.8800	2.4800	1.2420	1.7880
0.3960	1.0950	0.1220	0.4030	0.0380	0.0000				
3.2150	6	0.0000							
3.1910	3.8640	3.2020	3.1720	3.0830	2.4800	1.8360	1.7880	0.7760	1.0950
0.2960	0.4030	0.1000	0.0000						
4.1580	6	0.0000							
3.2500	3.8640	3.2610	3.1720	3.1890	2.4800	2.3120	1.7880	1.2330	1.0950
0.4850	0.4030	0.1560	0.0000						
5.1000	6	0.0000							
3.2950	3.8640	3.3050	3.1720	3.2590	2.4800	2.5900	1.7880	1.6350	1.0950
0.6880	0.4030	0.2070	0.0000						
6.0430	6	0.0000							
3.3280	3.8640	3.3370	3.1720	3.3050	2.4800	2.7960	1.7880	1.9590	1.0950
0.9250	0.4030	0.2140	0.0000						
6.9860	6	0.0000							
3.3530	3.8640	3.3600	3.1720	3.3370	2.4800	2.9740	1.7880	2.2190	1.0950
1.1860	0.4030	0.2010	0.0000						
7.9290	6	0.0000							
3.3700	3.8640	3.3770	3.1720	3.3600	2.4800	3.1990	1.7880	2.4390	1.0950
1.3370	0.4030	0.1800	0.0000						
8.8710	6	0.0000							
3.3830	3.8640	3.3910	3.1720	3.3790	2.4800	3.2180	1.7880	2.6180	1.0950
1.4070	0.4030	0.1510	0.0000						
9.8140	6	0.0000							
3.3930	3.8640	3.4040	3.1720	3.3960	2.4800	3.2710	1.7880	2.7490	1.0950
1.4250	0.4030	0.1130	0.0000						
10.7570	6	0.0000							
3.4010	3.8640	3.4140	3.1720	3.4070	2.4800	3.2900	1.7880	2.8240	1.0950
1.4270	0.4030	0.0610	0.0000						
11.6990	6	0.0000							
3.4060	3.8640	3.4190	3.1720	3.4090	2.4800	3.2820	1.7880	2.8400	1.0950
1.4280	0.4030	0.0	0.0500						
12.6420	6	0.0000							
3.4090	3.8640	3.4160	3.1720	3.3950	2.4800	3.2460	1.7880	2.7980	1.0950
1.4180	0.4030	0.0	0.0400						
13.5850	6	0.0000							
3.4060	3.8640	3.4000	3.1720	3.3540	2.4800	3.1790	1.7880	2.6980	1.0950
1.3760	0.4030	0.0	0.00						
14.527	6	0.0000							
3.3950	3.8640	3.3640	3.1720	3.2790	2.4800	3.0720	1.7880	2.5370	1.0950
1.2820	0.4030	0.0	0.00						
15.4700	6	0.0000							

14. Anexos.

Pedro Ojea González

3.3680	3.8640	3.2960	3.1720	3.1600	2.4800	2.9120	1.7880	2.3280	1.0950
1.1250	0.4030	0.0	0.00						
16.4130	6	0.0000							
3.3110	3.8640	3.1820	3.1720	2.9870	2.4800	2.6780	1.7880	2.0700	1.0950
0.9110	0.4030	0.0	0.00						
17.3550	7	0.0000							
3.3370	4.5570	3.2050	3.8640	3.0030	3.1720	2.7460	2.4880	2.3630	1.7880
1.7440	1.0950	0.6670	0.4030	0.0	0.00				
18.2980	7	0.0000							
3.2420	4.5570	3.0200	3.8640	2.7460	3.1720	2.4140	2.4800	1.9740	1.7880
1.3350	1.0950	0.4230	0.4030	0.0	0.00				
19.2410	7	0.0000							
3.0620	4.5570	2.7280	3.8640	2.3890	3.1720	1.9720	2.4800	1.5020	1.7880
0.8960	1.0950	0.2010	0.4030	0.0	0.00				
20.1840	6	0.0000							
2.7450	4.5570	2.3270	3.8640	1.9010	3.1720	1.4350	2.4800	0.9500	1.7880
0.4890	1.0950	0.0	0.400						
21.1260	6	0.0000							
2.2600	4.5570	1.7650	3.8640	1.2680	3.1720	0.7840	2.4800	0.4050	1.7880
0.0720	1.0950	0.0	0.9500						
22.0690	5	0.0000							
2.2090	5.2490	1.5470	4.5570	0.9660	3.8640	0.4460	3.1720	0.0940	2.4800
0.0000	2.3000								
23.0120	2	0.0000							
1.1280	5.2490	0.3750	4.5570	0.0000	4.1200				
1.0000	1.0000	1.0000							
*** End of file ***									

Anexo 6. Datos de masa engadida sacados de Octopus.

A(44) and B(44)		
Draft= 2,51 [m]; Speed= 0,00 [kn]		
Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [Tm ²]	Damping [Tm ² /s]
0.530000	250.526100	3.290519
0.562323	252.940600	4.475353
0.594647	255.385000	5.819072
0.626970	257.887800	7.478216
0.659293	260.439400	9.544336
0.691616	262.988300	12.037120
0.723939	265.481700	14.977050
0.756263	267.871300	18.407480
0.788586	270.110100	22.378650
0.820909	272.146600	26.929500
0.853232	273.922700	32.083660
0.885556	275.380600	37.860860
0.917879	276.466200	44.262740
0.950202	277.127000	51.283680
0.982525	277.316700	58.904130
1.014848	276.999700	67.081450
1.047172	276.143300	75.768170
1.079495	274.733500	84.895410
1.111818	272.764600	94.383920
1.144141	270.241400	104.148600
1.176465	267.187500	114.093100
1.208788	263.630600	124.119700
1.241111	259.612500	134.132700
1.273434	255.183200	144.037800
1.305758	250.395200	153.746200
1.338081	245.308000	163.182800
1.370404	239.981200	172.275900
1.402727	234.473300	180.969700

1.435050	228.841100	189.220400
1.467374	223.139200	196.990100
1.499697	217.414300	204.259500
1.532020	211.711400	211.013100
1.564343	206.068500	217.245800
1.596667	200.516800	222.962200
1.628990	195.085400	228.169000
1.661313	189.794600	232.881400
1.693636	184.662400	237.116500
1.725960	179.702200	240.894400
1.758283	174.922300	244.237800
1.790606	170.329900	247.169700
1.822929	165.927600	249.714200
1.855252	161.716500	251.895300
1.887576	157.696100	253.736600
1.919899	153.863500	255.260800
1.952222	150.215400	256.490400
1.984545	146.747100	257.446300
2.016869	143.453200	258.148400
2.049192	140.328100	258.615900
2.081515	137.365400	258.866200
2.113838	134.558900	258.916100
2.146162	131.902000	258.780900
2.178485	129.388400	258.474900
2.210808	127.011500	258.011700
2.243131	124.765200	257.403400
2.275455	122.643100	256.661500
2.307778	120.639400	255.796800
2.340101	118.748300	254.818800
2.372424	116.964100	253.736900

14. Anexos.

Pedro Ojea González

2.404747	115.281800	252.559200
2.437071	113.696000	251.293500
2.469394	112.201900	249.947200
2.501717	110.795000	248.526700
2.534040	109.470700	247.038400
2.566364	108.225000	245.487900
2.598687	107.053800	243.880500
2.631010	105.953300	242.221300
2.663333	104.920000	240.514700
2.695656	103.950500	238.765100
2.727980	103.041500	236.976500
2.760303	102.189900	235.152500
2.792626	101.393000	233.296700
2.824949	100.647900	231.412300
2.857273	99.952070	229.502400
2.889596	99.303000	227.569900
2.921919	98.698360	225.617300
2.954242	98.135930	223.647200
2.986566	97.613620	221.662000
3.018889	97.129390	219.663800
3.051212	96.681390	217.654800
3.083535	96.267810	215.636800
3.115858	95.886920	213.611800
3.148182	95.537110	211.581500
3.180505	95.216830	209.547500
3.212828	94.924590	207.511200
3.245151	94.659030	205.474300
3.277475	94.418800	203.437900
3.309798	94.202650	201.403400
3.342121	94.009380	199.372100
3.374444	93.837840	197.345000
3.406767	93.686880	195.323200
3.439091	93.555470	193.307700
3.471414	93.442740	191.299400
3.503737	93.347810	189.299500
3.536060	93.269600	187.308500
3.568384	93.206840	185.326700
3.600707	93.158710	183.354800
3.633030	93.125720	181.395100
3.665353	93.108440	179.449700
3.697677	93.103880	177.516500
3.730000	93.105740	175.589500

A(42) and B(42)			
Draft= 2,51 [m]; Speed= 0,00 [kn]			
Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [Tm]	Damping [Tm/s]	
0.53000	- 155.18990	-	2.51808
0.56232	- 157.01480	-	3.42333
0.59465	- 158.86140	-	4.44959
0.62697	- 160.75050	-	5.71610
0.65929	- 162.67440	-	7.29242
0.69162	- 164.59410	-	9.19329
0.72394	- 166.46960	-	11.43400
0.75626	- 168.26410	-	14.04724
0.78859	- 169.94200	-	17.07092
0.82091	- 171.46390	-	20.53435
0.85323	- 172.78610	-	24.45515
0.88556	- 173.86460	-	28.84795
0.91788	- 174.65850	-	33.71371
0.95020	- 175.12820	-	39.04783
0.98253	- 175.23850	-	44.83516
1.01485	- 174.96260	-	51.04303
1.04717	- 174.27580	-	57.63511
1.07950	- 173.16750	-	64.55881
1.11182	- 171.63370	-	71.75359
1.14414	- 169.67760	-	79.15456
1.17647	- 167.31770	-	86.68803
1.20879	- 164.57480	-	94.27935

1.24111	- 161.48070	-	101.85540
1.27343	- 158.07370	-	109.34400
1.30576	- 154.39370	-	116.67690
1.33808	- 150.48620	-	123.79650
1.37040	- 146.39700	-	130.64760
1.40273	- 142.17060	-	137.18730
1.43505	- 137.85080	-	143.38170
1.46737	- 133.47940	-	149.20160
1.49970	- 129.09250	-	154.63180
1.53202	- 124.72490	-	159.66040
1.56434	- 120.40570	-	164.28350
1.59667	- 116.15930	-	168.50460
1.62899	- 112.00800	-	172.32890
1.66131	- 107.96780	-	175.76840
1.69364	- 104.05250	-	178.83660
1.72596	- 100.27250	-	181.54940
1.75828	- 96.63428	-	183.92470
1.79061	- 93.14348	-	185.98060
1.82293	- 89.80199	-	187.73630
1.85525	- 86.61068	-	189.21080
1.88758	- 83.56898	-	190.42300
1.91990	- 80.67457	-	191.39090
1.95222	- 77.92476	-	192.13230
1.98455	- 75.31571	-	192.66400

14. Anexos.

Pedro Ojea González

2.01687	-	72.84316	-	193.00190
2.04919	-	70.50253	-	193.16120
2.08152	-	68.28873	-	193.15580
2.11384	-	66.19673	-	192.99910
2.14616	-	64.22131	-	192.70330
2.17849	-	62.35728	-	192.27970
2.21081	-	60.59948	-	191.73930
2.24313	-	58.94289	-	191.09150
2.27546	-	57.38251	-	190.34560
2.30778	-	55.91361	-	189.50990
2.34010	-	54.53157	-	188.59210
2.37242	-	53.23190	-	187.59940
2.40475	-	52.01043	-	186.53830
2.43707	-	50.86302	-	185.41480
2.46939	-	49.78584	-	184.23470
2.50172	-	48.77520	-	183.00300
2.53404	-	47.82755	-	181.72460
2.56636	-	46.93960	-	180.40380
2.59869	-	46.10817	-	179.04480
2.63101	-	45.33028	-	177.65130
2.66333	-	44.60312	-	176.22670
2.69566	-	43.92395	-	174.77440
2.72798	-	43.29029	-	173.29730
2.76030	-	42.69971	-	171.79820
2.79263	-	42.14992	-	170.27970
2.82495	-	41.63882	-	168.74420
2.85727	-	41.16431	-	167.19400

2.88960	-	40.72453	-	165.63100
2.92192	-	40.31762	-	164.05720
2.95424	-	39.94186	-	162.47450
2.98657	-	39.59565	-	160.88460
3.01889	-	39.27741	-	159.28900
3.05121	-	38.98569	-	157.68910
3.08354	-	38.71912	-	156.08640
3.11586	-	38.47636	-	154.48210
3.14818	-	38.25619	-	152.87740
3.18051	-	38.05742	-	151.27350
3.21283	-	37.87893	-	149.67140
3.24515	-	37.71967	-	148.07210
3.27748	-	37.57859	-	146.47640
3.30980	-	37.45480	-	144.88530
3.34212	-	37.34736	-	143.29950
3.37444	-	37.25542	-	141.71980
3.40677	-	37.17812	-	140.14700
3.43909	-	37.11469	-	138.58150
3.47141	-	37.06446	-	137.02410
3.50374	-	37.02678	-	135.47560
3.53606	-	37.00085	-	133.93610
3.56838	-	36.98577	-	132.40580
3.60071	-	36.98090	-	130.88520
3.63303	-	36.98657	-	129.37590
3.66535	-	37.00315	-	127.87980
3.69768	-	37.02853	-	126.39490
3.73000	-	37.05835	-	124.91560

A(22) and B(22)		
Draft= 2,51 [m]; Speed= 0,00 [kn]		
Encounter Freq [rad/s]	Added Mass [T]	Damping [T/s]
0.530000	150.991900	2.014914
0.562323	152.465300	2.738242
0.594647	153.956900	3.558060
0.626970	155.484100	4.569430
0.659293	157.041300	5.827841
0.691616	158.597700	7.345013
0.723939	160.121400	9.133183
0.756263	161.583800	11.218590
0.788586	162.957000	13.631730
0.820909	164.210000	16.396390
0.853232	165.308400	19.527330
0.885556	166.217700	23.036990
0.917879	166.905400	26.927330
0.950202	167.340000	31.196100
0.982525	167.493300	35.832800
1.014848	167.343500	40.813360
1.047172	166.870400	46.110820
1.079495	166.064200	51.685340
1.111818	164.920500	57.490860
1.144141	163.440500	63.477630
1.176465	161.636700	69.588510
1.208788	159.524000	75.765560
1.241111	157.125800	81.951260
1.273434	154.470500	88.088400
1.305758	151.588200	94.122630
1.338081	148.513500	100.007000
1.370404	145.281400	105.696400
1.402727	141.926400	111.154600

1.435050	138.482900	116.352400
1.467374	134.983700	121.264000
1.499697	131.457700	125.874500
1.532020	127.932800	130.171400
1.564343	124.432900	134.148600
1.596667	120.978400	137.806100
1.628990	117.588000	141.145300
1.661313	114.275700	144.173000
1.693636	111.053600	146.897800
1.725960	107.931600	149.330100
1.758283	104.916100	151.482600
1.790606	102.012800	153.368100
1.822929	99.224620	155.000800
1.855252	96.553380	156.394900
1.887576	93.999780	157.564600
1.919899	91.562960	158.524100
1.952222	89.241770	159.287500
1.984545	87.033940	159.867900
2.016869	84.936750	160.278400
2.049192	82.947230	160.531300
2.081515	81.061820	160.638100
2.113838	79.276960	160.610100
2.146162	77.588830	160.457700
2.178485	75.993520	160.190600
2.210808	74.487140	159.818100
2.243131	73.065820	159.348500
2.275455	71.725650	158.790000

14. Anexos.

Pedro Ojea González

2.307778	70.462920	158.150000
2.340101	69.273920	157.435200
2.372424	68.155040	156.652300
2.404747	67.102880	155.806900
2.437071	66.114060	154.904700
2.469394	65.185420	153.950800
2.501717	64.313880	152.949800
2.534040	63.496510	151.906300
2.566364	62.730520	150.824200
2.598687	62.013240	149.707300
2.631010	61.342140	148.559200
2.663333	60.714820	147.382900
2.695656	60.128970	146.181700
2.727980	59.582430	144.958200
2.760303	59.073120	143.715000
2.792626	58.599080	142.454500
2.824949	58.158480	141.179100
2.857273	57.749510	139.890700
2.889596	57.370530	138.591300
2.921919	57.019960	137.282700
2.954242	56.696270	135.966500
2.986566	56.398050	134.644400

3.018889	56.123940	133.317900
3.051212	55.872650	131.988100
3.083535	55.643000	130.656300
3.115858	55.433800	129.323900
3.148182	55.243970	127.991700
3.180505	55.072480	126.660900
3.212828	54.918330	125.332300
3.245151	54.780600	124.006900
3.277475	54.658380	122.685400
3.309798	54.550850	121.368600
3.342121	54.457210	120.057100
3.374444	54.376720	118.751700
3.406767	54.308620	117.452800
3.439091	54.252230	116.160900
3.471414	54.206970	114.876800
3.503737	54.172260	113.600900
3.536060	54.147420	112.333500
3.568384	54.131660	111.074600
3.600707	54.124440	109.824500
3.633030	54.126000	108.584700
3.665353	54.136640	107.356900
3.697677	54.154580	106.139000
3.730000	54.176200	104.926200

Anexo 7. Datos do cálculo de equilibrio e de estabilidade a grandes ángulos co módulo Stability de MAXSURF.

1	Draft Amidships m	2,507
2	Displacement t	185,0
3	Heel deg	0,0
4	Draft at FP m	2,507
5	Draft at AP m	2,507
6	Draft at LCF m	2,507
7	Trim (+ve by stern) m	0,000
8	WL Length m	22,733
9	Beam max extents on WL m	6,824
10	Wetted Area m ²	171,39
11	Waterpl. Area m ²	124,80
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,636
13	Block coeff. (Cb)	0,427
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,745
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,805
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,975
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	10,175
18	KB m	1,580
19	KG fluid m	3,263
20	BMt m	2,129
21	BML m	21,363
22	GMt corrected m	0,446
23	GML m	19,679
24	KMt m	3,709
25	KML m	22,942
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,248
27	MTC tonne.m	1,648
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	1,440
29	Max deck inclination deg	0,0000
30	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000

14. Anexos.

Pedro Ojea González

Ángulo	-100	-99	-98	-97	-96	-95	-94	-93	-92	-91	-90
GZ m	0.588	0.571	0.555	0.539	0.522	0.505	0.488	0.472	0.455	0.438	0.421
Area under GZ curve from zero heel m.deg	-2.7767	-2.1972	-1.6341	-1.0873	-0.5571	-0.0435	0.4534	0.9335	1.3967	1.843	2.2724
Displacement t	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
Draft at FP m	-4.643	-4.842	-5.094	-5.417	-5.85	-6.458	-7.372	-8.899	-11.958	-21.148	n/a
Draft at AP m	-6.375	-6.82	-7.376	-8.09	-9.041	-10.372	-12.368	-15.692	-22.338	-42.271	n/a
WL Length m	24.386	24.413	24.44	24.467	24.494	24.504	24.476	24.448	24.419	24.391	24.361
Beam max extents on WL m	4.199	4.201	4.205	4.21	4.218	4.226	4.237	4.25	4.266	4.283	4.302
Wetted Area m^2	186.182	186.072	185.965	185.868	185.782	185.7	185.622	185.553	185.493	185.443	185.406
Waterpl. Area m^2	87.131	87.22	87.327	87.455	87.603	87.77	87.966	88.196	88.457	88.754	89.087
Prismatic coeff. (Cp)	0.742	0.739	0.736	0.733	0.73	0.728	0.727	0.726	0.725	0.724	0.723
Block coeff. (Cb)	0.56	0.563	0.565	0.568	0.571	0.575	0.579	0.583	0.587	0.591	0.596
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10.997	10.998	10.999	11	11	11.001	11.002	11.002	11.003	11.004	11.004
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	11.555	11.559	11.562	11.564	11.565	11.563	11.561	11.559	11.556	11.553	11.55
Max deck inclination deg	99.9991	98.9991	97.9992	96.9992	95.9993	94.9994	93.9995	92.9996	91.9997	90.9999	90
Trim angle (+ve by stern) deg	-4.4825	-5.1163	-5.8983	-6.8977	-8.2195	-10.0487	-12.744	-17.0942	-25.1684	-43.7188	n/a

-89	-88	-87	-86	-85	-84	-83	-82	-81	-80	-79	-78	-77	-76	-75
0.404	0.387	0.37	0.354	0.337	0.321	0.304	0.288	0.272	0.257	0.242	0.227	0.212	0.197	0.182
2.685	3.0807	3.4595	3.8215	4.1668	4.4956	4.808	5.1043	5.3846	5.6493	5.8986	6.1327	6.3518	6.5562	6.7459
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
-15.644	-6.455	-3.397	-1.87	-0.957	-0.35	0.081	0.404	0.652	0.851	1.014	1.151	1.269	1.371	1.461
-37.45	-17.516	-10.871	-7.547	-5.553	-4.223	-3.274	-2.562	-2.009	-1.568	-1.208	-0.91	-0.66	-0.447	-0.263
24.332	24.302	24.272	24.242	24.211	24.179	24.147	24.114	24.081	24.047	24.013	23.978	23.942	23.906	23.87
4.325	4.351	4.379	4.41	4.445	4.486	4.529	4.579	4.619	4.599	4.582	4.634	4.739	4.976	4.936
185.38	185.368	185.371	185.39	185.433	185.507	185.604	185.73	185.889	186.04	186.202	186.388	186.612	186.922	187.364
89.459	89.87	90.323	90.824	91.382	92.012	92.703	93.455	94.26	94.929	95.56	96.164	96.716	97.171	97.371
0.722	0.722	0.721	0.72	0.719	0.719	0.718	0.717	0.717	0.716	0.716	0.715	0.715	0.715	0.714
0.6	0.598	0.596	0.593	0.59	0.586	0.582	0.578	0.574	0.578	0.582	0.577	0.566	0.54	0.546
11.005	11.005	11.006	11.006	11.007	11.007	11.008	11.008	11.009	11.009	11.009	11.01	11.01	11.011	11.011
11.546	11.542	11.538	11.533	11.527	11.519	11.509	11.499	11.487	11.456	11.416	11.37	11.319	11.27	11.241
89.0001	88.0003	87.0005	86.0006	85.0008	84.001	83.0012	82.0014	81.0016	80.0018	79.0021	78.0023	77.0026	76.0028	75.0031
-44.6281	-26.5976	-18.6929	-14.4133	-11.7535	-9.9449	-8.6365	-7.6463	-6.8701	-6.2485	-5.7448	-5.332	-4.9909	-4.7062	-4.4641

-74	-73	-72	-71	-70	-69	-68	-67	-66	-65	-64	-63	-62	-61	-60
0.168	0.153	0.138	0.124	0.109	0.094	0.079	0.065	0.05	0.036	0.021	0.007	-0.007	-0.02	-0.034
6.921	7.0814	7.2271	7.3581	7.4743	7.5757	7.6624	7.7343	7.7917	7.8346	7.863	7.8773	7.8775	7.8639	7.8366
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
1.541	1.611	1.675	1.731	1.783	1.83	1.872	1.912	1.948	1.978	2.012	2.039	2.065	2.092	2.116
-0.101	0.043	0.172	0.289	0.395	0.493	0.583	0.667	0.745	0.82	0.885	0.951	1.013	1.068	1.122
23.832	23.794	23.755	23.715	23.673	23.63	23.586	23.539	23.492	23.44	23.39	23.335	23.277	23.219	23.156
4.812	4.734	4.693	4.662	4.65	4.643	4.64	4.64	4.642	4.646	4.659	4.686	4.714	4.743	4.774
187.671	187.849	187.954	188.02	188.03	187.965	187.897	187.811	187.689	187.491	187.284	187.058	186.822	186.579	186.318
97.488	97.571	97.649	97.75	97.864	97.96	98.129	98.352	98.596	98.816	99.086	99.391	99.741	100.137	100.572
0.714	0.714	0.714	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713
0.562	0.572	0.579	0.584	0.587	0.59	0.592	0.594	0.596	0.598	0.598	0.598	0.597	0.596	0.595
11.012	11.013	11.013	11.014	11.014	11.014	11.015	11.015	11.015	11.015	11.016	11.016	11.016	11.016	11.016
11.223	11.209	11.198	11.188	11.176	11.169	11.16	11.155	11.15	11.144	11.137	11.129	11.121	11.111	11.102
74.0034	73.0038	72.0041	71.0045	70.0048	69.0052	68.0055	67.0059	66.0063	65.0066	64.007	63.0073	62.0076	61.008	60.0084
-4.2516	-4.0621	-3.8915	-3.7362	-3.5936	-3.4618	-3.3394	-3.2248	-3.1173	-3.0003	-2.9191	-2.8188	-2.726	-2.6558	-2.5752

14. Anexos.

Pedro Ojea González

-59	-58	-57	-56	-55	-54	-53	-52	-51	-50	-49	-48	-47	-46	-45
-0.047	-0.06	-0.073	-0.085	-0.096	-0.108	-0.119	-0.129	-0.139	-0.148	-0.157	-0.165	-0.173	-0.18	-0.186
7.7961	7.7425	7.6762	7.5976	7.507	7.4049	7.2916	7.1677	7.0336	6.8899	6.7371	6.5758	6.4066	6.2301	6.0469
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.138	2.16	2.178	2.198	2.214	2.23	2.246	2.261	2.275	2.288	2.301	2.313	2.325	2.336	2.347
1.174	1.223	1.272	1.316	1.361	1.404	1.445	1.485	1.524	1.561	1.598	1.634	1.669	1.703	1.736
23.089	23.02	22.944	22.866	22.779	22.689	22.603	22.611	22.618	22.625	22.632	22.638	22.644	22.65	22.656
4.805	4.838	4.872	4.91	4.952	4.996	5.041	5.089	5.14	5.192	5.247	5.304	5.364	5.425	5.489
186.045	185.729	185.416	185.099	184.739	184.371	184.024	183.707	183.212	182.849	182.346	181.876	181.393	180.889	180.354
101.041	101.519	102.049	102.626	103.213	103.848	104.555	105.344	106.015	106.869	107.624	108.448	109.299	110.169	111.044
0.714	0.714	0.715	0.715	0.716	0.717	0.718	0.716	0.714	0.711	0.709	0.707	0.704	0.702	0.7
0.594	0.593	0.592	0.591	0.59	0.589	0.587	0.583	0.579	0.575	0.57	0.566	0.562	0.557	0.552
11.016	11.017	11.016	11.017	11.015	11.015	11.014	11.014	11.014	11.013	11.013	11.012	11.011	11.011	11.01
11.092	11.077	11.065	11.052	11.037	11.021	11.009	11	10.974	10.963	10.941	10.926	10.912	10.9	10.886
59.0087	58.009	57.0093	56.0096	55.0098	54.0101	53.0103	52.0105	51.0106	50.0107	49.0108	48.0109	47.011	46.011	45.011
-2.5001	-2.43	-2.3495	-2.2884	-2.2096	-2.142	-2.0758	-2.0111	-1.9473	-1.8842	-1.8221	-1.761	-1.701	-1.6422	-1.5845

-44	-43	-42	-41	-40	-39	-38	-37	-36	-35	-34	-33	-32	-31	-30
-0.192	-0.197	-0.201	-0.205	-0.207	-0.209	-0.21	-0.21	-0.209	-0.208	-0.205	-0.202	-0.197	-0.192	-0.187
5.8578	5.6633	5.4642	5.2612	5.0552	4.8469	4.6372	4.427	4.217	4.0084	3.8019	3.5984	3.3989	3.2042	3.0148
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.357	2.368	2.378	2.388	2.397	2.407	2.416	2.425	2.435	2.444	2.452	2.461	2.47	2.478	2.486
1.768	1.8	1.831	1.861	1.89	1.919	1.947	1.975	2.002	2.028	2.054	2.079	2.104	2.128	2.151
22.661	22.666	22.671	22.676	22.681	22.686	22.69	22.695	22.7	22.704	22.708	22.713	22.717	22.721	22.725
5.555	5.623	5.694	5.769	5.847	5.929	6.016	6.107	6.203	6.303	6.407	6.517	6.633	6.755	6.841
179.807	179.239	178.645	178.025	177.391	176.747	176.095	175.436	174.775	174.116	173.467	172.841	172.255	171.749	171.446
111.943	112.856	113.799	114.767	115.748	116.741	117.742	118.743	119.735	120.707	121.639	122.502	123.254	123.798	123.833
0.697	0.695	0.693	0.69	0.688	0.686	0.683	0.681	0.679	0.676	0.674	0.672	0.67	0.668	0.667
0.548	0.543	0.538	0.533	0.528	0.523	0.518	0.512	0.506	0.5	0.494	0.488	0.481	0.475	0.471
11.009	11.009	11.008	11.007	11.006	11.005	11.004	11.004	11.003	11.002	11.001	11	10.999	10.999	10.998
10.874	10.863	10.851	10.839	10.828	10.817	10.807	10.797	10.788	10.779	10.77	10.761	10.751	10.739	10.722
44.0109	43.0109	42.0108	41.0107	40.0106	39.0104	38.0103	37.0101	36.0099	35.0097	34.0095	33.0093	32.0091	31.0088	30.0086
-1.5281	-1.473	-1.4192	-1.3666	-1.3152	-1.265	-1.216	-1.1684	-1.1221	-1.0771	-1.0334	-0.991	-0.9498	-0.9097	-0.8703

-29	-28	-27	-26	-25	-24	-23	-22	-21	-20	-19	-18	-17	-16	-15
-0.181	-0.176	-0.17	-0.165	-0.16	-0.154	-0.149	-0.144	-0.138	-0.133	-0.127	-0.122	-0.116	-0.11	-0.105
2.8311	2.6528	2.4799	2.3124	2.1503	1.9934	1.8419	1.6956	1.5547	1.4193	1.2892	1.1647	1.0457	0.9324	0.8249
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.493	2.5	2.505	2.51	2.514	2.517	2.52	2.522	2.524	2.525	2.526	2.526	2.526	2.526	2.525
2.173	2.194	2.215	2.235	2.254	2.272	2.289	2.306	2.322	2.338	2.352	2.367	2.38	2.393	2.405
22.728	22.731	22.734	22.736	22.738	22.739	22.74	22.741	22.741	22.741	22.742	22.742	22.742	22.742	22.742
6.844	6.849	6.855	6.86	6.865	6.87	6.873	6.876	6.877	6.878	6.878	6.878	6.878	6.873	6.87
171.278	171.138	171.018	170.915	170.827	170.753	170.693	170.635	170.585	170.547	170.52	170.506	170.505	170.52	170.55
123.562	123.335	123.143	122.983	122.851	122.743	122.661	122.606	122.574	122.564	122.577	122.611	122.67	122.753	122.859
0.665	0.664	0.662	0.661	0.659	0.658	0.656	0.655	0.653	0.652	0.65	0.649	0.648	0.646	0.645
0.472	0.474	0.476	0.477	0.479	0.481	0.483	0.485	0.483	0.478	0.472	0.467	0.463	0.458	0.454
10.997	10.996	10.995	10.994	10.993	10.992	10.991	10.991	10.99	10.989	10.988	10.987	10.986	10.985	10.984
10.703	10.683	10.663	10.643	10.623	10.603	10.582	10.561	10.539	10.517	10.495	10.473	10.45	10.426	10.402
29.0083	28.008	27.0077	26.0074	25.007	24.0066	23.0062	22.0058	21.0054	20.005	19.0046	18.0042	17.0038	16.0033	15.0029
-0.8309	-0.7916	-0.7525	-0.7136	-0.6749	-0.6364	-0.5983	-0.5606	-0.5232	-0.4864	-0.4501	-0.4144	-0.3794	-0.345	-0.3114

-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-0.099	-0.093	-0.086	-0.08	-0.073	-0.067	-0.06	-0.053	-0.046	-0.038	-0.031	-0.023	-0.016	-0.008	0
0.7233	0.6277	0.5382	0.455	0.3782	0.3081	0.2447	0.1882	0.1389	0.0968	0.0622	0.0351	0.0157	0.0039	0
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.524	2.523	2.522	2.52	2.519	2.517	2.515	2.514	2.512	2.51	2.509	2.508	2.507	2.508	2.507
2.417	2.428	2.439	2.448	2.458	2.466	2.474	2.481	2.488	2.493	2.498	2.501	2.504	2.505	2.506
22.741	22.741	22.74	22.74	22.739	22.738	22.737	22.736	22.735	22.735	22.734	22.734	22.734	22.734	22.733
6.865	6.86	6.854	6.848	6.842	6.837	6.833	6.83	6.827	6.826	6.825	6.824	6.824	6.824	6.824
170.595	170.654	170.738	170.838	170.947	171.059	171.167	171.262	171.332	171.378	171.409	171.424	171.428	171.394	171.394
122.987	123.134	123.299	123.478	123.671	123.871	124.07	124.257	124.415	124.54	124.634	124.703	124.753	124.78	124.798
0.644	0.643	0.642	0.641	0.64	0.639	0.638	0.638	0.637	0.637	0.636	0.636	0.636	0.636	0.636
0.451	0.448	0.445	0.442	0.44	0.437	0.435	0.434	0.432	0.431	0.429	0.429	0.428	0.428	0.427
10.983	10.982	10.981	10.98	10.98	10.979	10.978	10.977	10.977	10.976	10.976	10.976	10.975	10.977	10.975
10.378	10.353	10.329	10.304	10.28	10.258	10.237	10.22	10.206	10.195	10.188	10.183	10.179	10.178	10.175
14.0026	13.0022	12.0018	11.0015	10.0012	9.0009	8.0007	7.0005	6.0003	5.0002	4.0001	3	2	1	0.001
-0.2787	-0.2469	-0.2161	-0.1865	-0.1582	-0.1314	-0.1064	-0.0833	-0.0626	-0.0446	-0.0294	-0.0173	-0.0085	-0.0085	-0.001

14. Anexos.

Pedro Ojea González

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.008	0.015	0.023	0.031	0.038	0.045	0.053	0.06	0.066	0.073	0.08	0.086	0.092	0.098	0.104
0.0038	0.0155	0.0348	0.0617	0.0961	0.1379	0.187	0.2431	0.3061	0.3759	0.4522	0.5349	0.6239	0.719	0.8201
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.506	2.506	2.508	2.509	2.51	2.511	2.513	2.515	2.516	2.518	2.519	2.521	2.522	2.523	2.524
2.506	2.505	2.502	2.498	2.494	2.488	2.482	2.475	2.467	2.459	2.45	2.44	2.43	2.419	2.407
22.733	22.733	22.734	22.734	22.735	22.735	22.736	22.737	22.738	22.738	22.739	22.74	22.74	22.741	22.741
6.824	6.824	6.824	6.825	6.826	6.827	6.83	6.833	6.837	6.842	6.848	6.854	6.86	6.865	6.87
171.367	171.351	171.306	171.272	171.23	171.174	171.094	170.99	170.872	170.75	170.633	170.523	170.429	170.36	170.306
124.773	124.714	124.631	124.555	124.46	124.336	124.179	123.993	123.794	123.594	123.403	123.225	123.061	122.915	122.79
0.636	0.636	0.636	0.636	0.637	0.637	0.638	0.638	0.639	0.64	0.641	0.642	0.643	0.644	0.645
0.427	0.428	0.428	0.429	0.431	0.432	0.433	0.435	0.437	0.439	0.442	0.444	0.447	0.451	0.454
10.975	10.973	10.975	10.976	10.976	10.977	10.977	10.978	10.979	10.979	10.98	10.981	10.982	10.983	10.984
10.177	10.18	10.188	10.193	10.2	10.211	10.225	10.242	10.263	10.285	10.309	10.333	10.358	10.382	10.407
1	2	3	4.0001	5.0002	6.0003	7.0004	8.0006	9.0009	10.0011	11.0014	12.0017	13.0021	14.0024	15.0028
-0.001	-0.001	-0.0157	-0.0272	-0.0419	-0.0594	-0.0796	-0.1021	-0.1266	-0.1529	-0.1806	-0.2097	-0.2399	-0.2712	-0.3035

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0.11	0.116	0.121	0.127	0.132	0.137	0.143	0.148	0.153	0.159	0.164	0.169	0.175	0.18	0.186
0.927	1.0397	1.158	1.2819	1.4113	1.5461	1.6863	1.8318	1.9826	2.1387	2.3001	2.4668	2.6389	2.8164	2.9993
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.525	2.525	2.525	2.524	2.524	2.522	2.521	2.518	2.515	2.512	2.508	2.503	2.498	2.491	2.484
2.395	2.382	2.369	2.355	2.34	2.325	2.309	2.292	2.275	2.257	2.238	2.218	2.198	2.177	2.154
22.741	22.741	22.741	22.741	22.74	22.74	22.74	22.739	22.738	22.737	22.735	22.733	22.73	22.727	22.724
6.874	6.876	6.878	6.879	6.879	6.878	6.876	6.874	6.87	6.866	6.861	6.855	6.85	6.845	6.841
170.267	170.242	170.232	170.237	170.254	170.283	170.323	170.371	170.421	170.485	170.562	170.654	170.763	170.89	171.038
122.685	122.604	122.548	122.515	122.506	122.518	122.552	122.61	122.695	122.805	122.94	123.102	123.297	123.527	123.796
0.646	0.648	0.649	0.65	0.652	0.653	0.655	0.656	0.657	0.659	0.66	0.662	0.663	0.665	0.667
0.458	0.462	0.467	0.472	0.477	0.483	0.485	0.483	0.481	0.479	0.477	0.476	0.474	0.472	0.47
10.985	10.986	10.986	10.987	10.988	10.989	10.99	10.991	10.992	10.993	10.994	10.995	10.996	10.997	10.997
10.43	10.454	10.477	10.499	10.521	10.542	10.564	10.585	10.605	10.625	10.645	10.665	10.684	10.704	10.723
16.0032	17.0036	18.004	19.0044	20.0048	21.0052	22.0056	23.006	24.0064	25.0067	26.0071	27.0074	28.0077	29.008	30.0083
-0.3365	-0.3703	-0.4049	-0.4401	-0.4758	-0.5121	-0.5489	-0.5862	-0.6238	-0.6617	-0.6999	-0.7384	-0.777	-0.8158	-0.8547

31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
0.191	0.196	0.201	0.204	0.207	0.209	0.209	0.209	0.208	0.206	0.204	0.2	0.196	0.191	0.185
3.1879	3.3818	3.5804	3.783	3.9886	4.1965	4.4055	4.6149	4.8237	5.0311	5.2362	5.4383	5.6365	5.8302	6.0185
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.476	2.467	2.459	2.45	2.441	2.432	2.423	2.413	2.404	2.394	2.385	2.375	2.365	2.354	2.344
2.131	2.108	2.083	2.058	2.032	2.006	1.979	1.952	1.924	1.895	1.866	1.836	1.805	1.773	1.741
22.72	22.716	22.711	22.707	22.702	22.698	22.693	22.689	22.684	22.679	22.675	22.67	22.664	22.659	22.654
6.754	6.633	6.517	6.407	6.302	6.202	6.107	6.016	5.929	5.847	5.769	5.694	5.623	5.555	5.489
171.322	171.817	172.39	173.004	173.639	174.284	174.93	175.573	176.209	176.835	177.449	178.049	178.634	179.202	179.75
123.757	123.213	122.464	121.601	120.672	119.702	118.713	117.715	116.716	115.727	114.75	113.787	112.848	111.933	111.032
0.668	0.67	0.672	0.674	0.676	0.679	0.681	0.683	0.686	0.688	0.69	0.693	0.695	0.697	0.7
0.474	0.481	0.488	0.494	0.5	0.506	0.512	0.517	0.523	0.528	0.533	0.538	0.543	0.548	0.552
10.998	10.999	11	11.001	11.002	11.002	11.003	11.004	11.005	11.006	11.006	11.007	11.008	11.009	11.009
10.739	10.751	10.761	10.77	10.779	10.788	10.797	10.806	10.816	10.827	10.838	10.85	10.861	10.873	10.885
31.0085	32.0087	33.009	34.0092	35.0094	36.0096	37.0098	38.0099	39.0101	40.0102	41.0104	42.0105	43.0105	44.0106	45.0106
-0.8937	-0.9334	-0.9741	-1.016	-1.0592	-1.1037	-1.1496	-1.1967	-1.2452	-1.2949	-1.3458	-1.398	-1.4514	-1.5061	-1.562

46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
0.179	0.172	0.165	0.156	0.148	0.138	0.128	0.118	0.107	0.096	0.084	0.072	0.059	0.046	0.033
6.2009	6.3766	6.545	6.7055	6.8575	7.0004	7.1337	7.2568	7.3693	7.4706	7.5605	7.6383	7.7038	7.7566	7.7964
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.333	2.321	2.31	2.297	2.285	2.271	2.257	2.242	2.226	2.21	2.192	2.172	2.154	2.133	2.11
1.708	1.674	1.64	1.604	1.568	1.53	1.492	1.452	1.411	1.369	1.325	1.282	1.232	1.184	1.133
22.648	22.642	22.636	22.63	22.623	22.616	22.609	22.601	22.685	22.776	22.861	22.939	23.015	23.085	23.152
5.425	5.364	5.304	5.247	5.192	5.14	5.089	5.041	4.996	4.952	4.911	4.872	4.837	4.804	4.773
180.285	180.792	181.277	181.747	182.253	182.611	183.114	183.429	183.775	184.135	184.494	184.81	185.12	185.42	185.723
110.155	109.286	108.434	107.609	106.855	106.193	105.33	104.539	103.83	103.188	102.599	102.022	101.488	100.995	100.554
0.702	0.704	0.707	0.709	0.711	0.713	0.716	0.718	0.717	0.716	0.715	0.715	0.714	0.714	0.713
0.557	0.561	0.566	0.57	0.575	0.579	0.583	0.587	0.589	0.59	0.591	0.592	0.593	0.594	0.595
11.01	11.011	11.011	11.012	11.013	11.013	11.014	11.014	11.014	11.015	11.015	11.015	11.015	11.015	11.014
10.899	10.912	10.926	10.941	10.963	10.974	11.001	11.01	11.022	11.037	11.053	11.065	11.077	11.09	11.103
46.0107	47.0107	48.0106	49.0106	50.0105	51.0103	52.0102	53.01	54.0098	55.0096	56.0093	57.009	58.0088	59.0084	60.0081
-1.6192	-1.6775	-1.7369	-1.7974	-1.8589	-1.9213	-1.9843	-2.0483	-2.1136	-2.1804	-2.2486	-2.3086	-2.3904	-2.4593	-2.5332

14. Anexos.

Pedro Ojea González

61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
0.02	0.006	-0.008	-0.022	-0.036	-0.051	-0.066	-0.08	-0.095	-0.11	-0.125	-0.139	-0.154	-0.169	-0.183
7.8228	7.8356	7.8346	7.8196	7.7903	7.7465	7.6883	7.6154	7.5278	7.4254	7.3083	7.1764	7.0297	6.8684	6.6924
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
2.086	2.062	2.036	2.009	1.976	1.945	1.906	1.866	1.823	1.776	1.725	1.667	1.604	1.533	1.453
1.078	1.021	0.959	0.894	0.828	0.753	0.678	0.595	0.506	0.409	0.303	0.186	0.058	-0.085	-0.246
23.215	23.275	23.333	23.388	23.439	23.491	23.537	23.583	23.628	23.671	23.712	23.753	23.792	23.83	23.868
4.742	4.713	4.685	4.659	4.645	4.641	4.638	4.638	4.641	4.647	4.658	4.687	4.728	4.798	4.922
185.983	186.228	186.465	186.69	186.898	187.096	187.233	187.3	187.389	187.444	187.437	187.383	187.302	187.125	186.81
100.119	99.725	99.376	99.07	98.801	98.58	98.349	98.107	97.957	97.85	97.739	97.646	97.593	97.506	97.38
0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.713	0.714	0.714	0.714	0.714
0.596	0.597	0.597	0.598	0.598	0.596	0.594	0.592	0.59	0.587	0.584	0.579	0.573	0.563	0.547
11.014	11.014	11.015	11.017	11.015	11.017	11.014	11.014	11.014	11.013	11.013	11.012	11.012	11.011	11.011
11.112	11.121	11.13	11.138	11.145	11.151	11.152	11.159	11.167	11.176	11.187	11.196	11.205	11.22	11.239
61.0078	62.0075	63.0071	64.0068	65.0064	66.0061	67.0057	68.0054	69.005	70.0047	71.0043	72.004	73.0037	74.0033	75.003
-2.6125	-2.6977	-2.7895	-2.8888	-2.9748	-3.0908	-3.1808	-3.2934	-3.4137	-3.5431	-3.6832	-3.8356	-4.003	-4.1887	-4.3969

76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
-0.198	-0.213	-0.227	-0.242	-0.258	-0.273	-0.289	-0.305	-0.321	-0.337	-0.354	-0.371	-0.388	-0.404	-0.421
6.5018	6.2965	6.0766	5.8418	5.5918	5.3265	5.0455	4.7487	4.4358	4.1066	3.7608	3.3984	3.0193	2.6234	2.2105
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
1.362	1.259	1.14	1.002	0.837	0.637	0.386	0.061	-0.374	-0.986	-1.907	-3.446	-6.53	-15.795	n/a
-0.429	-0.64	-0.888	-1.184	-1.541	-1.979	-2.528	-3.234	-4.177	-5.497	-7.477	-10.776	-17.374	-37.165	n/a
23.904	23.94	23.976	24.011	24.045	24.079	24.113	24.145	24.177	24.209	24.24	24.27	24.3	24.33	24.36
5.02	4.748	4.639	4.584	4.6	4.621	4.578	4.528	4.484	4.444	4.409	4.378	4.35	4.324	4.301
186.395	186.039	185.809	185.619	185.454	185.299	185.137	185.01	184.911	184.835	184.791	184.77	184.766	184.777	184.801
97.221	96.752	96.201	95.593	94.958	94.281	93.469	92.716	92.024	91.391	90.832	90.329	89.875	89.463	89.091
0.715	0.715	0.715	0.716	0.716	0.717	0.717	0.718	0.718	0.719	0.72	0.721	0.721	0.722	0.723
0.535	0.565	0.576	0.582	0.578	0.574	0.578	0.582	0.586	0.59	0.593	0.596	0.598	0.6	0.596
11.01	11.01	11.009	11.009	11.008	11.008	11.007	11.007	11.007	11.006	11.006	11.005	11.005	11.004	11.004
11.263	11.314	11.365	11.412	11.452	11.483	11.495	11.505	11.514	11.522	11.528	11.534	11.538	11.542	11.546
76.0027	77.0025	78.0022	79.002	80.0018	81.0016	82.0014	83.0012	84.001	85.0008	86.0006	87.0005	88.0003	89.0001	90
-4.634	-4.9122	-5.2461	-5.6502	-6.1438	-6.753	-7.5138	-8.4845	-9.7675	-11.5417	-14.1524	-18.3582	-26.1471	-44.0514	n/a

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
-0.438	-0.455	-0.472	-0.489	-0.505	-0.522	-0.538	-0.555	-0.571	-0.587
1.7809	1.3345	0.8712	0.3911	-0.1058	-0.6194	-1.1495	-1.6961	-2.2591	-2.8383
185	185	185	185	185	185	185	185	185	185
-21.301	-12.035	-8.951	-7.411	-6.489	-5.877	-5.44	-5.114	-4.86	-4.658
-41.987	-22.196	-15.597	-12.297	-10.315	-8.994	-8.049	-7.34	-6.789	-6.347
24.389	24.417	24.446	24.474	24.502	24.496	24.469	24.442	24.415	24.387
4.282	4.265	4.25	4.237	4.225	4.217	4.21	4.204	4.201	4.199
184.837	184.886	184.945	185.013	185.09	185.172	185.258	185.354	185.461	185.576
88.757	88.46	88.198	87.967	87.772	87.605	87.458	87.331	87.224	87.136
0.724	0.725	0.726	0.727	0.728	0.73	0.733	0.736	0.738	0.741
0.591	0.587	0.583	0.579	0.575	0.571	0.568	0.566	0.563	0.56
11.003	11.002	11.002	11.001	11	11	10.999	10.998	10.997	10.997
11.549	11.552	11.555	11.557	11.56	11.561	11.561	11.559	11.556	11.552
90.9999	91.9997	92.9996	93.9995	94.9994	95.9993	96.9993	97.9992	98.9992	99.9991
-43.1197	-24.7001	-16.7459	-12.4716	-9.8263	-8.032	-6.7358	-5.7558	-4.9892	-4.3731

Anexo 8. Código MATLAB para a resolución dos valores de amortecemento.

```
%Neste caso imos a calcular os valores do amortecemento para o caso dos 60
%segundos
```

```
%O primeiro que facemos é crear un vector de tempos, coa frecuencia de
%muestreo que tiñamos que eran 50 Hz
tempo=0:0.02:60;
```

```
%Agora cargamos os datos dende o ficheiro de excel
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
angulo_balance=xlsread('Ensaio decaemento','Ata 60 segundos','K5:Q3005');
%lo lees

%E calculamos para cada un dos 7 ensaios os valores de máximo e mínimos e o
%seu tempo correspondente.

[Cmaxmin1,tmaxmin1,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,1));

[Cmaxmin2,tmaxmin2,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,2));

[Cmaxmin3,tmaxmin3,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,3));

[Cmaxmin4,tmaxmin4,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,4));

[Cmaxmin5,tmaxmin5,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,5));

[Cmaxmin6,tmaxmin6,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,6));

[Cmaxmin7,tmaxmin7,Tmean_cross,tcross,Tmean_osc,tupcross,tdowncross]=f_find
extr(tempo,angulo_balance(:,7));

%Creamos unha matriz cos valores absolutos dos máximos e os mínimos para
%cada un dos ensaios. Tomamos 68 para que todos os ensaios teñan os mesmos
%valores e poder construír unha matriz

Cmaxmin=[abs(Cmaxmin1(1:68)); abs(Cmaxmin2(1:68)); abs(Cmaxmin3(1:68));
abs(Cmaxmin4(1:68)); abs(Cmaxmin5(1:68)); abs(Cmaxmin6(1:68));
abs(Cmaxmin7(1:68))];

%Facemos o mesmo para os tempos correspondentes a cada máximo ou mínimo

tmaxmin=[abs(tmaxmin1(1:68)); abs(tmaxmin2(1:68)); abs(tmaxmin3(1:68));
abs(tmaxmin4(1:68)); abs(tmaxmin5(1:68)); abs(tmaxmin6(1:68));
abs(tmaxmin7(1:68))];

%Tendo estes valores agora imos a calcular o ángulo medio, o decaemento do
%ángulo e o periodo para cada parella de números en cada ensaio.

for i=1:7

    for j=1:66

        ang_medio(i,j)=(Cmaxmin(i,j)+Cmaxmin(i,j+2))/2;
        delta_ang(i,j)=Cmaxmin(i,j)-Cmaxmin(i,j+2);
        periodo(i,j)=tmaxmin(i,j+2)-tmaxmin(i,j);

    end

end
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%Finalmente construimos un vector con todos os valores de ángulo medio e
%outro vector con todos os vectores do decaemento do ángulo
ang_medio_fin=[ang_medio(:)];
delta_ang_fin=[delta_ang(:)];

%A continuación temos que tomar estes vectores anteriores, copialos en
%excel, e realizar unha gráfica con eles sendo o ángulo medio as abscisas e
%o delta do ángulo as ordenadas. Ademais, aproximamos os datos por unha
%regresión mediante un polinomio de orde 2 que pase pola orixe. Dese
%polinomio extraemos os dous valores seguintes, o termo cuadrático e o
%termo lineal para metelos a continuación.
term_cuad=input('Ingrese el valor del término cuadrático: ');
term_lin=input('Ingrese el valor del término lineal: ');

%Agora calculamos o periodo medio
Periodo_medio1=mean(periodo);
Periodo_medio2=mean(Periodo_medio1);

%Engadimos os datos necesarios para o cálculo
Escala=15;

Periodo_real=Periodo_medio2*sqrt(15);

GM=0.446;

g=9.81;

Frec_nat=2*pi/Periodo_real;

Desprazamento=184.984;

%Realizamos o cálculo coas fórmulas correspondentes

B44_a=(Desprazamento*GM*term_lin*g)/(pi*Frec_nat);

B44_b=(3*Desprazamento*GM*term_cuad*g)/(8*Frec_nat^2);
```

Anexo 9. Código MATLAB para a comparación dos ensaios de decaemento co seu modelo matemático.

```
%Frecuencia natural do buque calculada
w_nat60=0.941; %rad/s
w_nat30=0.9375;%rad/s

%Gravidade
g=9.81; %m/s^2
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%CARACTERÍSTICAS DO MFV TRIDENT
```

```
%Calado
```

```
Calado=2.507; %m
```

```
%Desprazamento
```

```
Desprazamento=184.984; %toneladas;
```

```
%KG
```

```
KG=3.263; %m
```

```
%Termos de amortiguamento sacados do ensaio de decaemento
```

```
B_44_a60=6.8714; %tm^2/s
```

```
B_44_b60=516.22;%tm^2
```

```
B_44_a30=5.909; %tm^2/s
```

```
B_44_b30=525.9965;%tm^2
```

```
%Cálculo da Masa engadida
```

```
A_44_o=xlsread('datos octopus FINAIS','Hoja1','B20:B119');
```

```
A_42_o=xlsread('datos octopus FINAIS','Hoja1','F20:F119');
```

```
A_24_o=xlsread('datos octopus FINAIS','Hoja1','J20:J119');
```

```
A_22_o=xlsread('datos octopus FINAIS','Hoja1','N20:N119');
```

```
Encounter_freq=xlsread('datos octopus FINAIS','Hoja1','A20:A119');
```

```
A_44_o_interp60=interp1(Encounter_freq,A_44_o,w_nat60,'linear');
```

```
A_42_o_interp60=interp1(Encounter_freq,A_42_o,w_nat60,'linear');
```

```
A_24_o_interp60=interp1(Encounter_freq,A_24_o,w_nat60,'linear');
```

```
A_22_o_interp60=interp1(Encounter_freq,A_22_o,w_nat60,'linear');
```

```
A_44_o_interp30=interp1(Encounter_freq,A_44_o,w_nat30,'linear');
```

```
A_42_o_interp30=interp1(Encounter_freq,A_42_o,w_nat30,'linear');
```

```
A_24_o_interp30=interp1(Encounter_freq,A_24_o,w_nat30,'linear');
```

```
A_22_o_interp30=interp1(Encounter_freq,A_22_o,w_nat30,'linear');
```

```
OG=KG-Calado;
```

```
A_44_G60=A_44_o_interp60-OG*A_42_o_interp60-  
OG*A_24_o_interp60+(OG^2)*A_22_o_interp60;%tm^2
```


14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
A_44_G30=A_44_o_interp30-OG*A_42_o_interp30-
OG*A_24_o_interp30+(OG^2)*A_22_o_interp30;%tm^2

%Altura metacéntrica
GM=0.446; %m

%Inecia seca
I_xx60=(g*Desprazamento*GM/w_nat60^2)-A_44_G60; %tm2

I_xx30=(g*Desprazamento*GM/w_nat30^2)-A_44_G30; %tm2

%Inercia total
I60 = I_xx60+A_44_G60; %tm2

I30 = I_xx30+A_44_G30; %tm2

%Lectura e almacenamento dos GZ
GZ=zeros(201,1); %gardas primeiro o espacio
GZ=xlsread('GZ','Sheet1','C8:GU8'); %Cargas os datos

Angulos_gz=-100:1:100;
Angulos_gz_rad=Angulos_gz*pi/180;

%Cargado dos datos do ensaio de decaemento

Datos_decaemento_rad=xlsread('Ensaio decaemento','Ata 60
segundos','J5:Q3005');

Datos_decaemento_grad=Datos_decaemento_rad*180/pi;

Tempo_decaemento=(0:0.02:60);

%Aquí escalamos o tempo do ensaio para poder comparalo cos datos reais que
%sairán dos cálculos do noso modelo.

Tempo_decaemento_escalado=Tempo_decaemento*sqrt(15);

for i=1:1:7

%E agora utilizando a función ode45 resolvemos a ecuación diferencial e
%obtemos a posición e a velocidade para cada instante de tempo entre 0
%e 600, coa posición inicial e a velocidade inicial nulas.
[t60,x60]=ode45(@ (t,x)
oscilacion_roll_decay60(t,x,GZ,Angulos_gz_rad,g,Desprazamento,B_44_a60,B_44
_b60,I60,GM), [0:0.02:240], [Datos_decaemento_rad(1,i),0]);

[t30,x30]=ode45(@ (t,x)
oscilacion_roll_decay30(t,x,GZ,Angulos_gz_rad,g,Desprazamento,B_44_a30,B_44
_b30,I30,GM), [0:0.02:240], [Datos_decaemento_rad(1,i),0]);
```

14. Anexos.

Pedro Ojea González

```
%Agora almacenamos os datos como valores en graos
resultado60=x60(:,1)*180/pi;
resultado30=x30(:,1)*180/pi;

%Por último ploteamos as solucións
figure
plot(t60,resultado60,'b');
hold on
plot(t30,resultado30,'k');
title(['Ensaio ',num2str(i)],'Color','k');
xlabel('Tempo');
ylabel('Escora (graos)');
hold on
plot(Tempo_decaemento_escalado,Datos_decaemento_grad(:,i),'r');
legend('Matlab 60s','Matlab 30s','Decaemento');

end
```

15 ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Defuncións dende 2011 ata 2016 por categorías de buques. Fonte: (EMSA, 2017)	8
Figura 3.1. Grados de libertad de un buque. Fonte: (“DryTank Shipping – Shipping broker company,” n.d.)	12
Figura 4.1. MFV Trident. Fotos obtidas de (Davie Tait, 2009)	20
Figura 4.2. Caixa de cadernas.	21
Figura 4.3. Disposición xeral do MFV Trident.	22
Figura 5.1. Caixa de cadernas do modelo coas seccións escollidas.	26
Figura 5.2. Modelo en 3D do buque co mallado das sección e das liñas de auga.	27
Figura 5.3. Caixa de cadernas e vista lonxitudinal no programa Octopus.	27
Figura 5.4. Caixa de cadernas e vista en planta no programa Octopus.	28
Figura 5.5. Vista 3D con mallado no programa Octopus.	28
Figura 5.6. Datos xerais do buque obtidos polo programa Octopus.	29
Figura 5.7. Gráfica do coeficiente 44 de masa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.	29
Figura 5.8. Gráfica do coeficiente 42 de masa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.	30
Figura 5.9. Gráfica do coeficiente 22 de masa engadida e amortecemento para velocidade 0 e calado 2.507 obtida polo programa Octopus.	30
Figura 5.10. Curva de GZ.	33
Figura 5.11. Gráfica para a obtención do coeficiente de pendente da onda.	33
Figura 5.12. Gráfica final para a obtención de r .	34
Figura 6.1. Canle de Experiencias hidrodinámicas.	35
Figura 6.2. Xerador de ondas.	36
Figura 6.3. Carro da canle.	36
Figura 6.4. Programas do xerador de ondas.	37
Figura 6.5. Programa MT Manager.	38
Figura 6.6. Programa WaveLab durante a adquisición de datos nun ensaio.	38
Figura 6.7. Curva de rendemento teórica para ondas regulares e para unha profundidade 1.8 m. Fonte: (Vazquez y Torres Ingeniería S.L, 2015).	39
Figura 6.8. Gráfica do erro do xerador de ondas.	41
Figura 6.9. Curva límite do xerador de ondas.	42
Figura 6.10. Disposición dos distintos elementos dentro do modelo.	43

Figura 6.11. IMU. Fonte: (Xsens Technologies B.V., 2014)	44
Figura 6.12. Características de funcionamento da IMU.	44
Figura 6.13. Características de orientación da IMU.	44
Figura 6.14. Conector USB. Fonte: (Xsens Technologies B.V., 2014)	45
Figura 7.1. Gráficas dos datos obtidos dos sete ensaios de decaemento.	48
Figura 7.2. Gráficas de decaemento fronte a ángulo medio coas súas liñas de tendencia.	50
Figura 7.3. Gráficas comparativas do modelo matemático e do ensaio de decaemento. ..	53
Figura 7.4. Zoom dos modelos matemáticos de decaemento.	54
Figura 7.5. Modelo durante a proba de estabilidade.	56
Figura 7.6. Condición de carga utilizada para o cálculo no Stability.	58
Figura 7.7. Valores do equilibrio hidrostático no Stability.	58
Figura 8.1. Ensaio de balance coa pendente 1/50 e o ratio de frecuencia 1.	63
Figura 8.2. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/200.	63
Figura 8.3. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/100.	64
Figura 8.4. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/75.	64
Figura 8.5. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/50.	65
Figura 8.6. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/30.	65
Figura 8.7. Gráfica das pendentes máximas para cada ratio de frecuencia na pendente 1/20.	65
Figura 8.8. Curvas de GZ e GM.	66
Figura 9.1. Modelo colocado na posición na que se realizan os ensaios.	68
Figura 9.2. Representación dun ensaio. Orde de esquerda a dereita e de arriba a abaixo.	70
Figura 9.3. Datos obtidos da IMU no ensaio 19 (pendente 1/50 e ratio 1).	71
Figura 9.4. Exemplos dos datos obtidos pola IMU nos ensaios.	71
Figura 9.5. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/200.	72
Figura 9.6 Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/100.	72
Figura 9.7. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/75.	73

Figura 9.8. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/50.....	73
Figura 9.9. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/30.....	73
Figura 9.10. Resultados das pendentes máximas para os ratios de frecuencia ensaiados na pendente 1/20.....	74
Figura 10.1. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/200.....	77
Figura 10.2. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/100.....	77
Figura 10.3. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/75.....	78
Figura 10.4. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/50.....	78
Figura 10.5. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/30.....	79
Figura 10.6. Gráfica comparativa dos resultados dos modelos e dos ensaios para a pendente 1/20.....	79
Figura 10.7. Gráfica de escoras máximas por cada pendente.	80

16 ÍNDICE DE TÁBOAS.

Táboa 4.1. Características principais do MFV Trident.	21
Táboa 6.1. Características principais do modelo.....	42
Táboa 7.1. Valores do período do modelo e do buque real.....	49
Táboa 7.2. Valores da frecuencia natural do modelo e do buque real.	50
Táboa 7.3. Coeficientes de extinción.	51
Táboa 7.4. Coeficientes de amortecemento.	52
Táboa 7.5. Resultados finais do ensaio de decaemento.	54
Táboa 7.6. Dimensión e pesos dos elementos utilizados na proba de estabilidade.....	55
Táboa 7.7. Ángulos de escora obtidos na proba de estabilidade.	57
Táboa 7.8. Escoras relativas e escora media.	57
Táboa 7.9. Táboa de datos para o cálculo da experiencia de estabilidade.	59
Táboa 7.10. Táboa de cálculo do KG sen pesos.	59
Táboa 7.11. Altura do centro de gravidade do buque para cada unha da distancias.	60
Táboa 7.12. GM do buque para cada unha da distancias.....	60
Táboa 8.1. Ensaio posibles na canle coa primeira proposta de pendentes.	62
Táboa 9.1. Ensaio posibles e realizados na canle de experiencias.	69
Táboa 9.2. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/200.....	74
Táboa 9.3. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/100.....	75
Táboa 9.4. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/75.	75
Táboa 9.5. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/50.	75
Táboa 9.6. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/30.	76
Táboa 9.7. Cálculo do erro da pendente para a pendente 1/20.	76

17 LISTA DE SÍMBOLOS.

\vec{s}	Vector de desprazamento do buque.
$\dot{\vec{s}}$	Vector de velocidade do buque.
$\ddot{\vec{s}}$	Vector de aceleración do buque.
x	Desprazamento lonxitudinal do buque.
y	Desprazamento transversal do buque.
z	Desprazamento en altura do buque.
ϕ	Ángulo de balance do buque.
$\dot{\phi}$	Velocidade do balance do buque.
$\ddot{\phi}$	Aceleración do balance do buque.
θ	Ángulo de cabeceo do buque.
ψ	Ángulo de guiñada do buque.
$[M]$	Matriz de masa xeneralizada.
$[A]$	Matriz de masa engadida.
$[B]$	Matriz de amortecementos
$[C_{res}]$	Matriz de coeficientes de restauración.
$\overrightarrow{F_{ext}}$	Matriz de forzas e momento exteriores.
I_{xx}	Momento de inercia con respecto ao eixo OX .
A_{44}	Coefficiente de masa engadida do balance.
B_{44}	Coefficiente de amortecemento do balance.
B_{44a}	Coefficiente de amortecemento lineal do balance.
B_{44b}	Coefficiente de amortecemento cuadrático do balance.
C_{44}	Coefficiente de restauración do balance.
M_{ox}	Momento total instantáneo debido ás ondas.
d	Función adimensional de amortecemento.
α_{eff}	Pendente de onda efectiva instantánea.
Δ	Desprazamento (m·g)
m	Peso do buque.
g	Gravidade.
GM	Altura metacéntrica transversal.
GZ	Brazo de adrizamento.
KG	Altura do centro de gravidade sobre a liña base.

16. Índice de Táboas.

Pedro Ojea González

r	Coeficiente da pendente de onda efectiva.
R	Coeficiente adimensional do brazo de adrizamento.
α_w	Pendente máxima da onda.
ω	Frecuencia de encontro coas ondas.
ψ	Fase xenérica
ω_0	Frecuencia de balance natural.
T	Período das ondas.
λ	Lonxitude de onda.
$\Delta\phi$	Decaemento.
ϕ_m	Ángulo medio de escora.
K_1/K_2	Coeficientes de extinción.
H	Altura das ondas.