



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y

Recursos Naturales

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN DE
LOS CASCOS SOBRE LA RESISTENCIA EN UN CATAMARÁN DE 32.5
METROS.**

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

ANTONIO ELICEO LUCIN SEN SANG

JORGE JAVIER CHAVEZ GASKELL

Guayaquil-Ecuador

2012

AGRADECIMIENTO

El mayor de los agradecimientos a mi madre, por darme lo mejor que se le puede dar a un hijo, “El Estudio”; y a su vez brindarme el apoyo en todo momento, a mi hermano Juan por el sustento brindado y mostrarme que el estudio da buenos frutos y mejora tu nivel de vida, a mi hermana Martha que siempre estuvo ayudándome incondicionalmente, al Ing. Rubén Morla por su ayuda económica y facilitar información para esta tesis. Y un agradecimiento exclusivo a mi director de tesis, Dr. José Marín L. por haberme permitido ser uno de sus tesis y brindarme el apoyo y comprensión durante el tiempo que llevó el desarrollo de este trabajo.

Antonio Lucín S.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser la luz que guía mi camino en mi vida; a mi familia por sus enseñanzas y constante apoyo; al Ph.D. José R. Marín López por su paciencia y orientación en el desarrollo de este trabajo; y al Ing. Rubén Morla por su ayuda económica y facilitar información para esta tesis.

Jorge Chávez G.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado se lo dedico especialmente a mis hijas, Krystel y Maitté, que fueron el motor de esta motivación, que me llevó a culminar con lo que un día quedó inconcluso. A mi esposa Yanira por brindarme todo el apoyo y darme las fuerzas necesarias cuando declinaba en continuar con mis estudios y a Daniella a quien considero una más de mis hijas por darme motivo más para esforzarme a ser mejor.

Antonio Lucín S.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

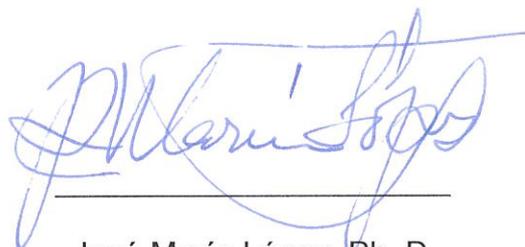
Jorge Chávez G.

TRIBUNAL DE GRADO



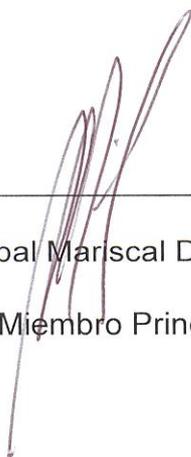
Alejandro Chanaba Ruiz, M.Sc.

Presidente del Tribunal



José Marín López, Ph. D.

Director de Tesis



Cristóbal Mariscal Díaz, M.Sc.

Miembro Principal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



Antonio Eliceo Lucín Sen Sang



Jorge Javier Chávez Gaskell

RESUMEN

En nuestro país, la separación entre los semicascos de un catamarán se la hace basandose en construcciones previas, lo que no garantiza una adecuada interacción entre ellos. Esta tesis trata de establecer pautas de cómo seleccionar esta separación de manera racional con el fin de calcular la Interferencia generada por olas entre semicascos para disminuir la Resistencia Total al Avance. La Interferencia se la calcula para el catamarán “Cormorant Evolution” de 32.5 metros de eslora, el cual presta servicios en las Islas Galápagos, por medio del método de Yokoo y Tasaki, el cual utiliza una distribución de fuentes y sumideros y considera un flujo lineal. Las variables que requiere dicho método son: la Resistencia Residual de un semicasco, las dimensiones principales, la velocidad de crucero y la separación entre los semicascos. Experimentalmente se determina la Interferencia por medio de la diferencia de dos veces la Resistencia Total de un semicasco menos la del catamarán y todo eso dividido para dos. Las

Resistencias Totales del catamarán y del semicasco se obtienen por pruebas de arrastre de un modelo desde un bote con propulsión forzada. Para el estudio realizado se tomó tres separaciones: la Original (0.561 m), una Reducida (0.505 m) y la Incrementada (0.617 m). Además se consideran dos Condiciones de Carga: Ligera y Cargada, en un rango de velocidades de uno a cuatro nudos

Teóricamente, la Interferencia entre semicascos para la velocidad equivalente a la de diseño aporta un aumento a la Resistencia Total del catamarán para todas las separaciones y condiciones de carga. La Interferencia que menos produce tal efecto es la separación Aumentada: 0.009 y 0.018 Kg para la condición Ligera y Cargada respectivamente. En cambio, Experimentalmente, la Interferencia produjo un decremento a la Resistencia Total. Lo que significa una mayor disminución a la Resistencia Total para la velocidad equivalente a la de diseño fue en la separación Original: -0.167 y -0.032 Kg para la condición Ligera y Cargada respectivamente. Entonces, en función de los resultados experimentales se concluye, que para el catamarán de diseño ecuatoriano "Cormorant Evolution" de 32.5 metros de eslora, se eligió una correcta separación entre semicascos.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VII
INDICE GENERAL	IX
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE FIGURAS	XV
INDICE DE APENDICES.....	XX
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I:	4
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE KOICHI Y TASAKI PARA EL CÁLCULO DE LA INTERFERENCIA.....	4
1.1 Descripción del Buque Prototipo y del Modelo.	4
1.2 Cálculo de la Resistencia de un Casco, Empleando el Método de Holtrop.	10
1.3 Descripción del Método de Yokoo y Tasaki para el Cálculo de la Interferencia.....	16

1.4 Cálculo de la Resistencia de Interferencia del Modelo.....	20
1.5 Cálculo de la Resistencia Total.....	26
CAPITULO II:	31
CALCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE PRUEBAS CON MODELO	31
2.1 Prueba de un Semicasco con Distintas Condiciones de Carga.	31
2.2 Prueba del Catamarán con Distintas Separaciones de Semicascos, Condiciones de Carga y de Velocidad.....	42
2.3 Resumen de Resultados Experimentales.....	48
CAPITULO III:	55
COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS POR LOS MÉTODOS EXPERIMENTAL Y TEÓRICO.....	55
3.1 Cálculo de la Componente Residual Experimental.....	55
3.2 Calculo de la Interferencia Experimental entre Semicascos.	60
3.3 Comparación de Resultados Teóricos y Experimentales de la Interferencia.....	67
Cálculo de la Interferencia del Prototipo.	73
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES	83
APÉNDICES	84

INDICE DE TABLAS

TABLA NO. I CONDICIONES DE CARGA DEL MODELO Y EL PROTOTIPO.	9
TABLA NO. II NOMENCLATURA DEL MÉTODO DE HOLTROP.	11
TABLA NO. III RESTRICCIONES DEL MÉTODO DE HOLTROP.	11
TABLA NO. IV RELACIONES PARA LAS RESTRICCIONES DEL MÉTODO DE HOLTROP.	12
TABLA NO. V VARIABLES DE ENTRADA DEL MÉTODO DE HOLTROP..	13
TABLA NO. VI RESISTENCIA AL AVANCE DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA.	14
TABLA NO. VII RESISTENCIA AL AVANCE DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN CARGADA.	14
TABLA NO. VIII VARIABLE DEL MÉTODO DE YOKOO Y TASAKI.	18
TABLA NO. IX INTERFERENCIA PARA LA SEPARACIÓN REDUCIDA (0.505 M.)	22
TABLA NO. X INTERFERENCIA PARA LA SEPARACIÓN ORIGINAL (0.561 M.).....	23

TABLA NO. XI INTERFERENCIA PARA SEPARACIÓN INCREMENTADA (0.617 M.)	
TABLA NO. XII RESISTENCIA TOTAL PARA LA CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON UNA SEPARACIÓN REDUCIDA (0.505 M.).....	27
TABLA NO. XIII RESISTENCIA TOTAL PARA LA CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON LA SEPARACIÓN ORIGINAL (0.561 M.).....	28
TABLA NO. XIV RESISTENCIA TOTAL PARA LA CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON UNA SEPARACIÓN INCREMENTADA (0.617 M.)....	29
TABLA NO. XV EQUIPOS UTILIZADOS PARA LAS PRUEBAS.	35
TABLA NO. XVI PESOS AÑADIDOS AL MODELO EN CONDICIÓN LIGERA.....	38
TABLA NO. XVII PESOS AÑADIDOS AL MODELO EN CONDICIÓN CARGADA.....	39
TABLA NO. XVIII CALADOS SEGÚN SU CONDICIÓN DE CARGA.	39
TABLA NO. XIX PRUEBA DEL MODELO DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA.....	41
TABLA NO. XX PRUEBA DEL MODELO DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN CARGADA.....	41
TABLA NO. XXI PESOS INCORPORADOS AL CATAMARÁN EN [KG], SEGÚN LA CONDICIÓN DE CARGA.....	44
TABLA NO. XXII PESOS TOTALES Y CALADOS SEGÚN SU CONDICIÓN Y SEPARACIÓN DE SEMICASCOS.....	45

TABLA NO. XXIII RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON LA SEPARACIÓN REDUCIDA.	46
TABLA NO. XXIV RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON LA SEPARACIÓN ORIGINAL.	46
TABLA NO. XXV RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON LA SEPARACIÓN AUMENTADA.	47
TABLA NO. XXVI COEFICIENTES CUADRÁTICOS Y FACTOR DE CORRELACIÓN PARA LAS DISTINTAS SEPARACIONES Y CONDICIONES DE CARGA.	52
TABLA NO. XXVII RESISTENCIA RESIDUAL EXPERIMENTAL DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA.....	58
TABLA NO. XXVIII RESISTENCIA RESIDUAL EXPERIMENTAL DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN CARGADA	58
TABLA NO. XXIX RESISTENCIA TOTAL EXPERIMENTAL PARA CADA CONDICIÓN Y LAS SEPARACIONES ENTRE SEMICASCOS.	61
TABLA NO. XXX INTERFERENCIA EXPERIMENTAL PARA CADA CONDICIÓN Y SEPARACIÓN.....	62
TABLA NO. XXXI INTERFERENCIA TEÓRICA USANDO EL MÉTODO DE YOKOO Y TASAKI.	68

TABLA NO. XXXII INTERFERENCIA EXPERIMENTAL.....	69
TABLA NO. XXXIII INTERFERENCIA PARA EL BUQUE PROTOTIPO	75
TABLA A - 1 COMPARACIÓN DEL LCG DISEÑO Y MODELO.....	87
TABLA C - 1 RESULTADOS PARA CONDICIÓN LIGERA.....	90
TABLA C - 2 RESULTADOS PARA CONDICIÓN CARGADA.....	91
TABLA D - 1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE SOUTHAMPTON Y DEL MODELO PRESENTE.....	101
TABLA D - 2 RESISTENCIA TOTAL E INTERFERENCIA DEL MODELO 4B	101
TABLA D - 3 INTERFERENCIA ENTRE SEMICASCOS PARA LA SEPARACIÓN ORIGINAL DEL MODELO “CORMORANT EVOLUTION”.	102

INDICE DE FIGURAS

FIGURA NO. 1 PLANO DE FORMAS DE “CORMORANT EVOLUTION”	7
FIGURA NO. 2 VISTA EN 3D DEL MODELO.....	8
FIGURA NO. 3 RESISTENCIA TOTAL DEL MODELO DE UN SEMICASCO VS VELOCIDAD	15
FIGURA NO. 4 SISTEMA DE COORDENADAS.	17
FIGURA NO. 5 GRÁFICA DE LA INTERFERENCIA SOBRE LA RESISTENCIA RESIDUAL VS EL NÚMERO DE FROUDE.....	21
FIGURA NO. 6 INTERFERENCIA VS NUM. FROUDE CON UNA SEPARACIÓN REDUCIDA (0.505 M.)	23
FIGURA NO. 7 INTERFERENCIA VS NUM. FROUDE CON UNA SEPARACIÓN ORIGINAL (0.561 M.).....	24
FIGURA NO. 8 INTERFERENCIA VS NUM. FROUDE CON UNA SEPARACIÓN INCREMENTADA (0.617 M.)	25
FIGURA NO. 9 RESISTENCIA TOTAL VS VELOCIDAD CON UNA SEPARACIÓN REDUCIDA (0.505 M.)	27
FIGURA NO. 10 RESISTENCIA TOTAL VS VELOCIDAD CON LA SEPARACIÓN ORIGINAL (0.561 M.).....	28
FIGURA NO. 11 RESISTENCIA TOTAL VS VELOCIDAD CON UNA SEPARACIÓN INCREMENTADA (0.617 M.)	29

FIGURA NO. 12 BOTE UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS.....	32
FIGURA NO. 13 ESTIMULADORES DE TURBULENCIA.....	34
FIGURA NO. 14 EQUIPOS UTILIZADOS PARA LAS PRUEBAS.	36
FIGURA NO. 15 DETERMINACIÓN DEL PESO Y LCG DEL MODELO LIGERO UTILIZADO PARA LAS PRUEBAS.....	38
FIGURA NO. 16 ARRASTRE DEL SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA.	40
FIGURA NO. 17 VISTA DEL CATAMARÁN CON SEPARACIÓN REDUCIDA (50.5 CM).....	42
FIGURA NO. 18 VISTA DEL CATAMARÁN CON SEPARACIÓN ORIGINAL (56.1CM).....	43
FIGURA NO. 19 VISTA DEL CATAMARÁN CON SEPARACIÓN AUMENTADA (61.7CM).....	43
FIGURA NO. 20 ARRASTRE DEL CATAMARÁN EN CONDICIÓN CARGADA.....	45
FIGURA NO. 21 RESISTENCIA DEL SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA.	49
FIGURA NO. 22 RESISTENCIA DEL CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON SEPARACIÓN REDUCIDA.....	50
FIGURA NO. 23 RESISTENCIA DEL CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON SEPARACIÓN ORIGINAL.....	50

FIGURA NO. 24 RESISTENCIA DEL CATAMARÁN EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA CON SEPARACIÓN AUMENTADA.	51
FIGURA NO. 25 VELOCIDAD DEL VIENTO EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA DEL SEMICASCO	53
FIGURA NO. 26 VELOCIDAD DEL VIENTO EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA DEL CATAMARÁN CON SEPARACIÓN REDUCIDA.	53
FIGURA NO. 27 VELOCIDAD DEL VIENTO EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA DEL	54
FIGURA NO. 28 VELOCIDAD DEL VIENTO EN CONDICIÓN LIGERA Y CARGADA DEL	54
FIGURA NO. 29 RESISTENCIA RESIDUAL EXPERIMENTAL VS VELOCIDAD DE UN SEMICASCO.....	59
FIGURA NO. 30 GRÁFICA DE LA INTERFERENCIA VS NÚMERO DE FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA LIGERA.	63
FIGURA NO. 31 GRÁFICA DE LA INTERFERENCIA VS NÚMERO DE FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA CARGADA.	64
FIGURA NO. 32 INTERFERENCIAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS VS NUM. FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA LIGERA.....	70
FIGURA NO. 33 INTERFERENCIAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS VS NUM. FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA CARGADO.....	71
FIGURA NO. 34 INTERFERENCIA DEL BUQUE PROTOTIPO VS NÚMERO DE FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA LIGERA.....	76

FIGURA NO. 35 INTERFERENCIA DEL BUQUE PROTOTIPO VS NÚMERO DE FROUDE PARA LA CONDICIÓN DE CARGA CARGADO.....	77
FIGURA A - 1 CÁLCULO DEL LCG DEL MODELO.....	85
FIGURA B - 1 ESQUEMA DE UBICACIÓN DE ESTIMULADORES DE TURBULENCIA.	88
FIGURA B - 2 CÁLCULO DE LA UBICACIÓN DE LOS ESTIMULADORES DE TURBULENCIA.....	89
FIGURA C - 1 FUERZAS REGISTRADAS DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN LIGERA A VELOCIDADES (0, 1.05, 1.2, 1.45 M/SEG)....	92
FIGURA C - 2 FUERZAS REGISTRADAS DE UN SEMICASCO EN CONDICIÓN CARGADA A VELOCIDADES (0, 1.03, 1.23, 1.45 M/SEG).	93
FIGURA C - 3 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN EN SEPARACIÓN AUMENTADA CONDICIÓN LIGERA A VELOCIDADES (0, 1.04, 1.36, 1.56 M/SEG).	94
FIGURA C - 4 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN EN SEPARACIÓN AUMENTADA CONDICIÓN CARGADA A VELOCIDADES (0, 1.04, 1.36, 1.56 M/SEG).....	95
FIGURA C - 5 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN EN SEPARACIÓN REDUCIDA CONDICIÓN LIGERA A VELOCIDADES (0, 1.06, 1.2, 1.44 M/SEG).....	96

FIGURA C - 6 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN SEPARACIÓN REDUCIDA CONDICIÓN CARGADA A VELOCIDADES (0, 1.04, 1.21, 1.48 M/SEG).	97
FIGURA C - 7 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN EN SEPARACIÓN ORIGINAL CONDICIÓN LIGERA A VELOCIDADES (0, 1.05, 1.26, 1.47 M/SEG).....	98
FIGURA C - 8 FUERZAS REGISTRADAS DE UN CATAMARÁN EN SEPARACIÓN ORIGINAL CONDICIÓN CARGADA A VELOCIDADES (0, 1.05, 1.26, 1.47 M/SEG).	99
FIGURA D - 1 INTERFERENCIA ENTRE SEMICASCOS VS NÚMERO DE FROUDE.....	103
FIGURA E - 1 PORCENTAJE DE INTERFERENCIA PARA LAS DISTINTAS SEPARACIONES	103
FIGURA E - 2 CÁLCULO DE LA MENOR INTERFERENCIA	103

INDICE DE APENDICES

APÉNDICE A

CALCULO EXPERIMENTAL DEL LCG DEL MODELO DE UN SEMICASCO.....	85
--	----

APÉNDICE B

UBICACIÓN Y DIMENSIONES DE LOS ESTIMULADORES DE TURBULENCIA.....	88
--	----

APÉNDICE C

RESULTADOS EXPERIMENTALES	90
---------------------------------	----

APENDICE D

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON UN TRABAJO DE LA UNIVERSIDAD DE SOUTHAMPTON	100
--	-----

APENDICE E

EJEMPLO PRÁCTICO PARA ENCONTRAR LA SEPARACIÓN ENTRE SEMICASCOS EN UN CATAMARÁN.....	100
---	-----

INTRODUCCION

Debido a la importancia del turismo en Las Islas Galápagos se ha desarrollado en el país la construcción en serie de catamaranes los cuales tienen una gran extensión de cubierta y una buena estabilidad. Junto a este crecimiento, las exigencias ambientales en las Islas son cada vez más estrictas por lo que los ingenieros navales tienen la necesidad de construir embarcaciones que consuman menor cantidad de combustible disminuyendo así las emisiones de CO₂ y también los costos operativos de los buques.

Para calcular la resistencia al avance de una embarcación, el método más confiable es mediante pruebas con modelos, dado que los otros procedimientos: Analíticos y Numéricos son extremadamente complejos. En el caso de los catamaranes, además de la resistencia al avance de cada casco, existe una componente de Interferencia producida por la superposición de los sistemas de olas generadas por cada uno de ellos y por la alteración del flujo sobre un casco producida por la presencia del otro. Esta interferencia depende en gran medida de la separación de los cascos y de la velocidad de la embarcación, por lo que es importante determinar racionalmente la separación entre cascos durante su diseño.

Dado que en nuestro país no existe un tanque de pruebas, las estimaciones propulsivas de los buques se han desarrollado con ecuaciones de regresión, basadas en ensayos con modelos, por ejemplo Holtrop. Una alternativa sería el realizar pruebas al aire libre con una lancha a la que se le instale un brazo mecánico desde donde se hale el modelo. Este método tendría ciertos inconvenientes que enfrentar, entre ellos está la influencia del viento, los movimientos de la lancha que afectan los asentamientos del modelo y la dirección de la fuerza de arrastre; estos inconvenientes se los debería verificar detenidamente en las pruebas, a fin de minimizarlos.

Objetivo General

Estudiar, mediante pruebas con un modelo, la variación de la componente de Interferencia de la resistencia entre los cascos de un catamarán usando un modelo de la embarcación Cormorant Evolution.

Objetivos Específicos

- Aplicar el método de Koichi Yokoo y Ryo Tasaki, para calcular la interferencia entre cascos del catamarán Cormorant Evolution.

- Analizar mediante pruebas con un modelo la resistencia al avance con distintas separaciones entre cascos de un catamarán de diseño nacional de 32,5 m de eslora.
- Comparar los resultados de la Interferencia por olas generadas entre los cascos de un catamarán mediante los métodos experimental y teórico.

Beneficios

En nuestro país, la separación entre los cascos se la estima basada en construcciones previas, lo que no garantiza una adecuada interacción entre ellos. Esta tesis nos dará pautas de cómo seleccionar esta separación de manera racional a fin de disminuir la resistencia al avance, obteniendo así un menor consumo de combustible que significa un ahorro significativo para el armador y a la larga una contribución para el medio ambiente.

CAPITULO I:

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE KOICHI Y TASAKI PARA EL CÁLCULO
DE LA INTERFERENCIA**

1.1 Descripción del Buque Prototipo y del Modelo.

En este subcapítulo se describe la embarcación tipo catamarán, [1], analizada en esta tesis, la cual fue construida últimamente en el país y presta servicios de turismo en las Islas Galápagos; en su totalidad fue hecha con fibra de vidrio y tiene una eslora total de 32.5 metros. Además posee un Bulbo de proa y la Sección Media tiene forma de V, con dos chinás. La

velocidad de crucero de la embarcación es de 10 nudos. Finalmente se describe hidrostáticamente el modelo de 2 metros de eslora (9.54 kg), con el que se desarrollará el trabajo experimental.

El turismo es la fuente más importante de ingresos para los habitantes de las Islas Galápagos. Todas las demás actividades en las Islas están directa o indirectamente relacionadas al negocio del turismo. Este se desarrolla con mucha intensidad ya que la cifra de visitantes a Galápagos llega cerca de los 200.000 turistas por año por lo que existen más de 60 embarcaciones de diferentes compañías que prestan dicho servicio. La embarcación analizada en este trabajo es un catamarán cuyo nombre es "Cormorant Evolution", [1], destinado a la actividad turística en Galápagos; fue construido por la empresa "Astillero y Marina BOTTO CIA. LTDA", quien facilitó los planos para este estudio.

El catamarán analizado, [1], tiene una Eslora total de 32.5 metros, Manga de 12.5 metros, un Puntal en Sección Media de 3.52 metros y Calado de diseño de 1.4 metros. La separación entre los cascos es de 9.11 metros entre líneas de crujías y la manga de un casco es de 3.09 metros. La sección Media tiene forma de V, con un coeficiente de 0.767. La embarcación tiene dos chinás, Bulbo en proa, un coeficiente de bloque de 0.567 y un LCB de -1.229 metros con respecto de Sección Media (positivo hacia proa). El desplazamiento de un casco del catamarán es de 58.52 toneladas y la

velocidad de diseño es de 10 nudos que corresponde a un número de Froude de 0.298. A continuación se muestran las formas de la embarcación:

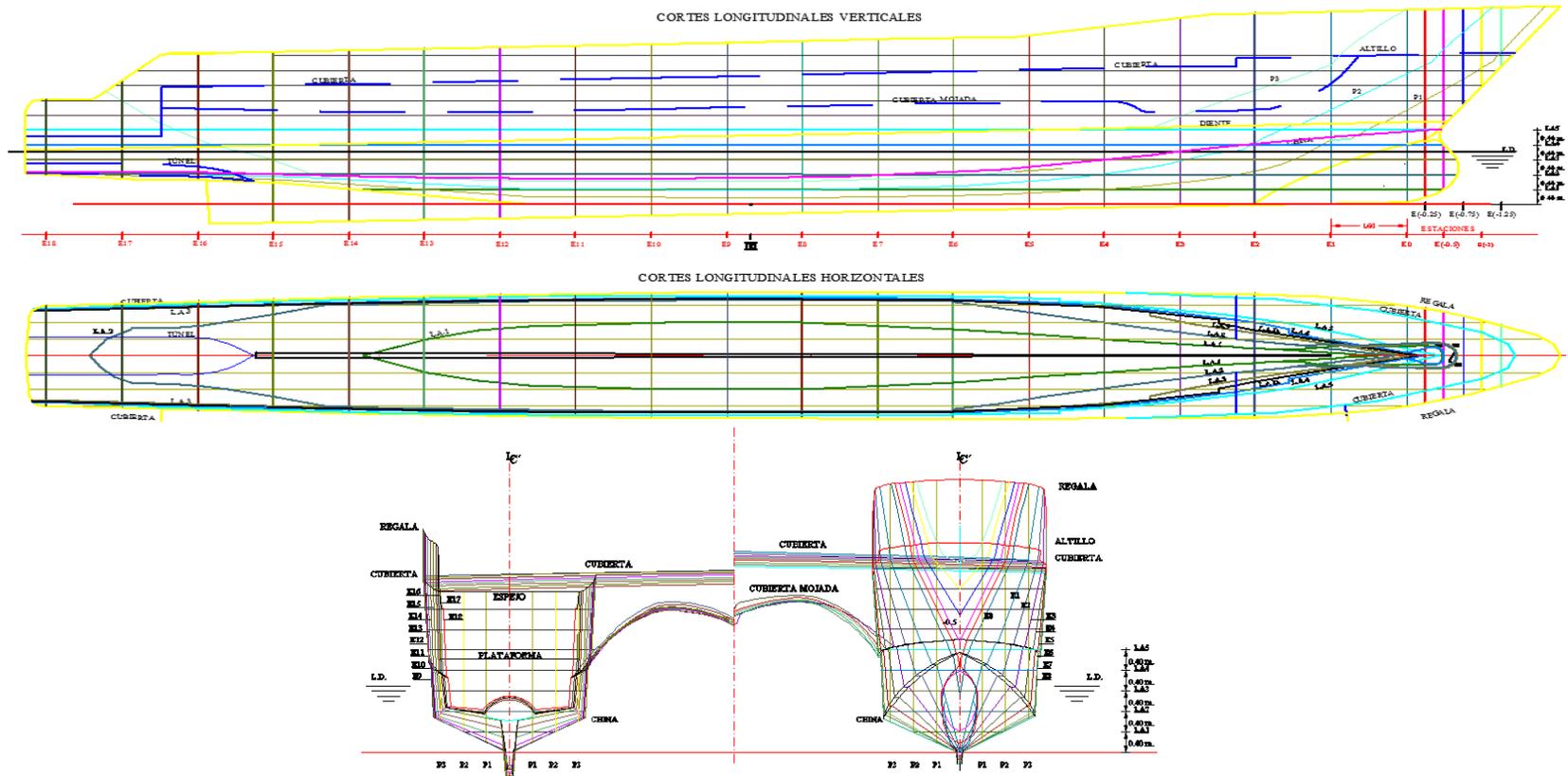


Figura No. 1 Plano de Formas de "Cormorant Evolution", [7]

A partir del buque prototipo se construye un modelo para el trabajo experimental. El rango de velocidad a trabajar del modelo es de 1 a 4 nudos, que corresponde al rango de velocidad del bote que arrastra el modelo. Luego, igualando el número de Froude del modelo y el buque Prototipo, se obtuvo que la eslora del modelo deba de ser de 2 metros aproximadamente. Entonces, la razón de escala es $\lambda=16.25$.

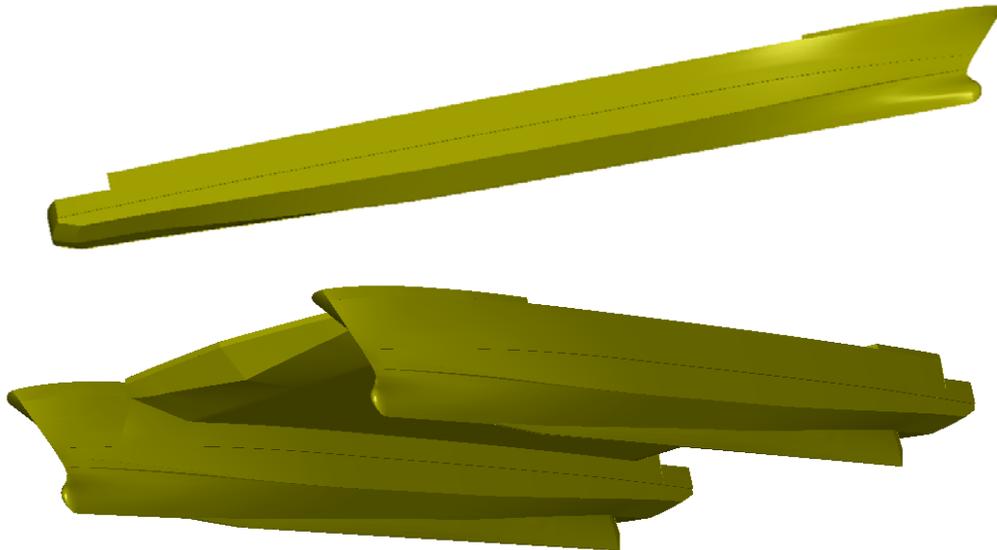


Figura No. 2 Vista en 3D del modelo

Para el estudio experimental se consideran dos condiciones de carga: una Ligera y otra Cargada. En el siguiente cuadro se muestran las características hidrostáticas en las condiciones descritas para el buque prototipo y el modelo:

ITEM	SÍMB.	UNID.	LIGERA		CARGADA	
			BUQUE	MOD.	BUQUE	MOD.
Eslora Total	L	M	32.5	2.00	32.5	2.00
Eslora en flotación	Lwl	M	30.21	1.87	30.42	1.89
Manga del Catamarán	B _{cat}	M	12.2	0.751	12.2	0.751
Manga de un casco	B	M	3.09	0.19	3.09	0,19
Sep. entre L. de Crujía	2kl	M	9.11	0.561	9.11	0.561
Puntal	D	M	3.52	0.22	3.52	0.22
Calado	T	M	1.4	0.086	1.66	0.103
Desplazamiento	Δ	ton	58.52	0.018	78.74	0.024
Volumen	Vol	m ³	57.09	0.018	76.84	0.023
Superficie Mojada	S	m ²	115.39	0.51	131.99	0.56
LCB(c.r.a S.Med.)+pr	LCB	M	-1.229	-0.04	0.815	-0.04
Velocidad	V	nudos	10.00	2.48	10.00	2.48
Número de Froude	F _n		0.298	0.298	0.296	0.296
Coefficiente Bloque	C _b		0.567	0.567	0.604	0.604
Coefficiente de S.M.	C _m		0.739	0.739	0.756	0.756
Coefficiente Prismático	C _{pl}		0.767	0.767	0.798	0.798

Tabla No. I Condiciones de carga del modelo y el prototipo.

1.2 Cálculo de la Resistencia de un Casco, empleando el Método de Holtrop.

Se describe el método empírico de Holtrop que en este trabajo se usa para calcular la resistencia al avance, [2], el cual está basado en regresiones a partir de resultados de pruebas con modelos, y que fue implementado en un programa desarrollado en Visual Fortran, [3]. El método incluye el cálculo de la influencia generada por el bulbo en base al área transversal y la posición vertical de su centroide. Aplicando el programa mencionado, [3], se calcula la resistencia total y sus componentes para el modelo de un casco del catamarán, en un rango de velocidades de 1 a 4 nudos, y, en dos condiciones de carga (Ligera y Cargada); finalmente se obtiene en condición Cargada a la velocidad equivalente de diseño 2.48 nudos un valor de 0.38 kg, y para condición Ligera a la misma velocidad, 0.3 kg.

Para el cálculo de la resistencia total, Holtrop, [2], la subdivide en las siguientes componentes:

$$R_{total} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_{OW} + R_B + R_{TR} + R_A$$

En donde:

$(1+k_1)R_F$	Resistencia Friccional acorde a ITTC-1957, [1]
$1+k_1$	Coefficiente de Forma del Casco
R_{APP}	Resistencia de los Apéndices
R_{OW}	Resistencia producida por Olas
R_B	Resistencia generada por el Bulbo
R_{TR}	Resistencia generada por la inmersión del Espejo
R_A	Resistencia por correlación Modelo-Buque

Tabla No. II Nomenclatura del método de Holtrop.

El método de Holtrop tiene un rango de aplicación de acuerdo a los modelos en los que se basan las regresiones; al salirse del mismo sus resultados se vuelven poco confiables. Los rangos para la aplicación del método de Holtrop son, [4]:

Tipo de barco	Máximo	C_p		L/B		B/T	
	<i>Fn</i>	<i>Mín.</i>	<i>Max.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Max.</i>	<i>Mín.</i>	<i>Max.</i>
<i>Tanqueros , Graneleros</i>	0.24	0.73	0.85	5.10	7.10	2.40	3.20
<i>Remolcadores</i>	0.38	0.55	0.65	3.90	6.30	2.10	3.00
<i>Portacontenedores, Destruyores</i>	0.45	0.55	0.67	6.00	9.50	3.00	4.00
<i>Cargueros</i>	0.30	0.56	0.75	5.30	8.00	2.40	4.00
<i>Buques roll-on roll-off y Ferries</i>	0.35	0.55	0.67	5.30	8.00	3.20	4.00

Tabla No. III Restricciones del Método de Holtrop, [1]

Con los datos del catamarán al que se le va a realizar el estudio en las dos condiciones de carga se tienen los siguientes parámetros, que se comparan con los buques de tipo portacontenedores y destructores:

	Cond. Ligera	Cond. Cargada	Rango de Aplicación
Cp	0.739	0.756	0.55 - 0.67
L/B	9.86	9.43	6.00 - 9.50
B/T	2.21	2.14	3.00 - 4.00

Tabla No. IV Relaciones para las restricciones del Método de Holtrop.

Aunque algunos parámetros de la embarcación no se encuentren dentro del rango de aplicación, se emplea el método de Holtrop para la estimación de la resistencia al avance por su amplio uso en nuestro medio.

Para la implementación del método de Holtrop se utilizó el compilador Visual Fortran para preparar un programa de computación como parte de un proyecto de un curso de la FIMCBOR, [3]. La ejecución se la realiza leyendo los datos desde un archivo de texto, y al final entrega un archivo de resultados con las diferentes resistencias para las velocidades requeridas.

Las variables de entrada necesarias para la ejecución del programa son:

ITEM	DESCRIPCION	Ligera	Cargada	UNID.
L	Eslora en Flotación	1,873	1,886	M
B	Manga en Flotación	0,19	0,22	M
T	Calado	0,086	0,103	M
Vol	Volumen Sumergido	0,018	0,023	M ³
Smoj	Superficie Mojada	0,509	0,57	M ²
Cb	Coefficiente de Bloque	0,567	0,604	--
Cp	Coefficiente Prismático	0,739	0,756	--
CM	Coefficiente de Sección Media	0,767	0,798	--
CWL	Coefficiente de Plano de Flotación	0,839	0,855	--
LCB	Centro de Boyantez Longitudinal en porcentaje (con respecto a Sec. Media) + proa	1,929	2,274	%
AT	Área del Espejo Sumergida	0,004	0,007	M ²
ABT	Área Transversal del Bulbo	0,003	0,003	M ²
IPOPA	Forma del espejo	3	3	--
HB	Posición Vertical del centroide del Bulbo desde la línea base	0,063	0,063	M
TF	Calado en proa	0,086	0,103	M
TA	Calado en popa	0,086	0,103	M
I _E	Angulo de Entrada del Plano de Flotación	16	16	°
UK2	Factor K2 (para apéndices)	0	0	--
SAPEN	Superficie Total de Apéndices	0	0	M ²
IGUA	Densidad del agua (1 coge las por defecto del agua salada a 25° o 0 uno las ingresa)	1	1	--
VDISENO	Velocidad de Avance	2,48	2,48	NUDOS

Tabla No. V Variables de entrada del método de Holtrop.

Luego de ejecutar el programa, se obtuvieron los siguientes resultados para un casco del catamarán:

CONDICION LIGERA						
Velocidad (NUDOS)	Rest. Fricc. (Kg.)	Rest. Olas (Kg.)	Rest. Trans. (Kg.)	Rest. Bulbo (Kg.)	Rest. Corr. (Kg.)	Rest. Total (Kg.)
1,86	0,121	0,006	0,023	2,29E-06	0,020	0,170
1,98	0,136	0,009	0,025	2,37E-06	0,023	0,193
2,11	0,152	0,012	0,027	2,44E-06	0,025	0,216
2,23	0,168	0,017	0,028	2,50E-06	0,029	0,242
2,36	0,185	0,023	0,030	2,56E-06	0,032	0,271
2,48	0,203	0,030	0,031	2,61E-06	0,035	0,300
2,60	0,222	0,034	0,033	2,65E-06	0,039	0,328
2,73	0,241	0,037	0,034	2,69E-06	0,043	0,354
2,85	0,261	0,040	0,034	2,73E-06	0,047	0,382
2,98	0,282	0,045	0,035	2,76E-06	0,051	0,413
3,10	0,304	0,054	0,035	2,79E-06	0,055	0,447
3,22	0,326	0,067	0,035	2,82E-06	0,060	0,487
3,35	0,349	0,085	0,034	2,85E-06	0,064	0,532
3,47	0,373	0,108	0,033	2,87E-06	0,069	0,583
3,60	0,397	0,132	0,031	2,89E-06	0,074	0,635
3,72	0,422	0,158	0,029	2,91E-06	0,079	0,689

Tabla No. VI Resistencia al avance de un semicasco en Condición Ligera

CONDICION CARGADA						
Velocidad (NUDOS)	Rest. Fricc. (Kg.)	Rest. Olas (Kg.)	Rest. Trans. (Kg.)	Rest. Bulbo (Kg.)	Rest. Corr. (Kg.)	Rest. Total (Kg.)
1,86	0,138	0,008	0,046	1,64E-09	0,022	0,214
1,98	0,155	0,011	0,051	1,75E-09	0,025	0,243
2,11	0,173	0,015	0,055	1,85E-09	0,029	0,272
2,23	0,192	0,021	0,060	1,95E-09	0,032	0,305
2,36	0,211	0,030	0,065	2,04E-09	0,036	0,341
2,48	0,232	0,040	0,069	2,12E-09	0,039	0,380
2,60	0,253	0,048	0,074	2,20E-09	0,043	0,417
2,73	0,275	0,052	0,078	2,27E-09	0,048	0,452
2,85	0,298	0,055	0,082	2,34E-09	0,052	0,487
2,98	0,322	0,061	0,085	2,40E-09	0,057	0,524
3,10	0,346	0,070	0,089	2,46E-09	0,062	0,566
3,22	0,371	0,085	0,092	2,51E-09	0,067	0,615
3,35	0,398	0,107	0,094	2,56E-09	0,072	0,671
3,47	0,425	0,137	0,096	2,61E-09	0,077	0,736
3,60	0,452	0,170	0,098	2,65E-09	0,083	0,803
3,72	0,481	0,204	0,099	2,69E-09	0,089	0,874

Tabla No. VII Resistencia al avance de un semicasco en condición Cargada

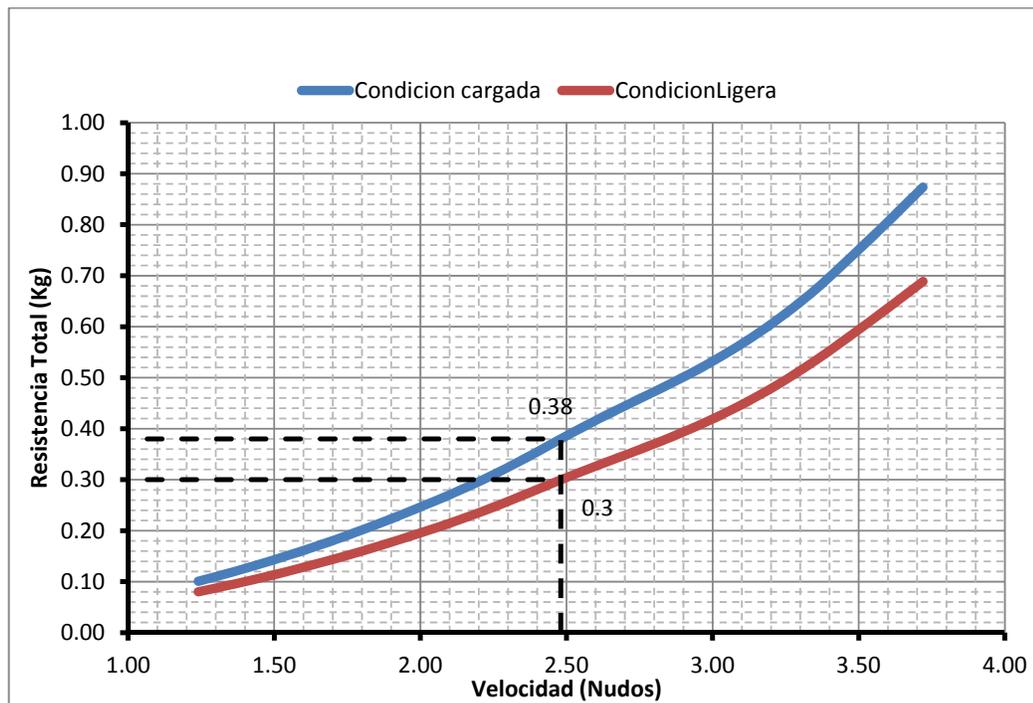


Figura No. 3 Resistencia Total del modelo de un semicasco vs Velocidad

En el presente caso la velocidad de diseño del modelo es de 2.48⁽¹⁾ nudos, por lo que la resistencia Total en condición Ligera es de 0.3 Kg y Cargada es 0.38 Kg.

⁽¹⁾ Velocidad equivalente a 10 nudos en el buque prototipo, de acuerdo al número de Froude

1.3 Descripción del Método de Yokoo y Tasaki para el Cálculo de la Interferencia.

La Interferencia investigada en esta tesis es producida por los trenes de olas de cada semicasco, que al interactuar entre sí generan una reducción o un aumento de la resistencia residual total de todo el catamarán. Yokoo y Tasaki, [5] y [6], desarrollaron un proceso analítico que resuelve el flujo potencial para calcular la Interferencia entre semicascos de un catamarán. Las variables que se utilizan para estimar dicho parámetro son: la resistencia residual de un semicasco, las dimensiones principales, la velocidad de crucero y la separación entre los semicascos.

La resistencia producida por la generación de olas en los catamaranes, se puede obtener mediante la superposición de los potenciales de velocidad, o bien por patrones de onda libre suponiendo que las condiciones de frontera de un semicasco del catamarán no interfieren con la del otro. Con todas estas suposiciones según Aláez, [7], los resultados de Yokoo y Tasaki no difieren mucho con las obtenidas experimentalmente por otros investigadores, y por ello será usado este método para el presente trabajo. El sistema de referencia a usar para resolver el flujo potencial se presenta en la figura 4:

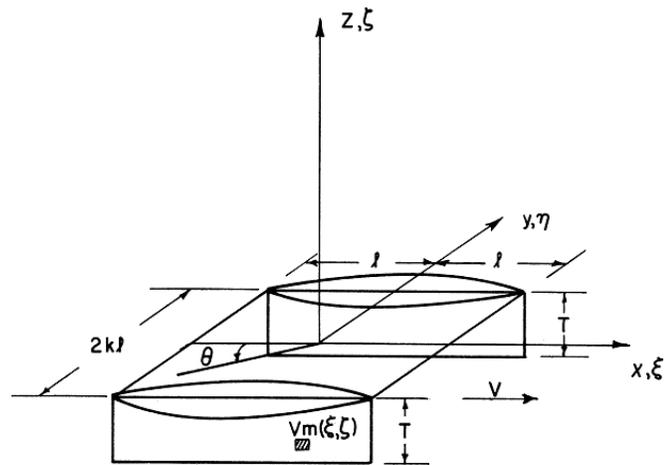


Figura No. 4 Sistema de coordenadas, [5].

El origen del sistema de coordenadas se encuentra en la sección Media, a la altura del plano de flotación y en línea de crujía del catamarán. El eje x del sistema de coordenadas apunta en la dirección de avance, el eje y hacia estribor, y, el eje z se dirige hacia arriba.

Yooko y Tasaki, [5] y [6], describen la resistencia Residual como:

$$R_{2w} = 2R_{ow} + 2R_w$$

donde:

R_{2w} : es la Resistencia Residual del catamarán

R_{ow} : es la Resistencia Residual de un semicasco.

R_w : es la Interferencia de un semicasco.

A su vez, para calcular la Componente Residual, [5] y [6], se utiliza la siguiente terminología:

2l	Eslora del buque; 2l = L
T	Calado del catamarán
B	Manga de un casco
2kl	Distancia entre las líneas de crujía de cada casco
r	Densidad del fluido
Ko	g/V ²
V	Velocidad de avance.
F	Número de Froude
θ	Dirección de propagación del flujo
m(ξ,η,ζ):	Distribución de poder de la fuente ⁽²⁾
ξ	x/l
ζ	y/l
t	T/l

Tabla No. VIII Variable del método de Yokoo y Tasaki.

donde:

$$P = \int_{-t}^0 d\zeta \int_{-1}^1 m(\xi, 0, \zeta) e^{(K_o \zeta \sec^2 \theta)} \frac{\cos(K_o \xi \sec \theta)}{\sin(K_o \xi \sec \theta)} d\xi$$

$$R_{ow} = \frac{\phi K_o^2 V^2 L^2}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (P^2 + Q^2) \sec^3 \theta d\theta$$

$$R_w = \frac{\phi K_o^2 V^2 L^2}{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos(2K_o k \sec^2 \theta \sin \theta) (P^2 + Q^2) \sec^3 \theta d\theta$$

⁽²⁾ Del Inglés "source strength"

La distribución de poder de la fuente es asumida como lineal:

$$m(\xi, \eta, \zeta) = m(\xi, 0, \zeta)$$

$$m(\xi, \eta, \zeta) = 4 \frac{B}{L} \xi,$$

dónde:

$$-1 \leq \xi \leq 1$$

$$-t \leq \zeta \leq 0$$

$$\eta = 0$$

Y para:

$$m(\xi, \eta, \zeta) = 0,$$

dónde:

$$-1 \leq \xi \leq 1$$

$$-t \leq \zeta \leq 0$$

$$\eta \neq 0.$$

1.4 Cálculo de la Resistencia de Interferencia del Modelo.

Para el cálculo de la Interferencia entre los trenes de olas se utiliza una gráfica que presenta la razón entre dicho parámetro y la resistencia residual de un casco, en forma de porcentaje, [5] y [6]. Las variables que se necesitan son: la separación relativa entre semicascos y el número de Froude. La Interferencia entre los semicascos del modelo se la calcula para las condiciones de carga consideradas, y con varias separaciones entre los semicascos: la original, una reducida y otra aumentada, obteniéndose para la velocidad de diseño en las dos condiciones de carga y para todas las separaciones dadas una interferencia positiva. Para la velocidad equivalente de diseño (2.48 nudos), la menor interferencia se obtuvo a una separación de 0.617 metros la cual fue en Condición Ligera de 0.009 Kg, y, en Condición Cargada de 0.018 Kg.

Resolviendo e integrando las ecuaciones descritas en el subcapítulo anterior, Yokoo y Tasaki resumen los resultados de su trabajo en una gráfica que muestra la Interferencia como un porcentaje de la resistencia residual versus el número de Froude teniendo como parámetro la razón $2k/L$. La gráfica mencionada se la muestra en la **Figura 5**.

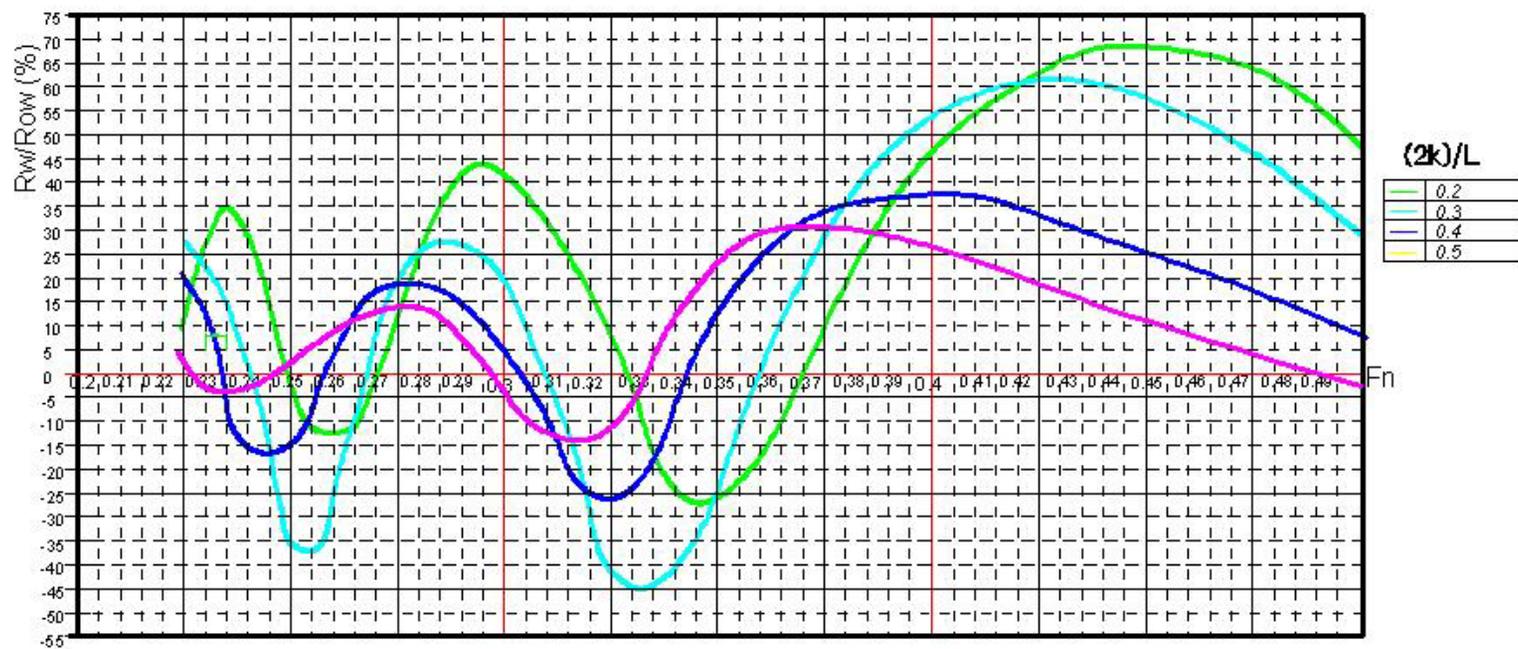


Figura No. 5 Gráfica de la Interferencia sobre la Resistencia Residual vs el Número de Froude, [5].

Para el análisis del catamarán de este trabajo se consideran dos condiciones de carga (Ligera y Cargada), y la separaciones de los semicascos a analizar son la de diseño (0.561 m) y otras dos que serían +/- el 10% de la de diseño (0.505 m y 0.617 m). La Resistencia Residual es la suma de la resistencia producida por las Olas, la producida por el Bulbo y la que se produce por inmersión del espejo. Con todos estos datos se obtiene los siguientes valores para la Interferencia:

Velocidad (nudos)	Separación Reducida (0,505 m.)							
	Condición Ligera (2k/l = 0,269)				Condición Cargada (2k/l = 0,267)			
	Fn	Rest. Residual	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)	Fn	Rest. Residual	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)
1,860	0,223	0,029	26,26%	0,008	0,222	0,054	25,40%	0,014
1,984	0,238	0,034	9,79%	0,003	0,237	0,062	13,17%	0,008
2,108	0,253	0,039	-33,63%	-0,013	0,252	0,071	-32,07%	-0,023
2,232	0,268	0,045	0,45%	0,000	0,267	0,081	-3,50%	-0,003
2,356	0,283	0,053	27,67%	0,015	0,282	0,094	28,00%	0,026
2,480	0,298	0,061	24,44%	0,015	0,297	0,109	26,84%	0,029
2,604	0,312	0,067	-1,47%	-0,001	0,311	0,121	2,06%	0,002
2,728	0,327	0,070	-37,38%	-0,026	0,326	0,130	-34,52%	-0,045
2,852	0,342	0,074	-36,86%	-0,027	0,341	0,137	-37,16%	-0,051
2,976	0,357	0,080	-9,39%	-0,007	0,356	0,146	-12,60%	-0,018
3,100	0,372	0,089	21,44%	0,019	0,371	0,159	18,91%	0,030
3,224	0,387	0,101	42,21%	0,043	0,386	0,177	40,59%	0,072
3,348	0,402	0,119	54,05%	0,064	0,400	0,201	52,62%	0,106
3,472	0,417	0,141	59,86%	0,084	0,415	0,234	59,36%	0,139
3,596	0,432	0,164	62,01%	0,102	0,430	0,268	62,13%	0,167
3,720	0,446	0,187	60,05%	0,113	0,445	0,304	60,67%	0,184

Tabla No. IX Interferencia para la Separación Reducida (0.505 m.)

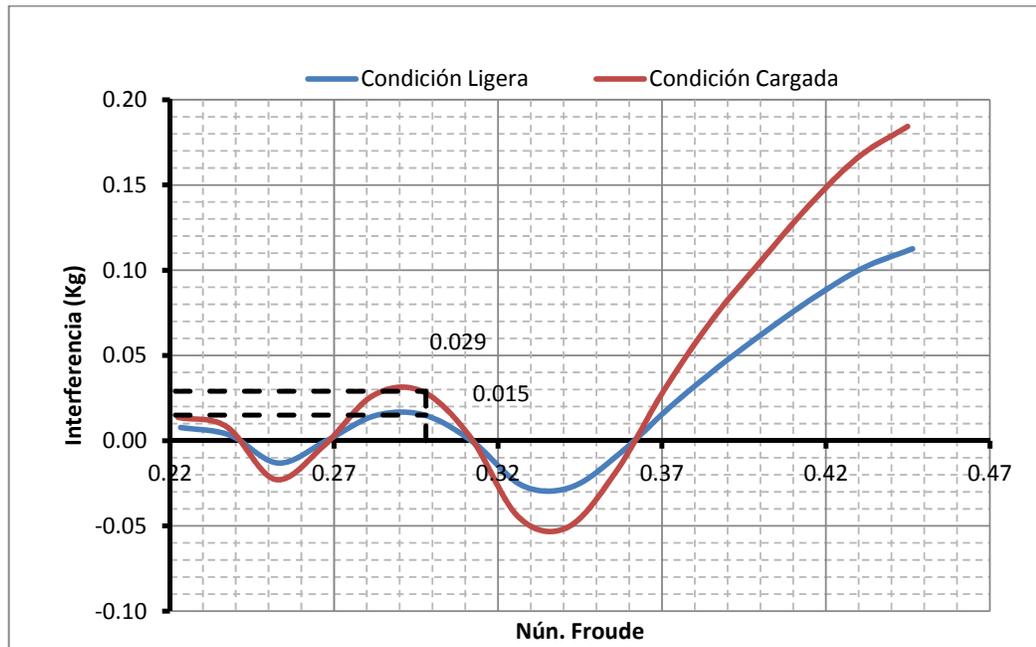


Figura No. 6 Interferencia vs Num. Froude con una Separación Reducida (0.505 m.)

Velocidad (nudos)	Separación Original (0,561 m)							
	Condición Ligera (2k/l = 0,300)				Condición Cargada (2k/l = 0,297)			
	Fn	Rest. Residual (Row) (Kg)	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)	Fn	Rest. Residual (Row) (Kg)	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)
1,860	0,223	0,029	27,94%	0,008	0,222	0,054	29,34%	0,016
1,984	0,238	0,034	2,68%	0,001	0,237	0,062	6,07%	0,004
2,108	0,253	0,039	-31,19%	-0,012	0,252	0,071	-33,12%	-0,023
2,232	0,268	0,045	4,13%	0,002	0,267	0,081	-0,06%	0,000
2,356	0,283	0,053	25,33%	0,014	0,282	0,094	25,46%	0,024
2,480	0,298	0,061	18,93%	0,012	0,297	0,109	21,39%	0,023
2,604	0,312	0,067	-7,05%	-0,005	0,311	0,121	-4,53%	-0,005
2,728	0,327	0,070	-39,58%	-0,028	0,326	0,130	-39,81%	-0,052
2,852	0,342	0,074	-31,04%	-0,023	0,341	0,137	-34,56%	-0,047
2,976	0,357	0,080	-2,13%	-0,002	0,356	0,146	-6,11%	-0,009
3,100	0,372	0,089	25,58%	0,023	0,371	0,159	23,61%	0,037
3,224	0,387	0,101	42,31%	0,043	0,386	0,177	41,82%	0,074
3,348	0,402	0,119	51,38%	0,061	0,400	0,201	51,32%	0,103
3,472	0,417	0,141	55,27%	0,078	0,415	0,234	56,08%	0,131
3,596	0,432	0,164	55,33%	0,091	0,430	0,268	57,03%	0,153
3,720	0,446	0,187	52,44%	0,098	0,445	0,304	54,34%	0,165

Tabla No. X Interferencia para la Separación Original (0.561 m.)

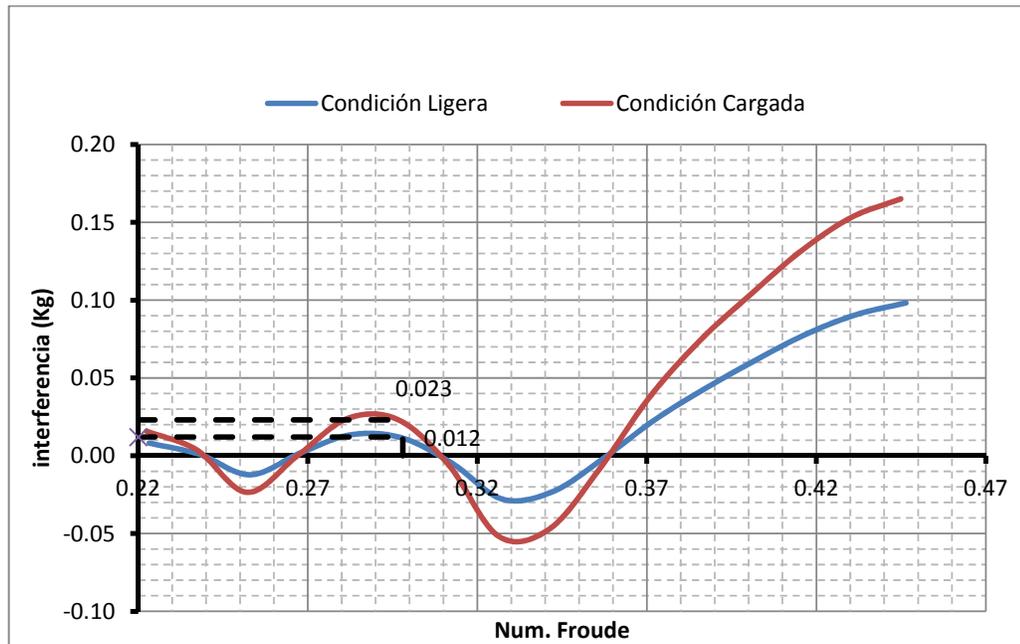


Figura No. 7 Interferencia vs Num. Froude con una Separación Original (0.561 m.)

Velocidad (nudos)	Separación Incrementada (0,617 m.)							
	Condición Ligera ($2k/l = 0,329$)				Condición Cargada ($2k/l = 0,327$)			
	F_n	Rest. Residual (Row) (Kg)	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)	F_n	Rest. Residual (Row) (Kg)	(Rw/Row)%	Interferencia (Rw) (kg)
1,860	0,223	0,029	25,70%	0,008	0,222	0,054	27,16%	0,015
1,984	0,238	0,034	-1,85%	-0,001	0,237	0,062	-0,92%	-0,001
2,108	0,253	0,039	-23,79%	-0,009	0,252	0,071	-25,47%	-0,018
2,232	0,268	0,045	8,91%	0,004	0,267	0,081	5,68%	0,005
2,356	0,283	0,053	22,43%	0,012	0,282	0,094	22,78%	0,021
2,480	0,298	0,061	14,17%	0,009	0,297	0,109	16,81%	0,018
2,604	0,312	0,067	-9,58%	-0,006	0,311	0,121	-7,09%	-0,009
2,728	0,327	0,070	-34,06%	-0,024	0,326	0,130	-34,64%	-0,045
2,852	0,342	0,074	-19,31%	-0,014	0,341	0,137	-22,86%	-0,031
2,976	0,357	0,080	7,90%	0,006	0,356	0,146	4,78%	0,007
3,100	0,372	0,089	28,40%	0,025	0,371	0,159	26,82%	0,043
3,224	0,387	0,101	39,92%	0,040	0,386	0,177	39,70%	0,070
3,348	0,402	0,119	45,84%	0,055	0,400	0,201	46,12%	0,093
3,472	0,417	0,141	47,53%	0,067	0,415	0,234	48,64%	0,114
3,596	0,432	0,164	45,53%	0,075	0,430	0,268	47,40%	0,127
3,720	0,446	0,187	42,09%	0,079	0,445	0,304	44,00%	0,134

Tabla No. XI Interferencia para Separación Incrementada (0.617 m.)

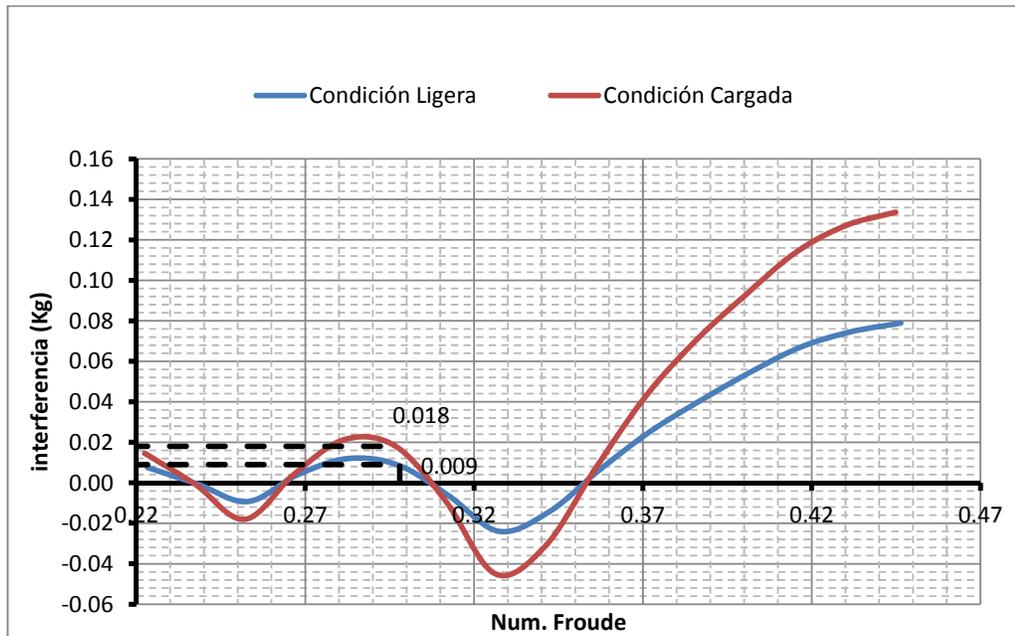


Figura No. 8 Interferencia vs Num. Froude con una Separación Incrementada (0.617 m.)

Para la velocidad equivalente de diseño (2.48 nudos) y para todas las separaciones, la Interferencia aporta con un incremento a la Resistencia Residual del catamarán. La que menos contribuye con la resistencia, es la separación Incrementada (0.617 m.) con un aumento de la resistencia residual del 14,17% (0.009 Kg) en condición Ligera y 16,81% (0.018 Kg) en condición Cargada. Esto se debe a que la zona en la que está el número de Froude para todas las separaciones da una interferencia positiva. Si se aumentara la velocidad de diseño del modelo desde 2.6 a 3 nudos, la interferencia entraría en una zona donde es negativa.

1.5 Cálculo de la Resistencia Total.

La Resistencia Total de un catamarán está dividida en: Friccional, Residual y de Interferencia. La componente Friccional es calculada en base a la formulación de ITTC 57, [2], la Residual se la calcula con el método de Holtrop, [2], y la Interferencia producida por los trenes de olas entre los semicascos se la obtiene por medio del método de Yokoo y Tasaki, [5] y [6]. A la velocidad equivalente de diseño (2.48 nudos) y con la mayor separación entre semicascos, se obtuvo la menor Resistencia Total, la cual fue de 0.617 Kg en Condición Ligera y 0.796 Kg en Condición Cargada.

En forma general la Resistencia Total de un catamarán es calculada por la suma de dos veces resistencia Total de un semicasco (la cual es calculada por el método de Holtrop) y dos veces la componente de Interferencia (que se obtiene con el método de Yokoo y Tasaki):

$$R_{T\text{cat}}=2R_T+2R_w$$

$R_{T\text{cat}}$ representa la Resistencia Total de catamarán, R_T es la Resistencia Total de un semicasco y R_w se define como la Interferencia de un semicasco. Siguiendo esta formulación, la Resistencia Total al avance del modelo es presentada en las siguientes tablas:

Velocidad (nudos)	Separación Reducida (0,505 m.)							
	Condición Ligera				Condición Cargada			
	F_n	R_T (Kg.)	R_w (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)	F_n	R_T (Kg.)	R_w (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)
1,860	0,223	0,170	0,008	0,356	0,222	0,214	0,014	0,456
1,984	0,238	0,193	0,003	0,392	0,237	0,243	0,008	0,501
2,108	0,253	0,216	-0,013	0,406	0,252	0,272	-0,023	0,499
2,232	0,268	0,242	0,000	0,485	0,267	0,305	-0,003	0,604
2,356	0,283	0,271	0,015	0,571	0,282	0,341	0,026	0,735
2,480	0,298	0,300	0,015	0,629	0,297	0,380	0,029	0,818
2,604	0,312	0,328	-0,001	0,653	0,311	0,417	0,002	0,840
2,728	0,327	0,354	-0,026	0,656	0,326	0,452	-0,045	0,815
2,852	0,342	0,382	-0,027	0,710	0,341	0,487	-0,051	0,872
2,976	0,357	0,413	-0,007	0,811	0,356	0,524	-0,018	1,012
3,100	0,372	0,447	0,019	0,933	0,371	0,566	0,030	1,193
3,224	0,387	0,487	0,043	1,059	0,386	0,615	0,072	1,373
3,348	0,402	0,532	0,064	1,193	0,400	0,671	0,106	1,553
3,472	0,417	0,583	0,084	1,334	0,415	0,736	0,139	1,749
3,596	0,432	0,635	0,102	1,473	0,430	0,803	0,167	1,940
3,720	0,446	0,689	0,113	1,603	0,445	0,874	0,184	2,116

Tabla No. XII Resistencia Total para la condición Ligera y Cargada con una Separación Reducida (0.505 m.)

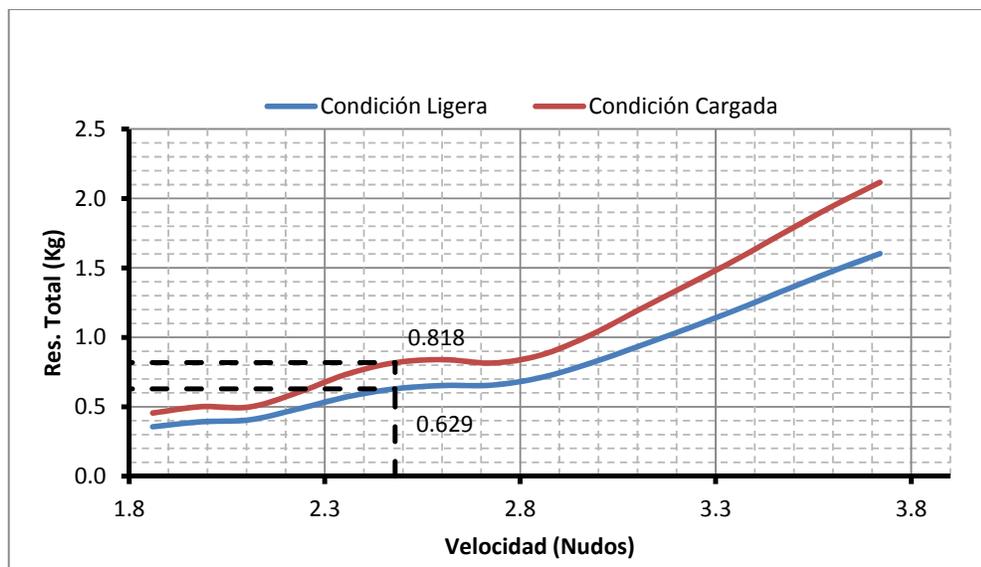


Figura No. 9 Resistencia Total vs Velocidad con una Separación Reducida (0.505 m.)

Velocidad (nudos)	Separación Original (0,561 m.)							
	Condición Ligera				Condición Cargada			
	F_n	R_T (Kg.)	R_W (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)	F_n	R_T (Kg.)	R_W (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)
1,860	0,223	0,170	0,008	0,357	0,222	0,214	0,016	0,460
1,984	0,238	0,193	0,001	0,387	0,237	0,243	0,004	0,493
2,108	0,253	0,216	-0,012	0,408	0,252	0,272	-0,023	0,498
2,232	0,268	0,242	0,002	0,488	0,267	0,305	0,000	0,609
2,356	0,283	0,271	0,014	0,568	0,282	0,341	0,024	0,730
2,480	0,298	0,300	0,012	0,623	0,297	0,380	0,023	0,806
2,604	0,312	0,328	-0,005	0,646	0,311	0,417	-0,005	0,824
2,728	0,327	0,354	-0,028	0,653	0,326	0,452	-0,052	0,802
2,852	0,342	0,382	-0,023	0,718	0,341	0,487	-0,047	0,879
2,976	0,357	0,413	-0,002	0,822	0,356	0,524	-0,009	1,031
3,100	0,372	0,447	0,023	0,940	0,371	0,566	0,037	1,207
3,224	0,387	0,487	0,043	1,060	0,386	0,615	0,074	1,377
3,348	0,402	0,532	0,061	1,187	0,400	0,671	0,103	1,548
3,472	0,417	0,583	0,078	1,321	0,415	0,736	0,131	1,734
3,596	0,432	0,635	0,091	1,451	0,430	0,803	0,153	1,913
3,720	0,446	0,689	0,098	1,574	0,445	0,874	0,165	2,077

Tabla No. XIII Resistencia Total para la condición ligera y cargada con la Separación Original (0.561 m.)

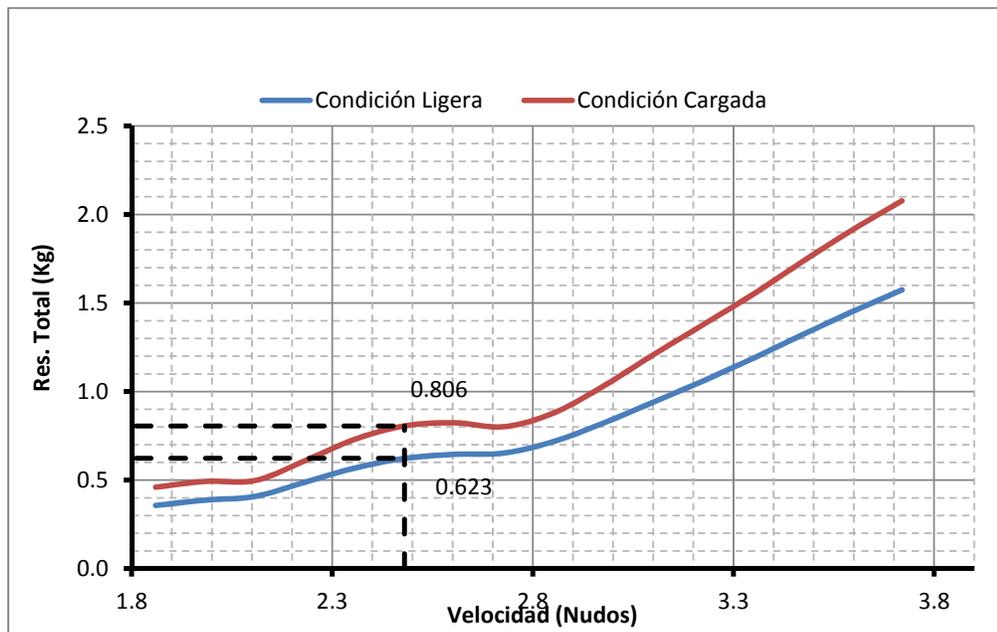


Figura No. 10 Resistencia Total vs Velocidad con la Separación Original (0.561 m.)

Velocidad (nudos)	Separación Incrementada (0,617 m.)							
	Condición Ligera				Condición Cargada			
	F_n	R_T (Kg.)	R_W (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)	F_n	R_T (Kg.)	R_W (Kg.)	R_{Tcat} (Kg.)
1,860	0,223	0,170	0,008	0,356	0,222	0,214	0,015	0,458
1,984	0,238	0,193	-0,001	0,384	0,237	0,243	-0,001	0,484
2,108	0,253	0,216	-0,009	0,414	0,252	0,272	-0,018	0,509
2,232	0,268	0,242	0,004	0,492	0,267	0,305	0,005	0,619
2,356	0,283	0,271	0,012	0,565	0,282	0,341	0,021	0,725
2,480	0,298	0,300	0,009	0,617	0,297	0,380	0,018	0,796
2,604	0,312	0,328	-0,006	0,642	0,311	0,417	-0,009	0,817
2,728	0,327	0,354	-0,024	0,661	0,326	0,452	-0,045	0,815
2,852	0,342	0,382	-0,014	0,736	0,341	0,487	-0,031	0,911
2,976	0,357	0,413	0,006	0,838	0,356	0,524	0,007	1,062
3,100	0,372	0,447	0,025	0,945	0,371	0,566	0,043	1,218
3,224	0,387	0,487	0,040	1,055	0,386	0,615	0,070	1,370
3,348	0,402	0,532	0,055	1,173	0,400	0,671	0,093	1,527
3,472	0,417	0,583	0,067	1,299	0,415	0,736	0,114	1,699
3,596	0,432	0,635	0,075	1,419	0,430	0,803	0,127	1,861
3,720	0,446	0,689	0,079	1,535	0,445	0,874	0,134	2,014

Tabla No. XIV Resistencia Total para la condición Ligera y Cargada con una Separación Incrementada (0.617 m.)

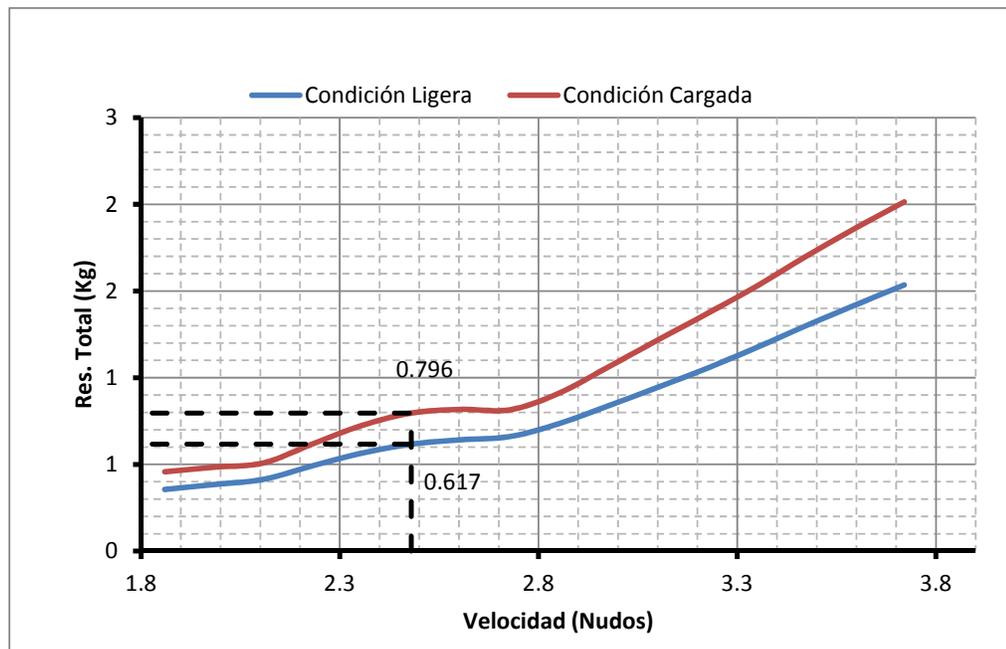


Figura No. 11 Resistencia Total vs Velocidad con una Separación Incrementada (0.617 m.)

De los resultados obtenidos, la menor Resistencia a la velocidad equivalente a la de diseño (2.48 nudos), se presenta con la Separación Incrementada (0.617 m) la cual es 0.617 Kg en condición Ligera y 0.796 Kg en condición Cargada. La mayor resistencia se obtuvo con la Separación Reducida (0.505) con 0.629 y 0.81 Kg en condición Ligera y Cargada respectivamente.

CAPITULO II:

CALCULO DE LA RESISTENCIA AL AVANCE MEDIANTE PRUEBAS CON MODELO

2.1 Prueba de un Semicasco con Distintas Condiciones de Carga.

El ensayo para determinar la resistencia de un modelo de un semicasco del catamarán utilizado en esta tesis consiste en arrastrarlo desde un bote propulsado por un motor fueraborda, en el lago de la ESPOLE y registrar la fuerza requerida para ello. Para el ensayo se construyen dos semicascos a base de láminas de fibra de vidrio y luego son conectados entre sí mediante estructuras de aluminio combinadas con madera. Las pruebas se las realiza

en dos condiciones de carga (Ligera y Cargada) y a distintas velocidades. Para la recolección de información, se utiliza entre los equipos más importantes una celda de carga que emite una señal que es digitalizada por una tarjeta de adquisición de datos y esta a su vez es transmitida a un computador portátil donde se almacena.



Figura No. 12 Bote Utilizado para las Pruebas.

Para la construcción del modelo del catamarán analizado en este trabajo (Ver Apéndice A, para ver semejanzas del modelo con los planos), se toman las líneas de formas del prototipo, [1], luego se escala con un factor de $\lambda=16.25$, para que el modelo tenga 2 m de eslora total. A continuación en madera de plywood se elaboran las cuadernas y el perfil en crujía, en donde se marca el alefriz a fin de que el modelo adquiriera el mismo arrufo del

prototipo. En la sección de la proa se construyen cuadernas más cercanas para que las láminas de fibra que recubren a la estructura se amolden mejor a las formas del semicasco.

Una vez que se arma la estructura de madera, esto es, se unen las cuadernas al perfil, se procede a cubrirla con láminas flexibles de fibra de vidrio, teniendo especial cuidado en la proa y en el bulbo, el cual es construido principalmente con masilla. Luego que se encuentra completamente cubierta la estructura, se procede a enmasillar, lijar y pintar cada uno de los semicascos.

En cada uno de los modelos de los semicascos, se instalaron dos mamparos transversales separados a 1.04 m de distancia de tal manera que provean estanqueidad. Además, estos elementos proveen una base sólida para la instalación de cuatro pernos, con los que se sujetan las estructuras que unen a los dos semicascos.



Figura No. 13 Estimadores de Turbulencia.

Por último, con el fin de evitar un flujo completamente laminar, se le instalaron estimuladores de turbulencia en la proa de cada semicasco. De acuerdo a las recomendaciones del ITTC, [8], para la instalación de estos estimuladores es necesario encontrar la sección transversal en donde actúen eficientemente (Ver Apéndice B). Además se debe de encontrar su altura y la separación entre cada uno de los estimuladores lo cual es calculado acuerdo al Apéndice.

Pruebas

La facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y Recursos Naturales de la ESPOL, posee un bote de aluminio propulsado por

un motor de 6 Hp que sirve para las pruebas de arrastre. Para halar al modelo desde el bote se le instala un brazo mecánico rebatible que posee una base de acero y una estructura cuadrada de aluminio de 3.2 m de longitud. La longitud de este brazo mecánico es adecuada para evitar que las olas generadas por el bote interfieran al arrastrar el modelo. Adicional a esto, se utilizan los siguientes equipos

EQUIPO	CARCATERISTICAS
Batería	Marca: MOTOREX VOLTAJE: 12 volt, 700 Amp
Inversor de corriente	Marca: BLACK & DECKER Modelo: PI500BB
Fuente transformadora de voltaje.	Marca: COSEL CO. LTD. Modelo: K15A-12
Tarjeta de adquisición de datos	Marca: OMEGA Modelo: OMB – DAQ - 3000
Celda de carga	Marca: AMCELLS Modelo: STL S-Type 50 lb
Medidores de velocidad	Marca: SWOFFER INSTRUMENTS, INC Modelo: 2100-STD, 2100-LX
Anemómetro	Marca: INTELL INSTRUMENTS PLUS Modelo: AR816A
Computador portátil	Marca: HP Modelo: Mini331

Tabla No. XV Equipos utilizados para las pruebas.

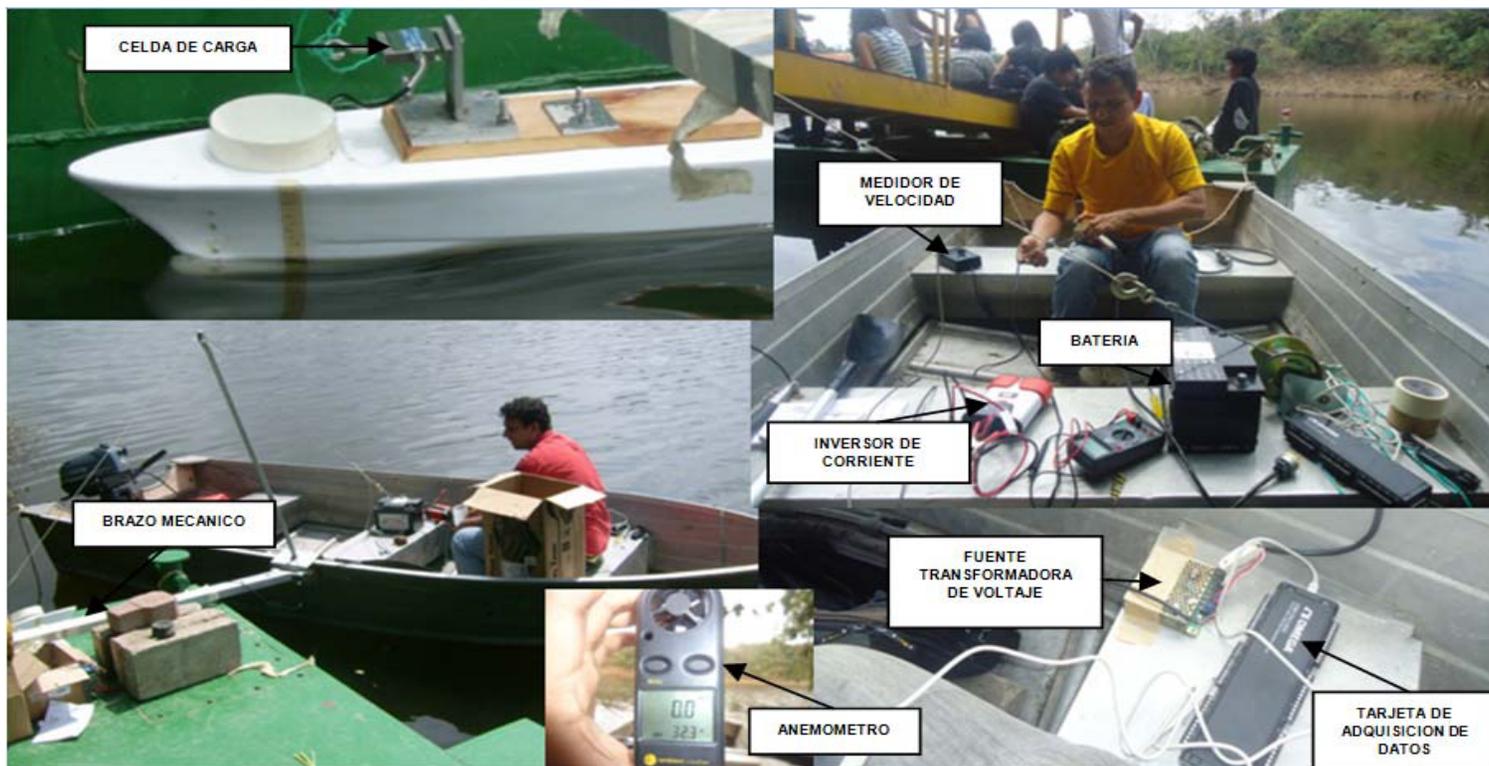


Figura No. 14 Equipos Utilizados para las Pruebas.

Por medio de una batería se entrega corriente continua de 12 voltios a un inversor, el cual cambia el voltaje de entrada de continua a corriente alterna a un voltaje de 110 V de salida. Este voltaje a su vez sirve para energizar una fuente que transforma el voltaje de entrada a uno regulable entre 10 a 20 voltios continuo. Para el presente ensayo se utilizó un voltaje de 11 voltios ya que la celda de carga recomendaba usar este valor. Esta celda de carga es un sensor de Tensión/Compresión, que permite obtener el valor de la fuerza de resistencia al avance del modelo por medio de señales eléctricas; a su vez, este voltaje es transformado a forma digital por una tarjeta de adquisición de datos la cual es conectada a una PC portátil por medio de un cable USB. Para la adquisición y procesamiento de los datos, se utiliza un software llamado DAQX, y se registran valores con una razón de 120 señales / segundo.

Se realizan las pruebas de halado del modelo en dos condiciones de carga: una Ligera y otra Cargada, cuyas características hidrostáticas se muestran en la tabla 1 del capítulo anterior. Tanto para la condición Ligera como para la Cargada, se deben añadir pesos para obtener el calado necesario para el presente estudio. Estos pesos se los detalla en las siguientes tablas:



Figura No. 15 Determinación del Peso y LCG del Modelo Ligero Utilizado para las Pruebas.

DESCRIPCION	PESOS [Kg]	UBICACIÓN DESDE PROA [m]
Peso del Modelo en Condición Ligera	9.54	1.011
Base de Sujeción de la Celda de Carga	1.07	0.40
Base del Medidor de Velocidad	0.84	1.80
Medidor de Velocidad	1.35	2.00
Peso 1	1.00	0.18

Tabla No. XVI Pesos Añadidos al Modelo en Condición Ligera.

DESCRIPCION	PESOS [Kg]	UBICACIÓN DESDE PROA [m]
Peso del Modelo en Condición Ligera	9.54	1.011
Base de Sujeción de la Celda de Carga	1.07	0.40
Base del Medidor de Velocidad	0.84	1.80
Medidor de Velocidad	1.35	2.00
Peso 1	1.00	0.18
Peso 2	1.86	0.70

Tabla No. XVII Pesos Añadidos al Modelo en Condición Cargada.

CONDICION DE CARGA	PESO [Kg]	LCG [cm]	CALADO EN PROA [cm]	CALADO EN POPA [cm]
LIGERO	13.8	1.01	8.5	8.5
CARGADO	15.66	1.04	10.0	10.0

Tabla No. XVIII Calados Según su Condición de Carga.

Previo a cada corrida, se procede a registrar el valor inicial que marca la celda de carga, el cual, se lo toma como el valor a velocidad cero. Una vez registrado este valor, se acelera el motor fuera de borda hasta alcanzar y estabilizarse en la velocidad requerida, y luego se procede a registrar, por el lapso de 60 segundos, los valores de la fuerza de arrastre. Además de la

fuerza de halado, se registran las velocidades del viento con un anemómetro y de la estela con un medidor de velocidad ubicado en el codaste del modelo.



Figura No. 16 Arrastre del Semicasco en Condición Ligera.

Después de realizar las pruebas con el modelo del semicasco a distintas velocidades, se promedian los registros de la fuerza (Ver Apéndice C) y se obtienen los siguientes resultados:

V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]
0.000	0.100	0.000
1.050	0.950	0.183
1.140	1.340	0.399
1.200	1.200	0.367
1.300	1.400	0.537
1.450	1.550	0.715

Tabla No. XIX Prueba del modelo de un Semicasco en Condición Ligera.

V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]
0.000	0.000	0.000
1.030	1.130	0.315
1.100	1.200	0.421
1.230	1.280	0.467
1.350	1.450	0.570
1.450	1.350	0.715

Tabla No. XX Prueba del modelo de un Semicasco en Condición Cargada.

Debido a la inestabilidad del modelo por la altura del tubo del medidor de velocidad de estela, se tuvo inconvenientes durante las primeras pruebas. Por ello se decidió no considerar como confiables dichos resultados y no se reportaron en este trabajo.

2.2 Prueba del Catamarán con Distintas Separaciones de Semicascos, Condiciones de Carga y de Velocidad.

Para estas pruebas se tiene que desarrollar el mismo proceso que en el subcapítulo anterior, pero, en vez de realizarse con un semicasco, se la realiza con los dos unidos entre sí. En este caso se registra la fuerza de halado, la velocidad de avance y la del viento. Se emplean tres separaciones entre las líneas de crujía de los semicascos: Separación Reducida de 0.505 m, la Original de 0.561 m y por último una Aumentada de 0.617 m.



Figura No. 17 Vista del Catamarán con Separación Reducida (50.5 cm).



Figura No. 18 Vista del Catamarán con Separación Original (56.1cm).



Figura No. 19 Vista del Catamarán con Separación Aumentada (61.7cm).

Para realizar las pruebas, se procede a realizar tres estructuras para las distintas separaciones de los semicascos, formadas por dos perfiles cuadrados y una tira de madera, estas se unen mediante pernos de acero

inoxidable. Para cada separación se trabajó con las dos condiciones de carga previamente definidas y a distintas velocidades, como se muestra en las figuras anteriores.

Los pesos añadidos al catamarán se detallan en la siguiente tabla para cada condición de carga y se instalaron sobre la estructura de conexión entre semicascos:

CONDICION	UBICACIÓN DESDE PROA [m]			
	0.1	0.81	1.19	1.39
Condición Ligera	2.24	2	---	---
Condición Cargada	2.24	2	5	5

Tabla No. XXI Pesos Incorporados al Catamarán en [Kg], según la Condición de Carga.



Figura No. 20 Arrastre del Catamarán en Condición Cargada.

	TOTAL DE PESOS [Kg]	CALADOS	
		PROA [cm]	POPA [cm]
Cond. Ligera Separación Reducida	4.24	8.5	8.5
Cond. Cargada Separación Reducida	14.24	10	10

Tabla No. XXII Pesos Totales y Calados Según su Condición y Separación de Semicascos.

Una vez encontrados los pesos requeridos para que el catamarán tenga los calados que se necesitan para el presente estudio, se procede a registrar y

promediar los resultados de las fuerzas, en forma similar al subcapítulo anterior, obteniéndose los siguientes resultados:

CONDICION LIGERA			CONDICION CARGADA		
V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]	V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.060	0.760	0.523	1.050	1.050	0.702
1.100	1.300	0.695	1.160	1.260	0.716
1.200	1.300	0.792	1.210	1.110	0.747
1.320	1.720	1.040	1.360	1.460	1.237
1.440	1.240	0.964	1.480	1.280	1.707
1.460	1.360	1.170	1.530	1.630	1.549
1.570	1.870	1.246	1.700	1.700	2.134
1.7	1.7	1.459615			

Tabla No. XXIII Resultados de la Prueba de Catamarán en Condición Ligera y Cargada con la Separación Reducida.

CONDICION LIGERA			CONDICION CARGADA		
V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]	V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.050	0.950	0.521	1.050	0.950	0.807
1.140	1.040	0.490	1.120	1.120	0.702
1.260	1.160	0.627	1.250	1.550	1.027
1.320	1.320	0.792	1.330	1.530	1.075
1.470	1.370	0.826	1.460	1.360	1.239
1.530	1.730	1.053	1.550	1.550	1.484
1.760	1.460	1.232	1.750	1.550	2.104
1.94	1.84	1.35634			

Tabla No. XXIV Resultados de la Prueba de Catamarán en Condición Ligera y Cargada con la Separación Original.

CONDICION LIGERA			CONDICION CARGADA		
V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]	V. del Bote [m/s]	V. del Viento [m/s]	Fuerza [Kg]
0.000	0.100	0.000	0.000	0.000	0.000
1.040	0.840	0.606	1.000	0.700	0.722
1.140	1.040	0.715	1.100	1.200	0.788
1.230	1.230	0.797	1.220	1.220	0.993
1.360	1.260	0.923	1.320	1.220	1.103
1.430	1.630	1.022	1.460	1.660	1.392
1.560	1.460	1.115	1.590	1.490	1.399
1.700	1.700	1.205	1.750	1.750	2.094

Tabla No. XXV Resultados de la Prueba de Catamarán en Condición Ligera y Cargada con la Separación Aumentada.

2.3 Resumen de Resultados Experimentales.

Luego de realizar las pruebas de arrastre del modelo del catamarán variando la separación entre semicascos, se procede a procesar la información obtenida. Para esto se desarrollan curvas de tendencia de tipo polinómico de orden 2 a partir de los resultados experimentales. El factor de correlación de dichas curvas varía entre 0.9424 y 0.9968, de manera que las curvas de tendencia puedan ser usadas con confianza. Es notorio el hecho de que en algunos resultados en condición de carga Ligera las curvas tienen curvatura negativa, en el rango de las velocidades analizadas.

Primero se analizan los resultados de resistencia de los semicascos, en las dos condiciones de carga:

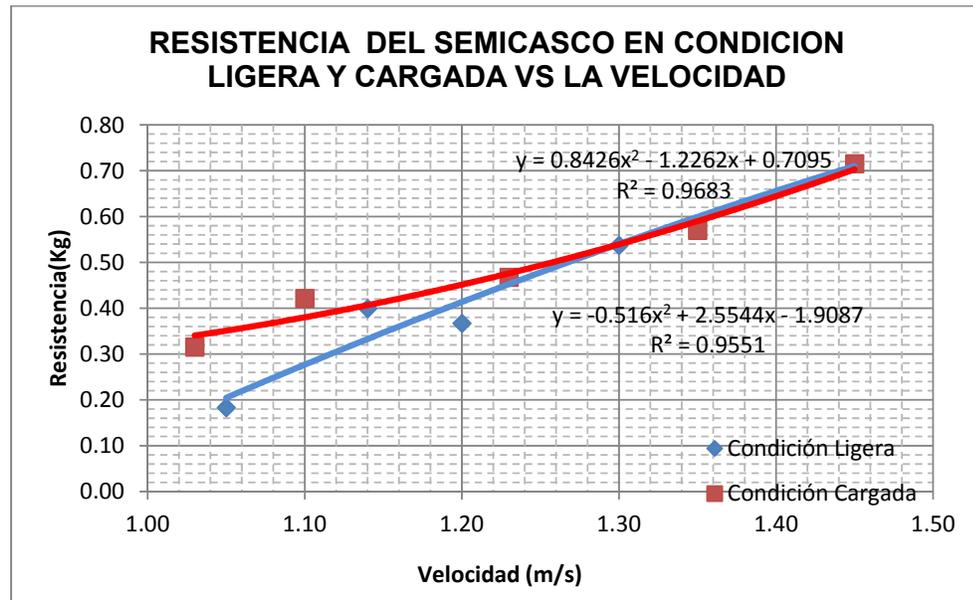


Figura No. 21 Resistencia del Semicasco en Condición Ligera y Cargada.

Nótese que la curva de resistencia para la Condición Ligera, a partir de 1.3 m/s, prácticamente se iguala con la de Condición Cargada. Esto posiblemente se debe al hecho de que el bulbo no está completamente sumergido y aumenta la resistencia de avance, en lugar de reducirla.

A continuación se analizan los resultados de la resistencia del catamarán en las distintas condiciones de carga y separaciones entre semicascos:

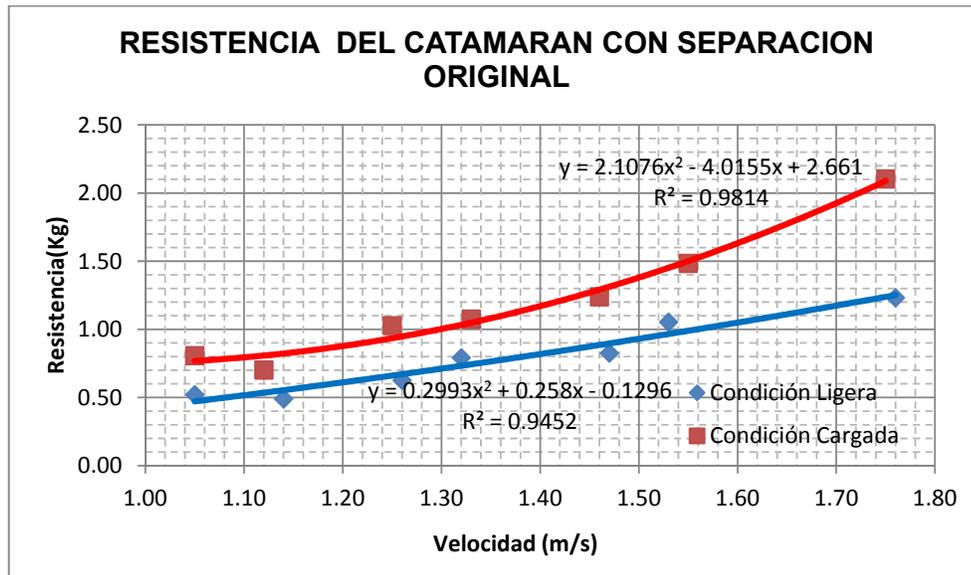


Figura No. 22 Resistencia del Catamarán en Condición Ligera y Cargada con Separación Reducida.

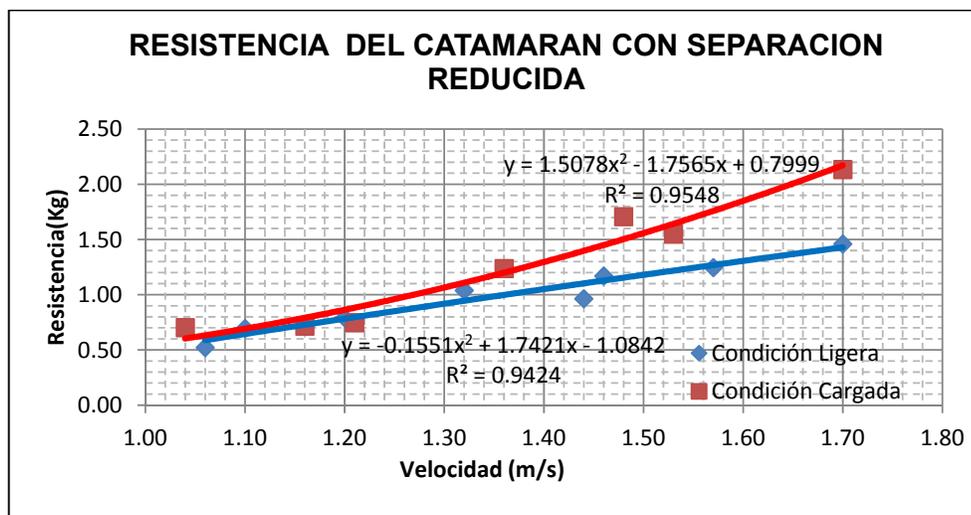


Figura No. 23 Resistencia del Catamarán en Condición Ligera y Cargada con Separación Original.

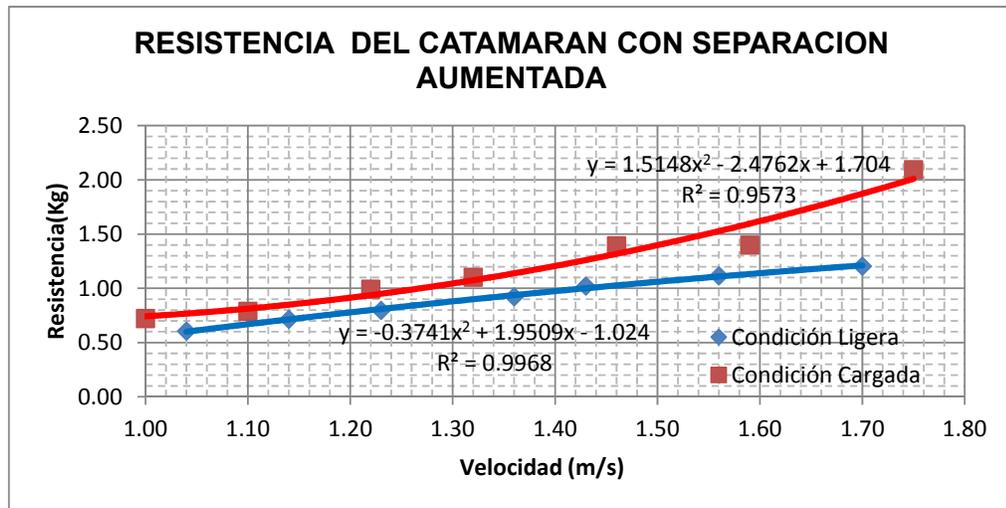


Figura No. 24 Resistencia del Catamarán en Condición Ligera y Cargada con Separación Aumentada.

En todos los casos, en condición Cargada, la Resistencia es mayor que en la Ligera tal como se esperaba.

A continuación se presenta una tabla de los coeficientes cuadráticos y factores de correlación para cada una de las condiciones. Es notorio que en condición ligera con separación reducida y aumentada el coeficiente cuadrático es negativo en el rango de velocidades analizado. Además el coeficiente de correlación, R^2 , está por encima de 0.94, de manera que las curvas de tendencia se consideran aceptables.

CATAMARAN	CONDICIÓN	COEFICIENTE CUADRÁTICO	R ²
SEPARACION REDUCIDA	LIGERA	-0.1551	0.9424
	CARGADA	1.5078	0.9548
SEPARACION ORIGINAL	LIGERA	0.2993	0.9452
	CARGADA	2.1076	0.9814
SEPARACION AUMENTADA	LIGERA	-0.3741	0.9968
	CARGADA	1.5148	0.9573

Tabla No. XXVI Coeficientes Cuadráticos y Factor de Correlación para las distintas Separaciones y Condiciones de Carga.

A continuación se presentan las gráficas de la influencia del viento al momento de realización de las pruebas. Se incluye una recta de referencia con pendiente 1 que representa la situación ideal, esto es en ausencia del viento. Se puede observar que los puntos no se encuentran tan alejados de la línea de referencia, lo cual indica que la fuerza del viento no influye considerablemente en los resultados obtenidos.

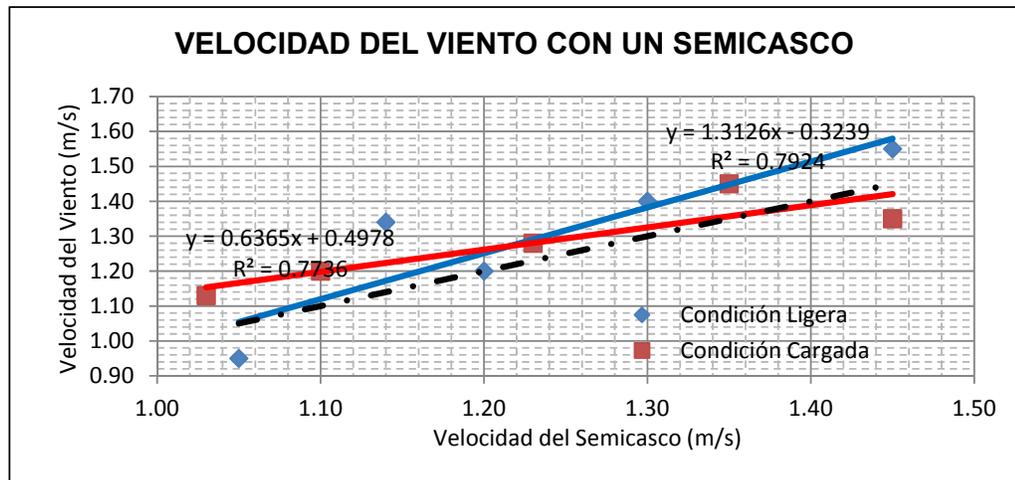


Figura No. 25 Velocidad del Viento en Condición Ligera y Cargada del Semicasco

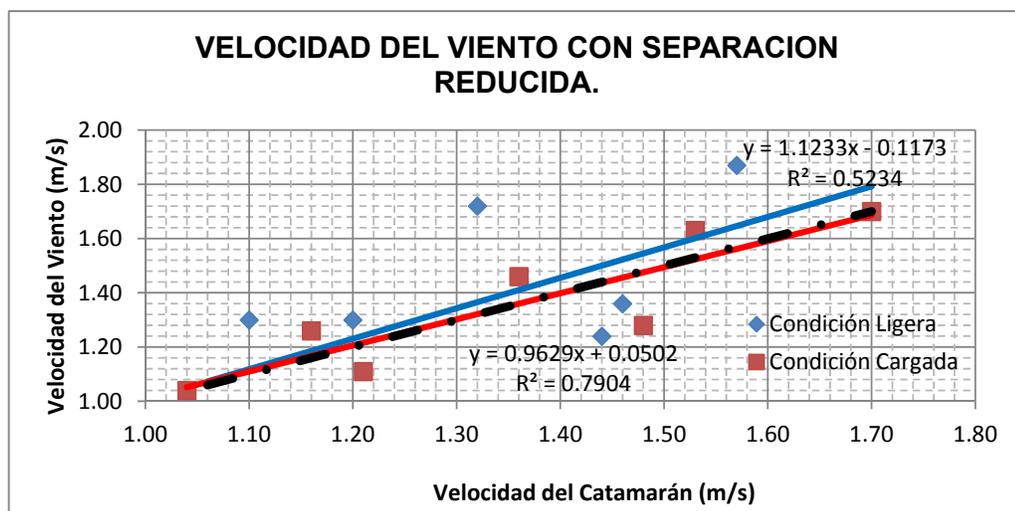


Figura No. 26 Velocidad del Viento en Condición Ligera y Cargada del Catamarán con Separación Reducida.

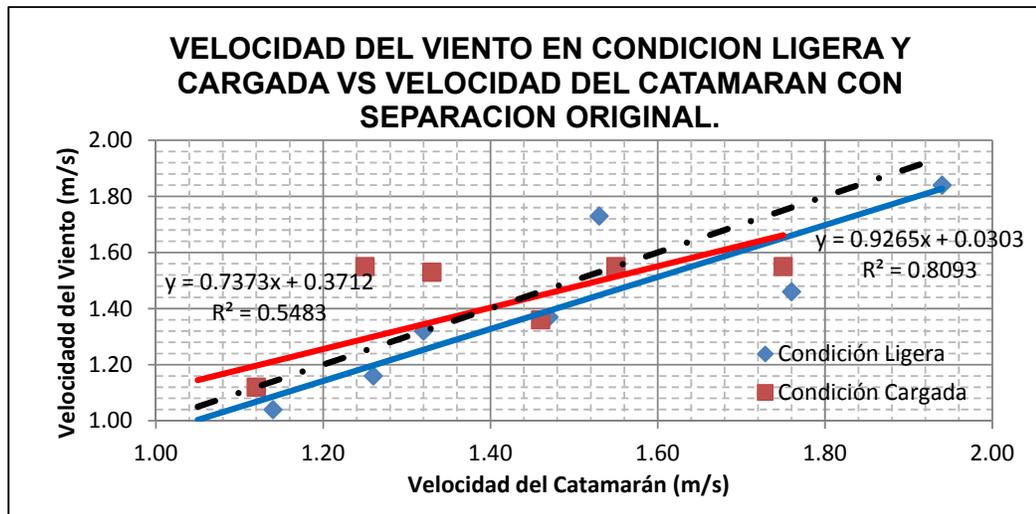


Figura No. 27 Velocidad del Viento en Condición Ligera y Cargada del Catamarán con Separación Original.

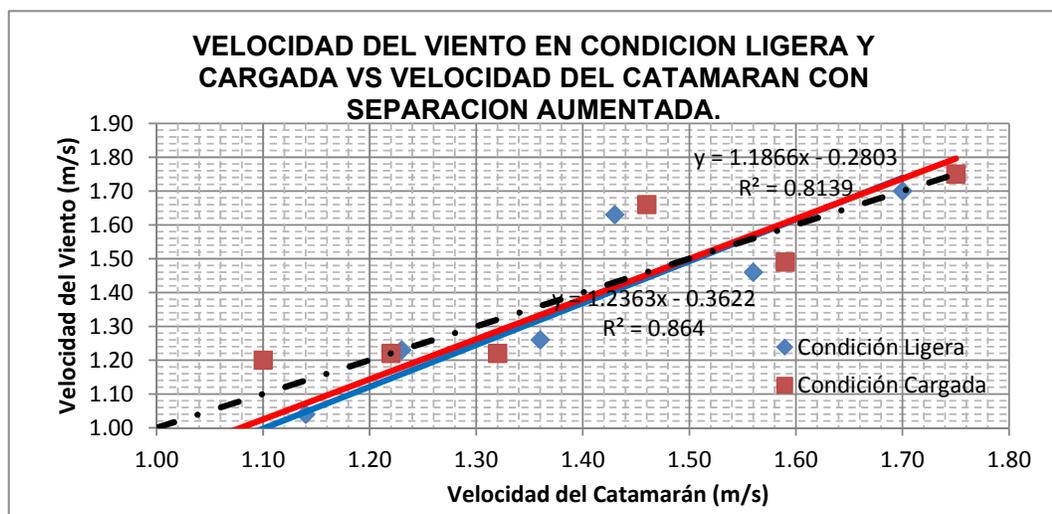


Figura No. 28 Velocidad del Viento en Condición Ligera y Cargada del Catamarán con Separación Aumentada.

CAPITULO III:

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS POR LOS MÉTODOS EXPERIMENTAL Y TEÓRICO.

3.1 Cálculo de la Componente Residual Experimental.

Como se había revisado anteriormente en el Capítulo Uno, la Resistencia Residual para un semicasco es igual a la diferencia entre la Resistencia Total y la Resistencia Friccional. La componente Friccional se la calcula con el método de Holtrop en la que se la estima aplicando la formulación del ITTC 57, [2], que depende del número de Reynolds. Para el catamarán estudiado

en esta tesis, a la velocidad equivalente de diseño, 2.48 Nudos, la Componente Residual de un semicasco es de 0.211 Kg y 0.217 Kg, para las condiciones de carga Ligera y Cargada respectivamente.

La Componente de la Resistencia Residual al avance de un buque se asocia a los fenómenos de generación de olas y depende del número de Froude. Dicho parámetro se calcula mediante la siguiente expresión, [9]:

$$R_{ow} = R_T - R_F \quad (1)$$

donde: R_{ow} es la Resistencia Residual,

R_F es la Resistencia Friccional y

R_T es la Resistencia Total.

La Componente Friccional de la resistencia se deriva de los esfuerzos cortantes que genera el fluido en las regiones adyacentes al casco. Para su estimación comúnmente se emplea la formulación dada por el ITTC 57, [2], para el coeficiente de Resistencia Friccional:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \quad (2)$$

siendo: $Re = (V \cdot L) / \nu$, el Número de Reynolds para las condiciones del ensayo, y, donde:

V es la velocidad del modelo,

L es la eslora del modelo, y,

ν es la viscosidad cinemática del agua.

Luego a partir del Coeficiente adimensional, la Resistencia Friccional es, [9],:

$$R_F = C_F \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (3)$$

donde: R_F es la resistencia friccional,

ρ es la densidad del agua,

S es la superficie mojada del modelo y

V la velocidad avance.

Entonces para el cálculo de la Componente Residual de la Resistencia se va a usar las curvas de tendencia para los valores de la Resistencia Total de un semicasco obtenida de forma experimental. Luego con la velocidad se calculó el número de Reynolds con una Viscosidad Cinemática de $1.18E-6$ m^2/seg , y con aquel, el coeficiente de Resistencia Friccional. Finalmente se calcula la Resistencia Friccional y la diferencia con la Resistencia Total da como resultado la Componente Residual. Para el modelo analizado en esta tesis, la Resistencia Residual en las dos condiciones de carga analizadas es:

CONDICIÓN LIGERA					
Vel. (Nudos)	Re	Cf	R _F (Kg)	R _T (Kg)	R _{ow} (Kg)
2,108	1,71E+06	4,186E-03	0,223	0,255	0,032
2,232	1,81E+06	4,137E-03	0,247	0,344	0,097
2,356	1,91E+06	4,092E-03	0,272	0,429	0,157
2,480	2,01E+06	4,050E-03	0,299	0,510	0,211
2,604	2,11E+06	4,010E-03	0,326	0,587	0,261
2,728	2,21E+06	3,973E-03	0,355	0,659	0,305
2,852	2,31E+06	3,938E-03	0,384	0,728	0,344

Tabla No. XXVII Resistencia Residual Experimental de un semicasco en
Condición Ligera

CONDICIÓN CARGADA					
Vel. (Nudos)	Re	Cf	R _F (Kg)	R _T (Kg)	R _{ow} (Kg)
2,108	1,71E+06	4,186E-03	0,223	0,371	0,148
2,232	1,81E+06	4,137E-03	0,247	0,412	0,165
2,356	1,91E+06	4,092E-03	0,272	0,461	0,189
2,480	2,01E+06	4,050E-03	0,299	0,516	0,218
2,604	2,11E+06	4,010E-03	0,326	0,579	0,253
2,728	2,21E+06	3,973E-03	0,355	0,648	0,294
2,852	2,31E+06	3,938E-03	0,384	0,724	0,340

Tabla No. XXVIII Resistencia Residual Experimental de un semicasco en
Condición Cargada

A continuación se presentan en forma gráfica las Componentes Residuales en las condiciones de carga analizadas (Ligera y Cargada):

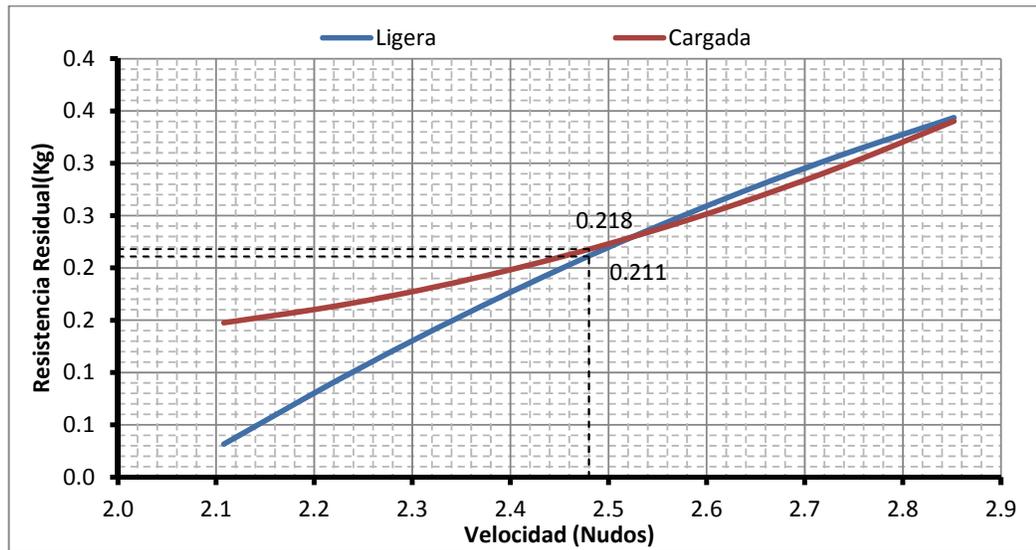


Figura No. 29 Resistencia Residual Experimental vs Velocidad de un semicasco

Nótese la curvatura negativa para la Condición de Carga Ligera. Para la velocidad equivalente de diseño del modelo, de $2.48^{(3)}$ nudos, la Componente Residual Experimental en Condición Ligera es de 0.211 Kg, y, en la Cargada es de 0.218 Kg.

⁽³⁾ Velocidad equivalente a 10 nudos en el buque prototipo, de acuerdo al número de Froude

3.2 Cálculo de la Interferencia Experimental entre Semicascos.

Para el cálculo experimental de la Interferencia entre los trenes de olas generadas por los semicascos se tiene como datos los valores dados por las curvas de tendencia obtenidos de manera experimental. Para el cálculo se restan la Resistencia Total del catamarán con el doble de los obtenidos para un semicasco, dividido para dos. La Interferencia Experimental entre los cascos del modelo se la calcula para las condiciones de carga consideradas (Ligera y Cargada), y con varias separaciones entre los cascos: la original, una reducida y otra aumentada. De manera general para la velocidad de diseño en las dos condiciones de carga y para todas las separaciones, la Interferencia tiene un signo negativo, lo que hace que se reduzca la resistencia al avance del modelo. Los mayores valores de la Interferencia entre semicascos se dan en la separación original con -0.17 Kg, y, -0.03 Kg en condiciones Ligera y Cargada respectivamente.

Como se explicó en el Capítulo I, la Resistencia Total de un catamarán es calculada como la suma de dos veces Resistencia Total de un semicasco más dos veces la componente de Interferencia, [5] y [6]. Por lo tanto, derivada de esa expresión, para el cálculo de la Interferencia Experimental se tiene:

$$R_w = \frac{R_{T \text{ CAT}} - 2R_T}{2} \quad (4)$$

donde: $R_{T \text{ cat}}$ representa la Resistencia Total de catamarán,

R_T es la Resistencia Total de un semicasco y

R_w se define como la Interferencia de un semicasco.

Con las ecuaciones de las curvas de tendencia calculadas en el capítulo anterior se obtienen los siguientes resultados para las tres separaciones de semicascos:

		Resistencia Total Experimental (Kg)							
		Un casco		Sep. Reducida		Sep. Original		Sep. Aumentada	
V(Nudos)	V (m/s)	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada
1,860	0,957	0,063	0,308	0,441	0,500	0,391	0,748	0,500	0,722
1,984	1,021	0,161	0,336	0,532	0,578	0,445	0,758	0,577	0,755
2,108	1,084	0,255	0,371	0,622	0,668	0,502	0,785	0,652	0,800
2,232	1,148	0,344	0,412	0,712	0,771	0,561	0,829	0,723	0,858
2,356	1,212	0,429	0,461	0,799	0,886	0,623	0,890	0,791	0,928
2,480	1,276	0,510	0,516	0,886	1,013	0,687	0,968	0,856	1,010
2,604	1,339	0,587	0,579	0,971	1,152	0,753	1,064	0,918	1,105
2,728	1,403	0,659	0,648	1,055	1,304	0,822	1,176	0,977	1,212
2,852	1,467	0,728	0,724	1,138	1,468	0,893	1,306	1,033	1,332

Tabla No. XXIX Resistencia Total Experimental para cada condición y las separaciones entre semicascos.

Con los resultados de la tabla anterior y aplicando la fórmula (4), la Interferencia Experimental entre semicascos es:

V(Nudos)	Fn	Interferencia Experimental (Kg)					
		Sep. Reducida		Sep. Original		Sep. Aumentada	
		Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada
1,860	0,223	0,157	-0,058	0,132	0,066	0,187	0,053
1,984	0,238	0,105	-0,047	0,062	0,043	0,128	0,042
2,108	0,253	0,057	-0,037	-0,004	0,022	0,071	0,029
2,232	0,268	0,012	-0,027	-0,063	0,002	0,017	0,017
2,356	0,283	-0,029	-0,018	-0,118	-0,016	-0,034	0,003
2,480	0,298	-0,067	-0,010	-0,167	-0,032	-0,082	-0,011
2,604	0,312	-0,101	-0,003	-0,210	-0,047	-0,128	-0,026
2,728	0,327	-0,132	0,004	-0,248	-0,060	-0,171	-0,042
2,852	0,342	-0,159	0,010	-0,281	-0,071	-0,211	-0,059

Tabla No. XXX Interferencia Experimental para cada condición y separación

A continuación se presentan las gráficas de las Interferencias entre semicascos Experimentales en las condiciones de carga analizadas (Ligera y Cargada) en función del número de Froude:

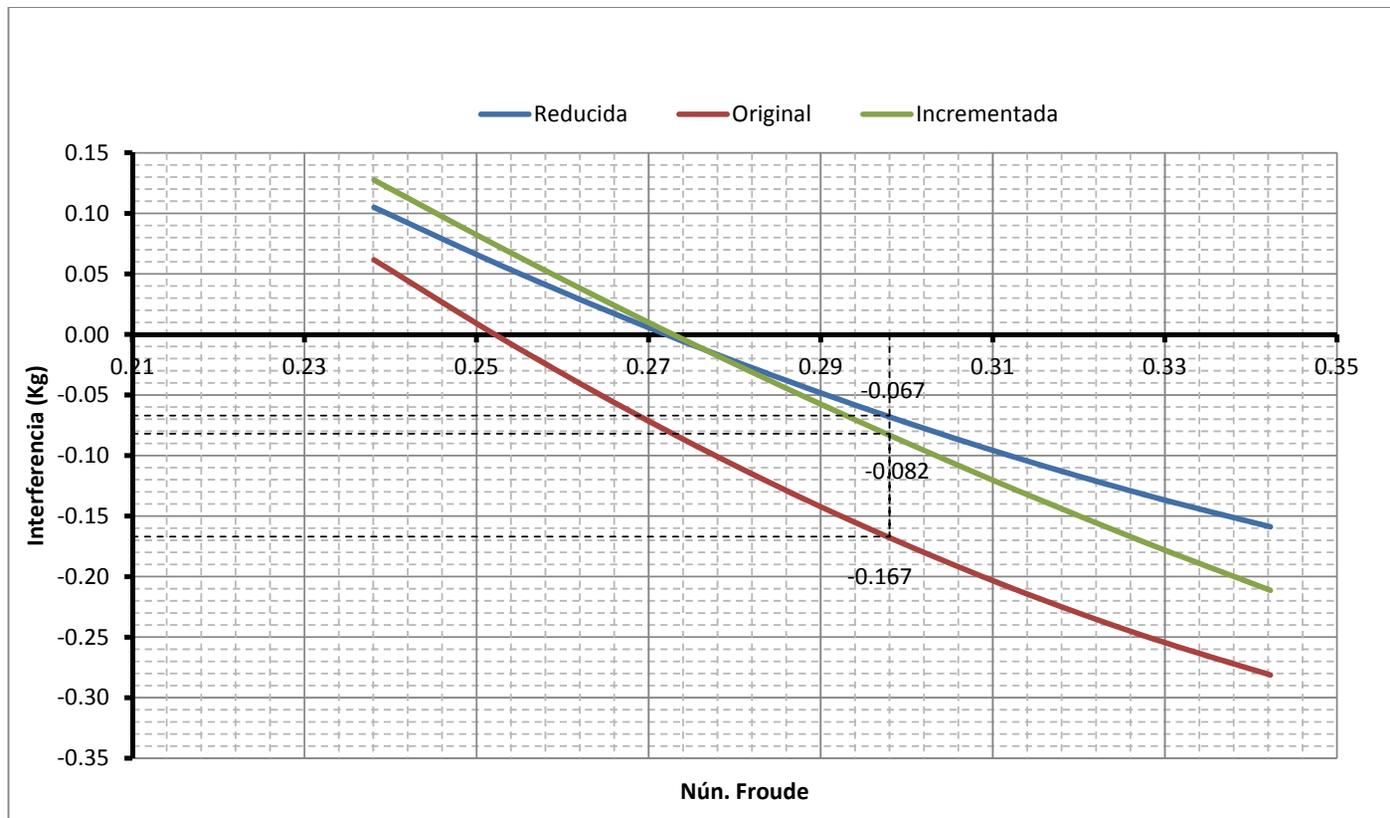


Figura No. 30 Gráfica de la Interferencia vs Número de Froude para la Condición de Carga Ligera.

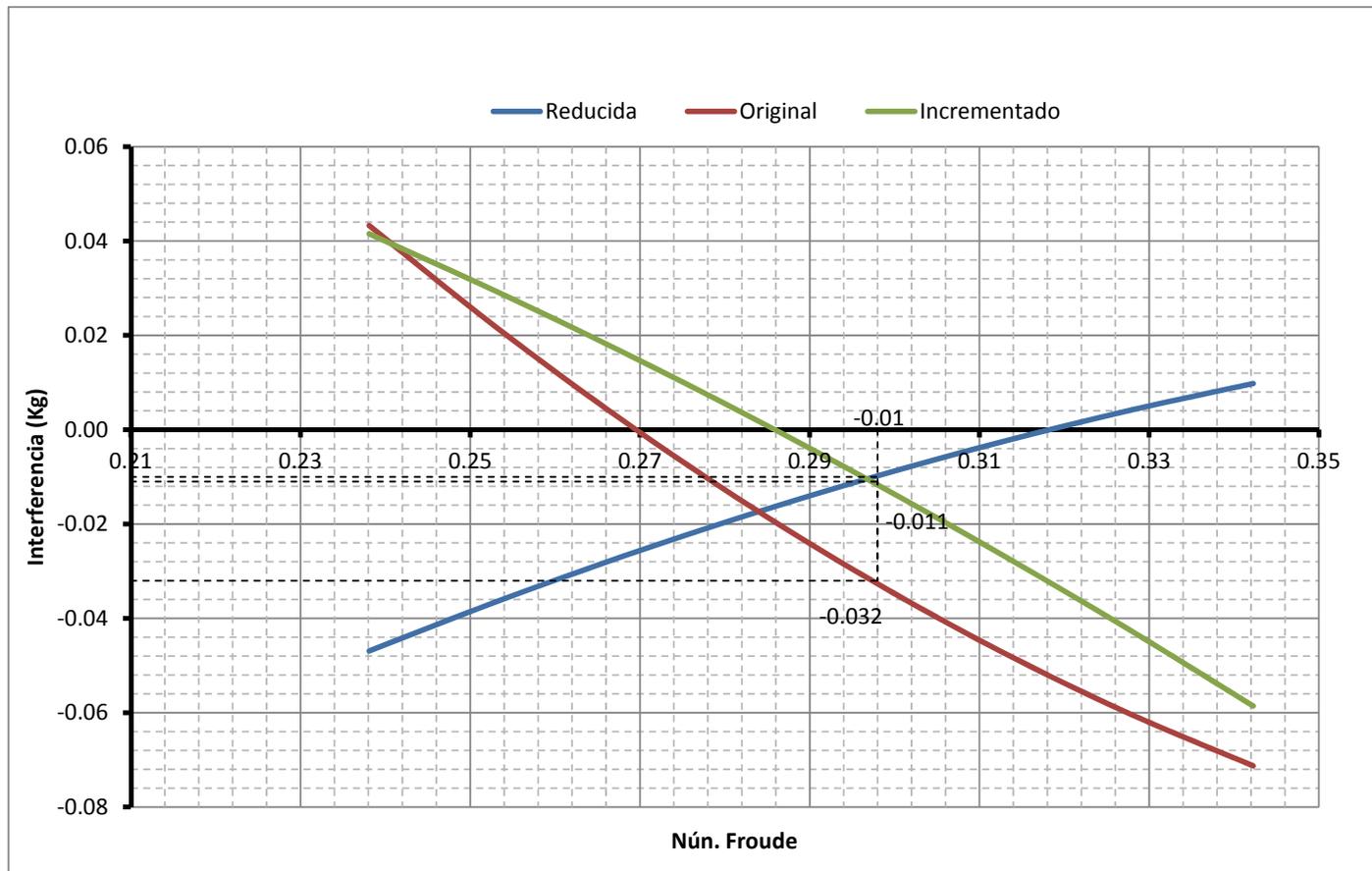


Figura No. 31 Gráfica de la Interferencia vs Número de Froude para la Condición de Carga Cargada.

Se puede observar en las curvas para las Interferencias en la Condición Ligera que la tendencia es la de disminuir con el aumento de la velocidad, comenzando con valores positivos para terminar con negativos. Además, la separación entre semicascos Reducida provee menos porcentaje de reducción a la resistencia al avance. La separación Original y la Incrementada en cambio producen un mayor porcentaje de reducción.

En la Condición Cargada en cambio se observa que la Interferencia tiene un comportamiento diferente respecto de la Ligera. Para la separación entre semicascos Reducida se tiene una pendiente positiva, pasando de valores negativos a positivos. En cambio para las separaciones Original e Incrementada la pendiente es negativa, similar a la que se observa en la Condición Ligera. En Condición Cargada la separación con mayor reducción a la Resistencia al Avance es la Original, y la que menos aporta es la Reducida, terminando con valores positivos, por lo que en vez de reducirla, la aumenta.

Para la velocidad de diseño equivalente del modelo del catamarán (2.48⁽⁴⁾ Nudos), en todas las separaciones, la Interferencia Experimental entre semicascos provee una disminución a la Resistencia Total. La que más contribuye en el decremento de la Resistencia, es la separación de Original

⁽⁴⁾ Velocidad equivalente a 10 nudos en el buque prototipo, de acuerdo al número de Froude

con valores de Interferencias de -0.17 Kg, y, -0.03 Kg, en Condición Ligera y Cargada respectivamente.

3.3 Comparación de Resultados Teóricos y Experimentales de la Interferencia.

La Interferencia es producida por los trenes de olas generados por cada uno de sus semicascos, lo que ocasiona una reducción o un aumento de la Resistencia Total del catamarán. De manera teórica en el Capítulo I, se calculó la Interferencia por el método de Yokoo y Tasaki, [5] y [6], utilizando para la Resistencia de un semicasco los valores calculados por el método empírico de Holtrop, [2]. Luego, experimentalmente se obtuvo la Interferencia como se explicó en el subcapítulo anterior y los valores de Resistencia se los calculó por medio de las curvas de tendencia que se obtuvieron en las pruebas de modelos en el lago de la ESPOL. Los resultados para la Condición Ligera Teórica, tienen una forma de onda pasando de valores negativos a positivos, en cambio las Interferencias Experimentales van de valores positivos a negativos. Para la Condición Cargada, los resultados Experimentales y los Teóricos tienen tendencias similares.

Yokoo y Tasaki, [5] y [6], resumen los resultados de su trabajo en una gráfica (Ver Figura 5 en Capítulo I), la cual muestra la Interferencia como un porcentaje de la Resistencia Residual versus el número de Froude. En dicha figura se tiene como parámetro al término $2k/L$, donde $2k$ es la separación entre semicascos. Con esto se obtuvieron los siguientes resultados:

V(Nudos)	Fn	Interferencia Teórica (Kg)					
		Sep. Reducida		Sep. Original		Sep. Aumentada	
		Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada
1,860	0,223	0,008	0,014	0,008	0,016	0,008	0,015
1,984	0,238	0,003	0,008	0,001	0,004	-0,001	-0,001
2,108	0,253	-0,013	-0,023	-0,012	-0,023	-0,009	-0,018
2,232	0,268	0,000	-0,003	0,002	0,000	0,004	0,005
2,356	0,283	0,015	0,026	0,014	0,024	0,012	0,021
2,480	0,298	0,015	0,029	0,012	0,023	0,009	0,018
2,604	0,312	-0,001	0,002	-0,005	-0,005	-0,006	-0,009
2,728	0,327	-0,026	-0,045	-0,028	-0,052	-0,024	-0,045
2,852	0,342	-0,027	-0,051	-0,023	-0,047	-0,014	-0,031
2,976	0,357	-0,007	-0,018	-0,002	-0,009	0,006	0,007
3,100	0,372	0,019	0,030	0,023	0,037	0,025	0,043
3,224	0,387	0,043	0,072	0,043	0,074	0,040	0,070
3,348	0,402	0,064	0,106	0,061	0,103	0,055	0,093
3,472	0,417	0,084	0,139	0,078	0,131	0,067	0,114
3,596	0,432	0,102	0,167	0,091	0,153	0,075	0,127
3,720	0,446	0,113	0,184	0,098	0,165	0,079	0,134

Tabla No. XXXI Interferencia Teórica usando el método de Yokoo y Tasaki, [5] y [6].

Experimentalmente, se desarrollaron pruebas de modelos a diferentes Condiciones de Carga (Ligera y Cargada) y con distintas separaciones entre semicascos (Reducida, Original y Aumentada). Con los resultados experimentales se definieron curvas de tendencia para la Resistencia Total al Avance para un semicasco y para el catamarán. Con estos valores, la Interferencia Experimental se calcula por medio de la diferencia entre la Resistencia Total del catamarán y el doble de la Resistencia Total de un semicasco, dividido para dos. Los resultados obtenidos para la Interferencia Experimental son:

V(Nudos)	Fn	Interferencia Experimental (Kg)					
		Sep. Reducida		Sep. Original		Sep. Aumentada	
		Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada
1,860	0,223	0,157	-0,058	0,132	0,066	0,187	0,053
1,984	0,238	0,105	-0,047	0,062	0,043	0,128	0,042
2,108	0,253	0,057	-0,037	-0,004	0,022	0,071	0,029
2,232	0,268	0,012	-0,027	-0,063	0,002	0,017	0,017
2,356	0,283	-0,029	-0,018	-0,118	-0,016	-0,034	0,003
2,480	0,298	-0,067	-0,010	-0,167	-0,032	-0,082	-0,011
2,604	0,312	-0,101	-0,003	-0,210	-0,047	-0,128	-0,026
2,728	0,327	-0,132	0,004	-0,248	-0,060	-0,171	-0,042
2,852	0,342	-0,159	0,010	-0,281	-0,071	-0,211	-0,059

Tabla No. XXXII Interferencia Experimental

A continuación se muestran las gráficas de la Interferencia entre semicascos, Experimental y Teórica versus el número de Froude:

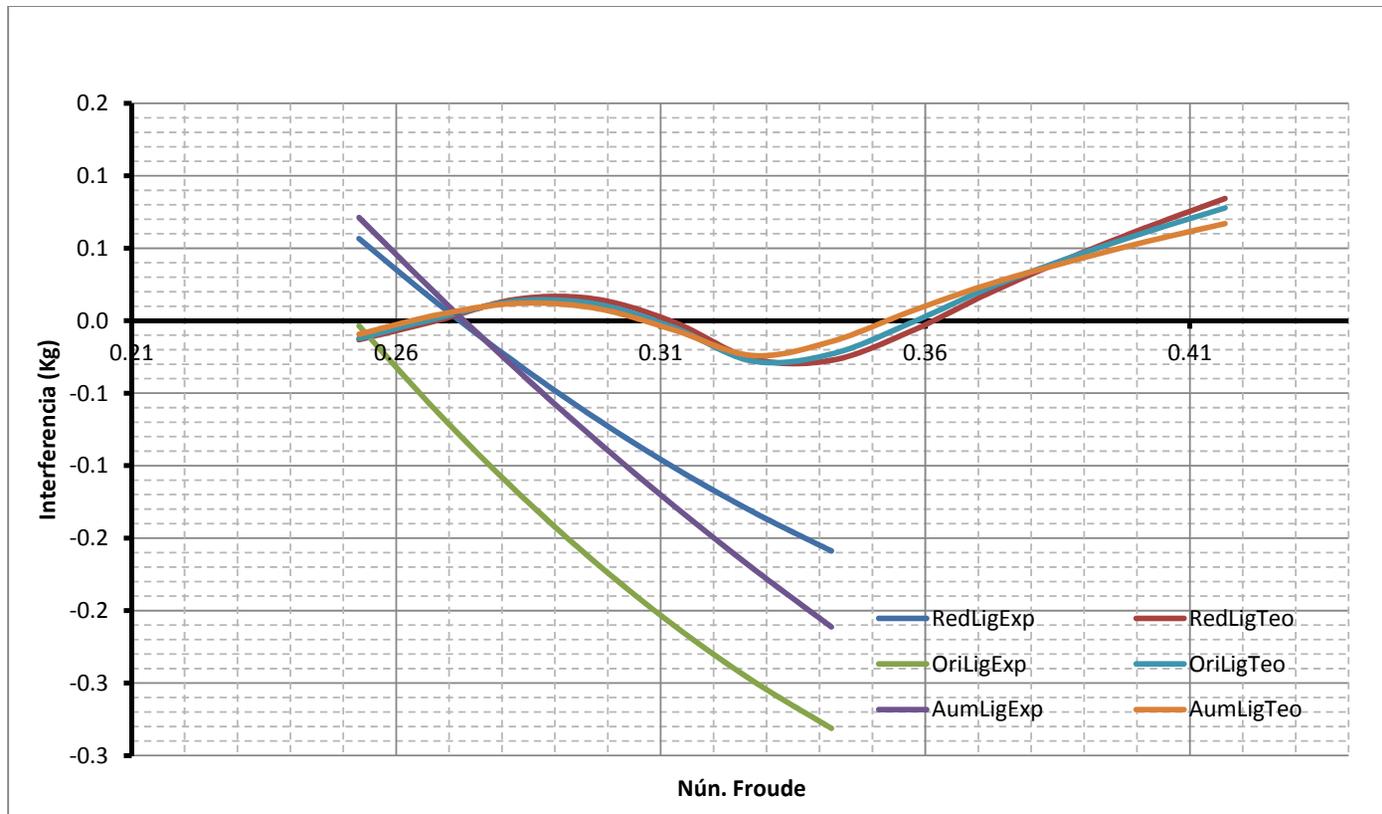


Figura No. 32 Interferencias Experimentales y Teóricas vs Num. Froude para la Condición de Carga Ligera.

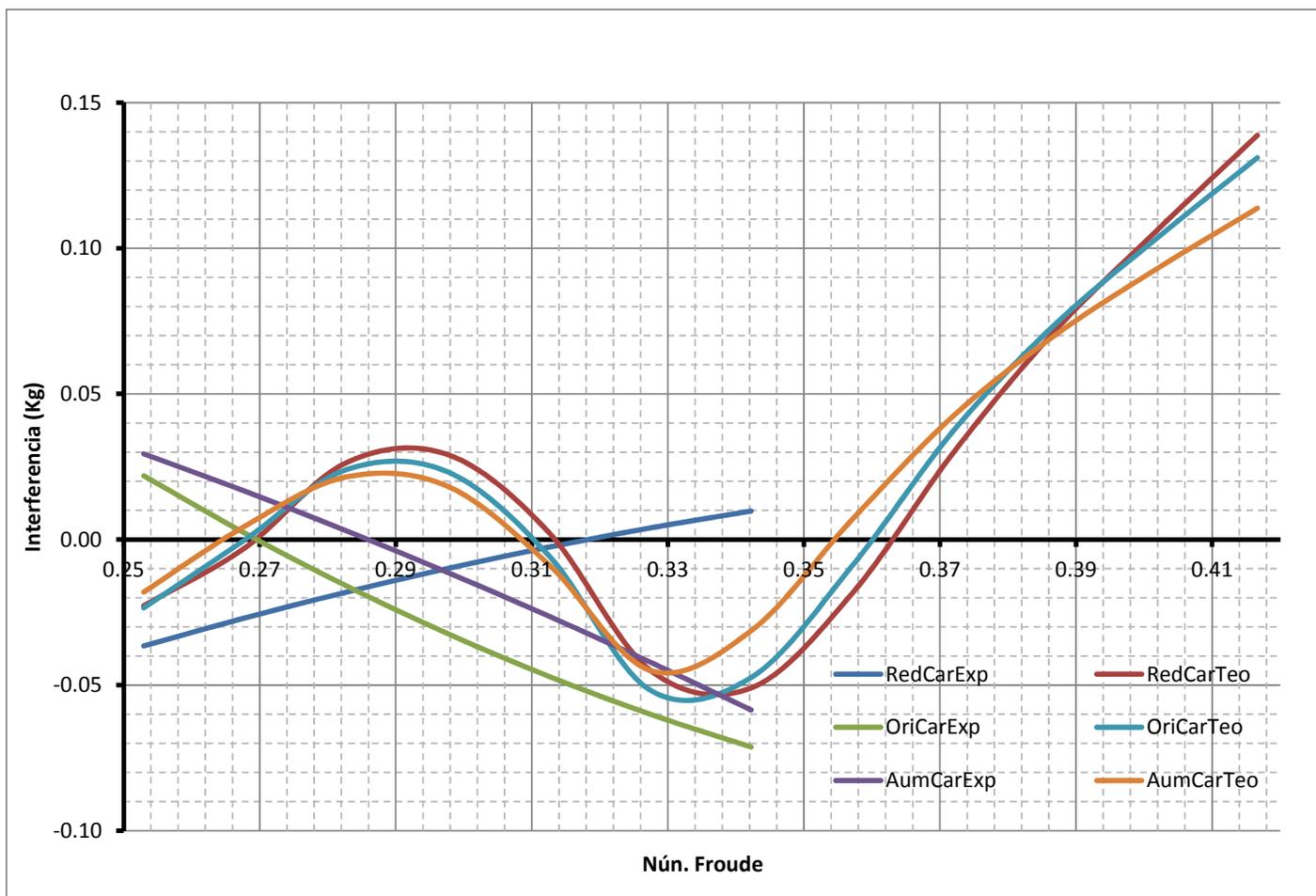


Figura No. 33 Interferencias Experimentales y Teóricas vs Num. Froude para la Condición de Carga Cargado.

Para la Condición Ligera, las Interferencias Teóricas tienen una forma de onda pasando de valores negativos a positivos. En cambio las Interferencias Experimentales van de valores positivos a negativos. Se puede observar que las Interferencias Teóricas y Experimentales tienen tendencias muy distintas, las teóricas presentan tres cambios de signos, mientras que las Experimentales se ve como que aun no alcanzan el valor máximo del seno de la onda con sus valores negativos.

Para la Condición Cargada, la tendencia de las Interferencias Teóricas tiene una forma armónica entre valores negativos y positivos terminando con una predisposición de aumentar los valores positivos. En cambio las Interferencias Experimentales tienden a reducirse, únicamente con valores negativos, excepto en la separación entre semicascos Reducida que tiene sus valores positivos. Contrariamente en la Condición Ligera, se ve una tendencia similar entre separaciones, aun cuando los resultados Experimentales no tienen cambios de signos como los Teóricos.

De los resultados obtenidos, la menor Interferencia Teórica a la velocidad equivalente de diseño (2.48 nudos), se presenta con la Separación Incrementada entre semicascos (0.617 m) la cual es 0.08 Kg en condición Ligera y 0.18 Kg en condición Cargada. En cambio, la menor Interferencia Experimental a la velocidad de diseño, se presenta con la Separación

Original entre semicascos (0.561 m) la que da -0.167 Kg en condición Ligera y -0.032 Kg en condición Cargada. Además, los resultados son razonables comparándolo a otros trabajos similares realizados en un tanque de pruebas, [10], (Ver Apéndice D).

Cálculo de la interferencia del prototipo.

Igualando los números de Froude del Modelo y del Prototipo, se obtiene las velocidades correspondientes para el buque Prototipo. Además dado que, la Interferencia es parte de la Componente Residual, depende únicamente de el número de Froude, por lo que, se puede determinar los coeficientes de Interferencia, por medio de la Ley de Froude, [9]. Entonces para un mismo número de Froude, los coeficientes de Resistencia por Interferencia entre semicascos, para el modelo y el prototipo se igualan:

$$C_{Im}(Fn) = C_{Ip}(Fn)$$

$$\frac{R_{Wm}}{\frac{1}{2} V_m^2 \rho S_m} = \frac{R_{Wp}}{\frac{1}{2} V_p^2 \rho S_p}$$

$$\frac{I_m V_p^2 S_p}{V_m^2 S_m} = R_{Wp}$$

Por la igualdad del número de Froude entre el modelo y el prototipo, se sabe que:

$$\frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} = \lambda^{1/2}$$

Además, por similitud geométrica:

$$\frac{S_p}{S_m} = \frac{L_p^2}{L_m^2} = \lambda^2$$

Entonces, la Interferencia del Prototipo es:

$$Rw_p = Rw_m \lambda^3$$

donde, Rw_m es la Interferencia del modelo,

Rw_p es la Interferencia del buque prototipo y

λ es la razón de escala entre modelo y prototipo (16.25).

A continuación se presentan los resultados de la Interferencia entre semicascos para el buque Prototipo con todas las separaciones y condiciones de cargas:

		Interferencia del Buque Prototipo (Kg)					
		Reducida		Original		Aumentada	
V(Nudos)	Fn	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada	Ligera	Cargada
8,50	0,253	242,987	-156,785	-15,324	93,815	305,437	126,251
9,00	0,268	50,821	-115,565	-271,763	9,137	74,936	71,117
9,50	0,283	-126,124	-77,583	-505,048	-68,306	-144,166	12,867
10,00	0,298	-287,846	-42,837	-715,178	-138,514	-351,870	-48,497
10,50	0,312	-434,347	-11,328	-902,152	-201,488	-548,176	-112,975
11,00	0,327	-565,625	16,944	-1065,971	-257,227	-733,082	-180,568
11,50	0,342	-681,682	41,979	-1206,635	-305,731	-906,590	-251,276

Tabla No. XXXIII Interferencia para el Buque Prototipo

A continuación se muestran las gráficas de la Interferencia entre semicascos, del buque Prototipo versus el número de Froude:

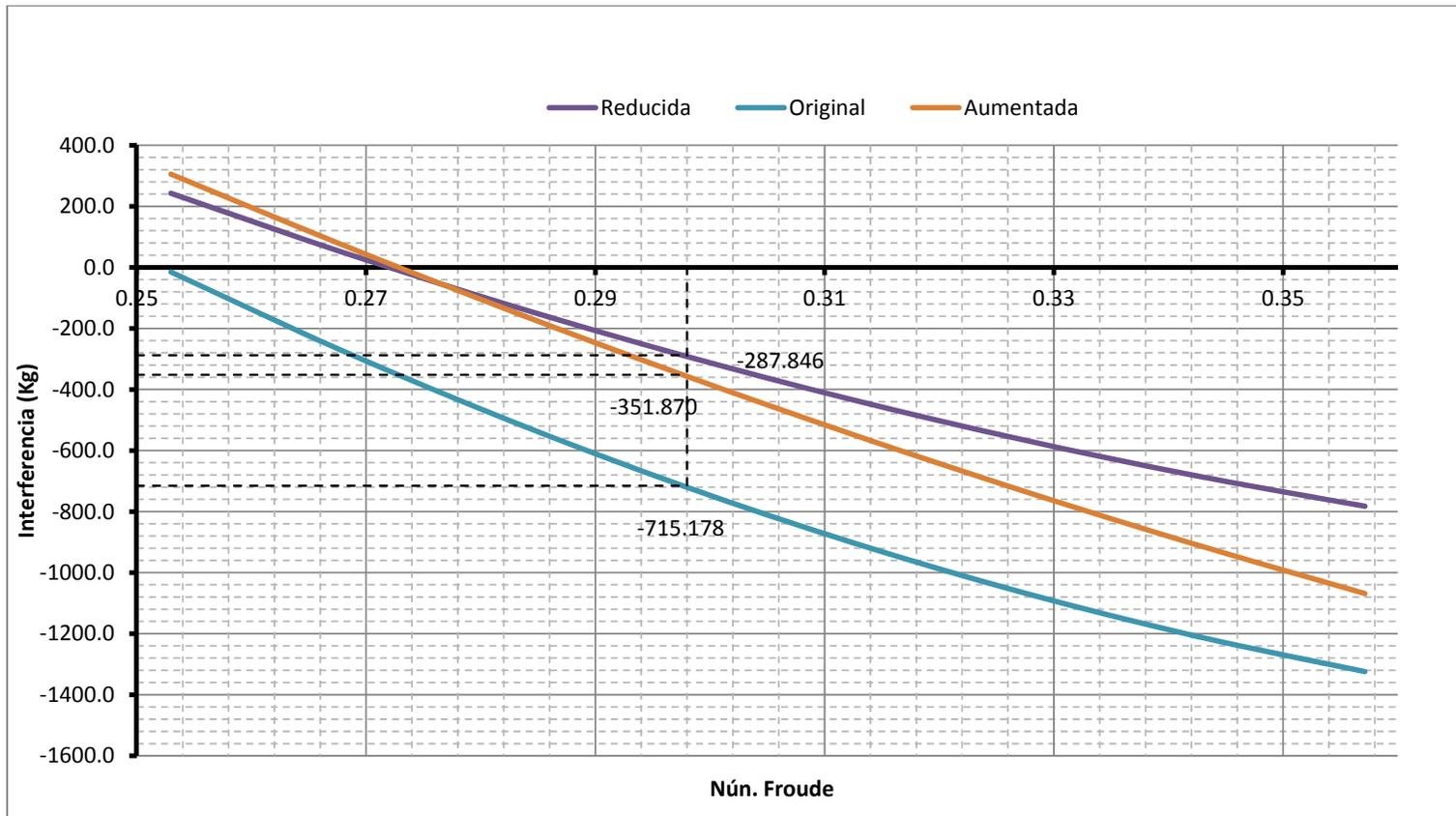


Figura No. 34 Interferencia del Buque Prototipo vs Número de Froude para la Condición de Carga Ligera.

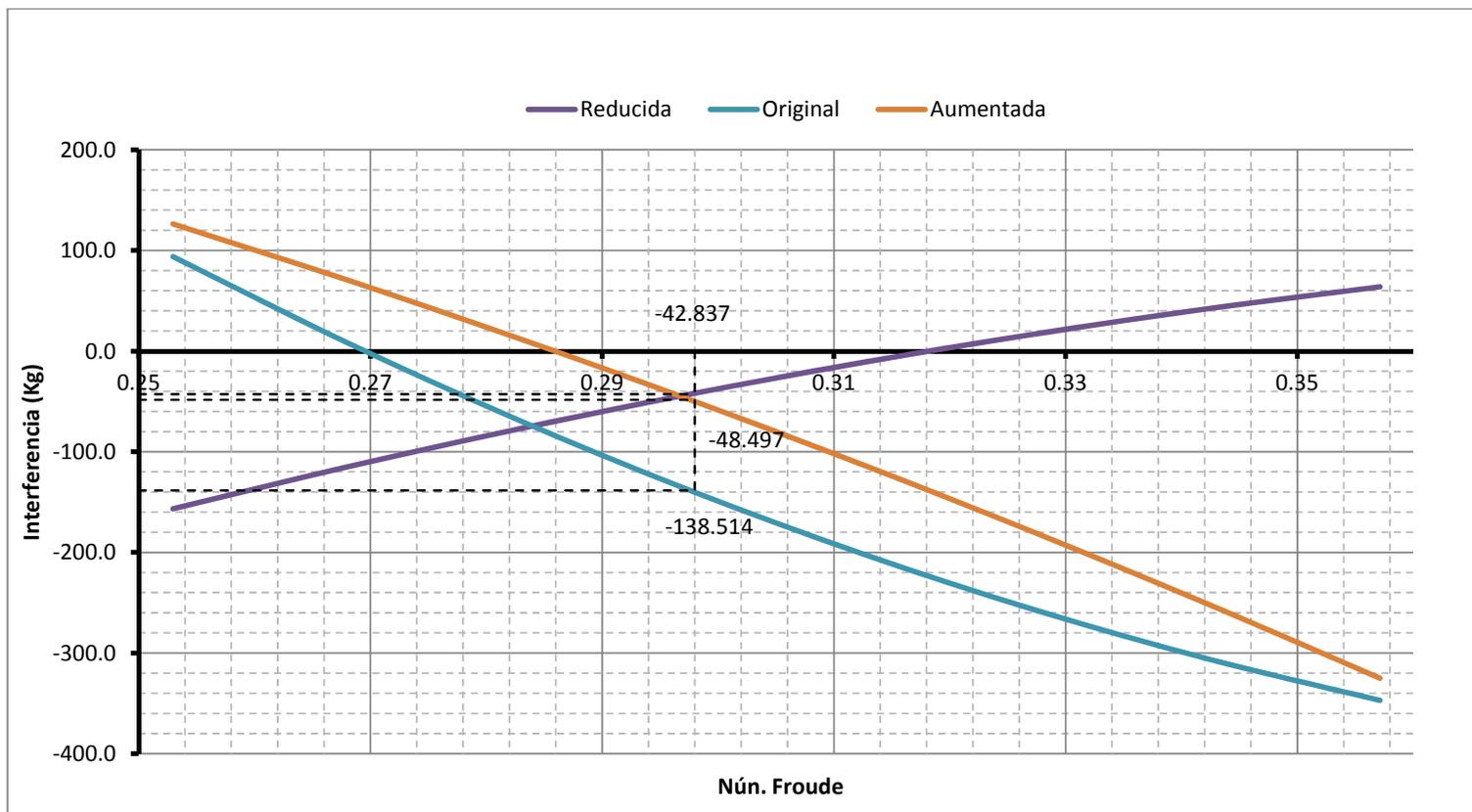


Figura No. 35 Interferencia del Buque Prototipo vs Número de Froude para la Condición de Carga Cargado.

Para la velocidad de diseño en todas las separaciones, la Interferencia entre semicasos del buque Prototipo produce una disminución en la Resistencia Total. La que más contribuye en el decremento de la Resistencia, es la separación de original con una interferencia de -715.18 Kg, y, -138.51 Kg en Condición Ligera y Cargada respectivamente.

CONCLUSIONES.

En este trabajo, la Interferencia por olas generadas entre los semicascos del modelo del catamarán de diseño nacional “Cormorant Evolution” de 32.5 metros de eslora, se calcula teóricamente por el método de Yokoo y Tasaki. Luego experimentalmente se determina dicho parámetro por medio de pruebas de arrastre de un modelo de 2 metros de eslora desde un bote en el lago de la ESPOL. Finalmente se concluye lo siguiente:

1. El método desarrollado por Yokoo y Tasaki para estimar la Interferencia de la Resistencia por olas generadas entre semicascos de un catamarán es un método muy sencillo de aplicación. Este método analiza el flujo potencial mediante una distribución de fuentes y sumideros, es decir que considera

que el fluido es del tipo ideal, lo que incluye una simplificación al problema. Pero lo que hace sencilla su aplicación, es que aun si se desconoce la Resistencia Residual, permite estimar la Interferencia de una manera cuantitativa utilizando tan solo tres variables básicas: el número de Froude, la relación entre la separación entre semicascos y la eslora, y, la velocidad de crucero.

2. La forma utilizada para construir el modelo a escala para la realización de las pruebas, resultó exitosa, aun cuando las líneas de formas tienen mucha curvatura en la zona del bulbo de proa. Para la construcción del modelo se elaboraron cuadernas en plancha de plywood y luego se forró la estructura con láminas de fibra de vidrio; en la zona del bulbo de la proa se procedió a utilizar macilla para posteriormente lijarlas para darle la forma deseada. Cabe mencionar que a pesar de que el modelo tenía bulbo la construcción no resultó complicada.

3. Ante la ausencia de un tanque de pruebas, el realizarlas desde un bote con un brazo lateral para arrastrar el modelo del catamarán resultó bastante eficiente. El utilizar un bote, dio mas libertad en el rango de velocidad, ya que se puede cambiar el motor fuera de borda, para aumentar o disminuir la velocidad de las pruebas. Sin embargo, la prueba tiene potenciales

limitantes, uno de ellos es la velocidad del viento; por eso con un anemómetro se la midió y se llegó a la conclusión que en este caso no afectó a los resultados. Otro inconveniente es el tratar que los movimientos de la lancha no afecten el movimiento del modelo. Para verificar cuanto afectaba esto, se observó el Coeficiente de Variación de cada registro de la celda de carga y al ver que fue relativamente bajo se pudo validar los datos.

4. Los resultados teóricos de la Interferencia de la Resistencia entre semicascos obtenidos con el método de Yokoo y Tasaki presentan una variación similar a una función armónica conforme varía el número de Froude. Esto quiere decir que, presenta regiones con signo negativo, luego el signo cambia a positivo y viceversa. En cambio, los resultados experimentales muestran un comportamiento decreciente o creciente, pasando de positivo a negativo o viceversa. Esto parece razonable porque la viscosidad en los fluidos reales tiende a producir ese efecto de amortiguar las variaciones.

5. De los resultados experimentales con el modelo, la menor Interferencia entre los semicascos a la velocidad equivalente de diseño (2.48 nudos), se presenta con la Separación Original entre semicascos (0.561 m). Se registra una reducción de la Resistencia Total al avance de -0.167 Kg en condición

Ligera y -0.032 Kg en condición Cargada. También hay que resaltar, que para la Condición Cargada con una separación de semicascos Reducida las Interferencias aumentaban la Resistencia Total del catamarán. Entonces, en función de los resultados experimentales se concluye, que para el catamarán de diseño ecuatoriano "Cormorant Evolution", se eligió una correcta separación entre semicascos.

6. Los resultados de las pruebas experimentales se los puede utilizar para estimar la separación entre semicascos de un catamarán a diseñar. De los resultados se generó una gráfica adimensional (Figura E1), en la que se puede estimar separación entre semicascos, observando la menor Interferencia a un número de Froude dado y con la eslora del catamarán (Un Ejemplo en Apéndice E).

RECOMENDACIONES

Para pruebas futuras, sería muy útil disponer de un medidor de velocidad para la estela adecuado. Esto porque, el disponible actualmente es muy alto y pesado, entonces en el momento de arrastrar el semicasco producía inestabilidad, razón por la cual no se pudo medir la velocidad dicho parámetro. Además, sería recomendable que se construya una protección contra el agua a los equipos electrónicos (Fuente de la celda, inversor y batería), ya que hay peligro que se mojen y se dañen. También es muy importante organizar los equipos, de tal manera que, se asegure su conexión todo el tiempo.

APÉNDICES

APÉNDICE A.

CALCULO EXPERIMENTAL DEL LCG DEL MODELO DE UN SEMICASCO.

Para el cálculo experimental de la posición del centro de gravedad longitudinal (LCG) del modelo de un semicasco del catamarán, se necesita pesarlo sujetándolo en dos puntos de apoyo. Luego por sumatoria de momentos, se encuentre el LCG de un semicasco. A continuación se muestra un esquema del problema:

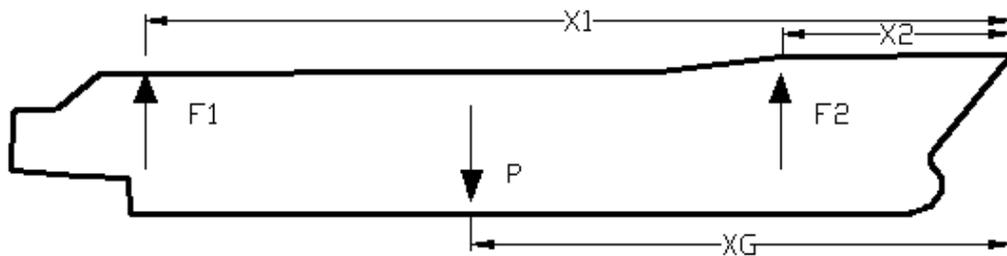


Figura A - 1 Cálculo del LCG del modelo

Para el presente caso se midieron los siguientes valores:

F1= 4.96 Kg.

F2= 4.58 Kg.

P = 9.54 Kg.

X1= 1.51 m.

X2= 0.47 m.

Haciendo sumatorias de momento con respecto al extremo de proa se tiene:

$$X_G = \frac{4.58 \cdot 0.47 + 4.9 \cdot 1.51}{9.54}$$

$$X_G = 1.01 \text{ m}$$

Por lo tanto la posición del LCG es: -1.01 m (+Pr desde ext. Proa)

Para comparar el desplazamiento y el LCG del modelo que se construyó con los planos de diseño, se desarrollaron los cálculos hidrostáticos al desplazamiento ligero, con los calados observados en esta condición: 6.5 cm en proa y 7.5 cm en popa.

A continuación se muestra la comparación del desplazamiento y LCG del modelo y del diseño:

	Diseño	Modelo
Desplazamiento (Kg)	9,313	9,54
LCG (cm)	103,75	101

Tabla A - 1 Comparación del LCG Diseño y Modelo

Se puede observar que los valores obtenidos son muy cercanos entre ellos, por lo que el modelo construido se asemeja a las líneas de formas del diseño.

APÉNDICE B.

UBICACIÓN Y DIMENSIONES DE LOS ESTIMULADORES DE TURBULENCIA.

La figura mostrada a continuación tomada de Hughes y Allan (1951) y el reporte de NPL 10/59 (1960), presenta una guía para determinar las dimensiones y localización de los estimuladores de turbulencia. Estos dispositivos van instalados en una sección de Proa en ambas bandas de cada uno de los semicascos. Según la figura se necesita como dato el Angulo de Entrada en la línea de agua del calado a la máxima condición de carga y la eslora del modelo.

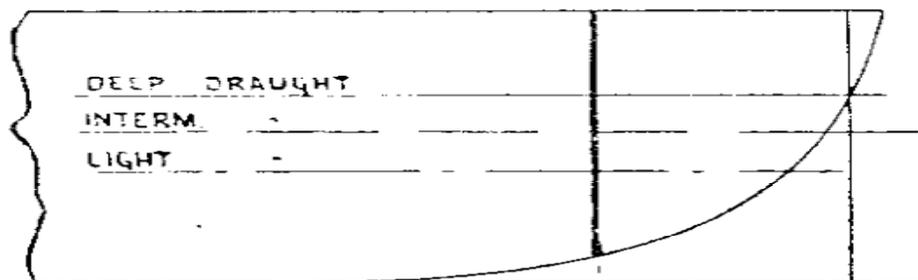


Figura B - 1 Esquema de Ubicación de estimuladores de turbulencia, [8].

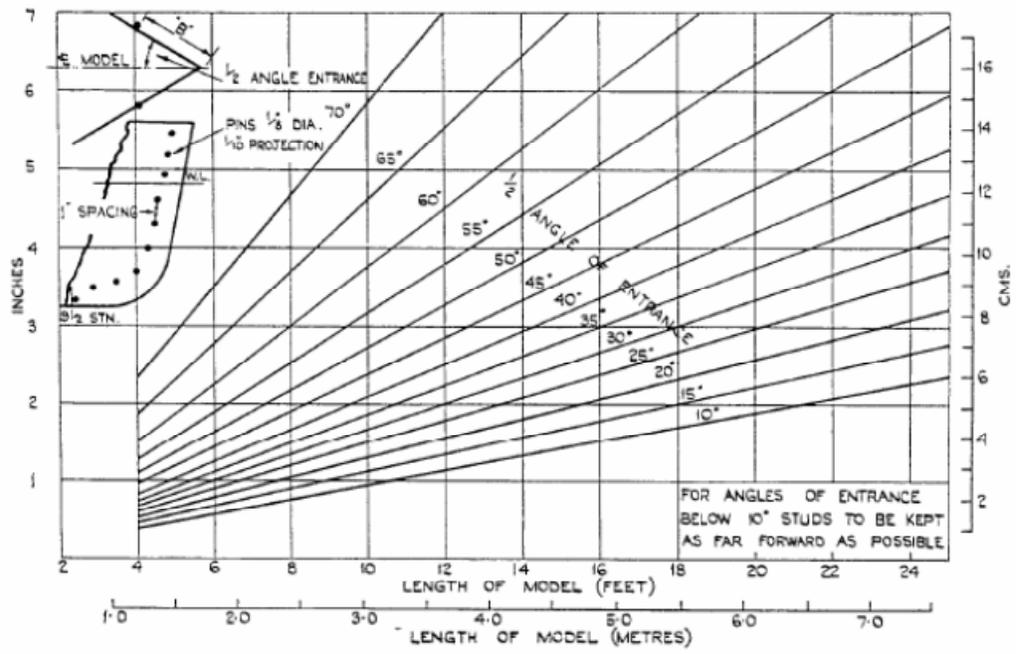


Figura B - 2 Cálculo de la ubicación de los Estimadores de Turbulencia, [8].

Dado que la Eslora del Modelo es 2 m y el ángulo de entrada en la Condición Cargada es 30°, entonces la distancia **B** es igual a 2 cm. Además el diámetro de cada estimulador es de 1/8" (3.2 mm), y sobresalidos 1/10" (2.54 mm) sobre la superficie del casco.

APÉNDICE C.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan las fuerzas obtenidas en las pruebas de arrastre del modelo del catamarán con las respectivas Desviaciones Estándar y Coeficiente de Variación (definido como % de dividir la Desviación Estándar para el Promedio).

	Velocidad [m/s]	Fuerza Equivalente Promedio [mv]	Desviación Estándar [σ]	Coefficiente de Variación [%]
Semicasco	0	4.64	0.62	13.4
	1.05	4.93	0.62	12.6
	1.2	5.18	0.66	12.7
	1.45	5.71	0.55	9.6
Disminuida	0	3.01	0.73	24.3
	1.06	3.77	0.71	18.8
	1.2	4.17	0.7	16.8
	1.44	4.41	0.64	14.5
Original	0	3.01	0.78	25.9
	1.05	3.77	0.6	15.9
	1.26	3.92	0.79	20.2
	1.47	4.21	0.76	18.1
Aumentada	0	3.1	0.69	22.3
	1.04	3.83	0.7	18.3
	1.36	4.27	0.67	15.7
	1.56	4.57	0.76	16.6

Tabla C - 1 Resultados para Condición Ligera.

	Velocidad [m/s]	Fuerza Equivalente Promedio [mv]	Desviación Estándar [σ]	Coefficiente de Variación [%]
Semicasco	0	6.48	0.64	10
	1.03	6.93	0.64	9
	1.23	7.16	0.65	9
	1.45	7.52	0.65	9
Disminuida	0	4.31	0.72	17
	1.04	5.33	0.73	14
	1.21	5.4	0.68	13
	1.48	6.79	0.7	10
Original	0	2.69	0.72	27
	1.05	3.87	0.7	18
	1.25	4.19	0.66	16
	1.46	4.49	0.68	15
Aumentada	0	1.35	0.76	56
	1	1.7	0.71	42
	1.22	2.09	0.77	37
	1.46	2.66	0.71	27

Tabla C - 2 Resultados para Condición Cargada.

Nótese la alta variación para velocidad nula, tomada como referencia. Esto indica la necesidad de filtrar la señal antes de utilizarla.

Además al observar los valores registrados posiblemente las fuerzas son muy pequeñas para la celda que fue utilizada para medir la resistencia.

PRUEBA DE UN SEMICASCO EN CONDICION LIGERA

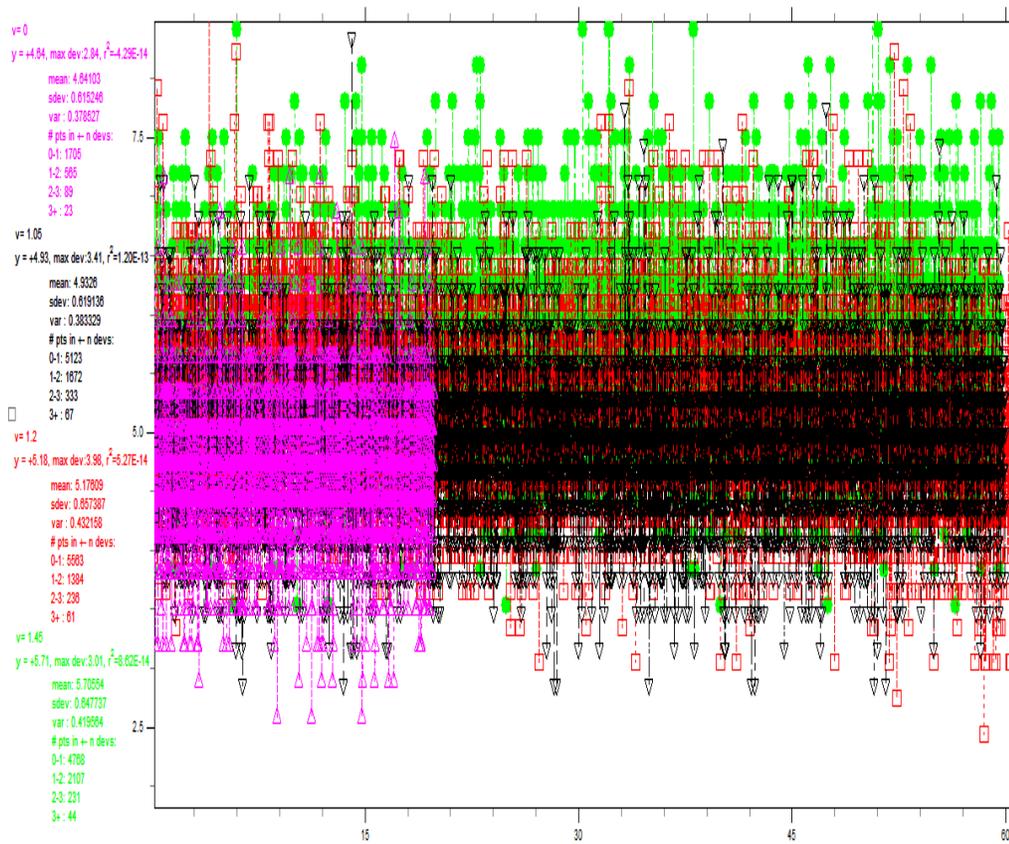


Figura C - 1 Fuerzas Registradas de un semicasco en Condición Ligera a Velocidades (0, 1.05, 1.2, 1.45 m/seg)

PRUEBA DE UN SEMICASCO EN CONDICION CARGADA

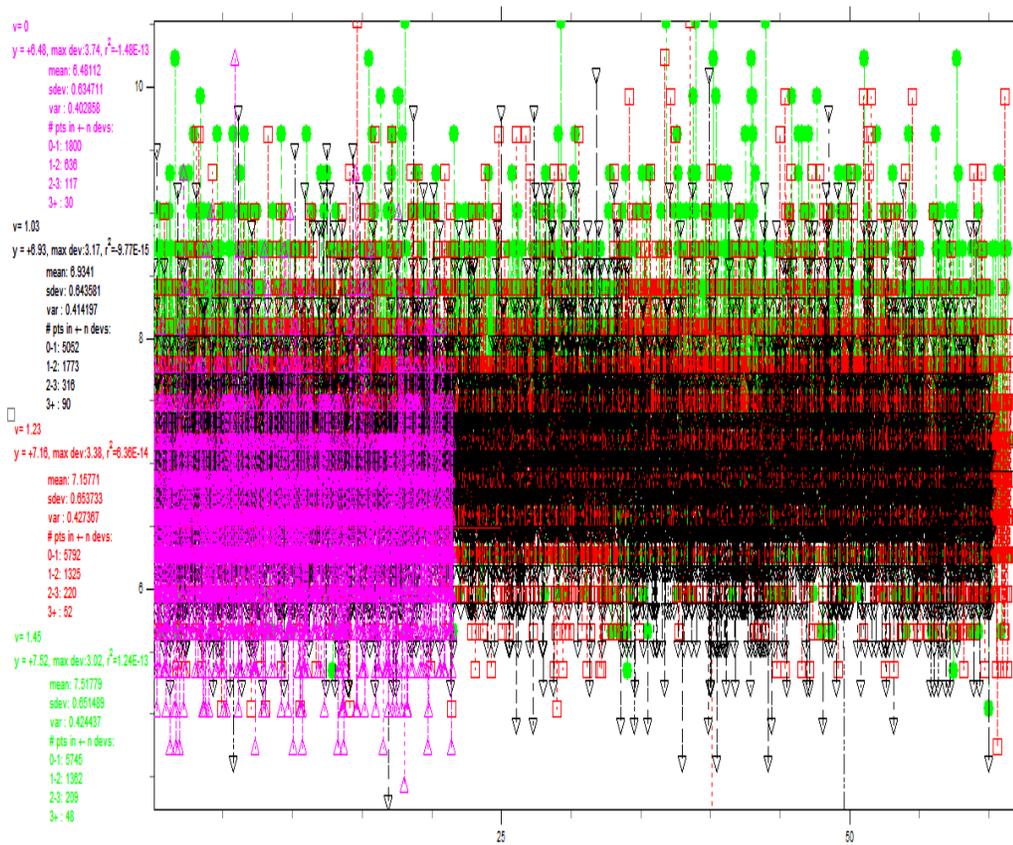


Figura C - 2 Fuerzas Registradas de un semicasco en Condición Cargada a Velocidades (0, 1.03, 1.23, 1.45 m/seg).

Prueba De Catamarán En Condición Ligera Separación Aumentada.

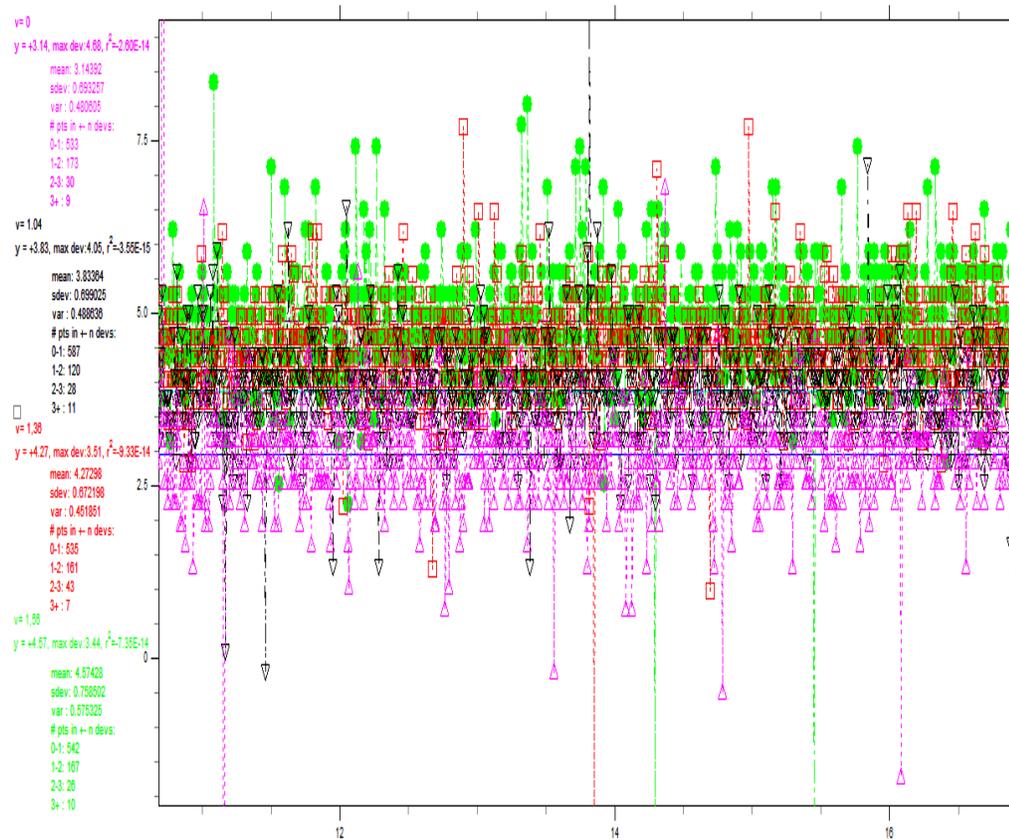


Figura C - 3 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Aumentada Condición Ligera a Velocidades (0, 1.04, 1.36, 1.56 m/seg).

Prueba De Catamarán En Condición Cargada Separación Aumentada.

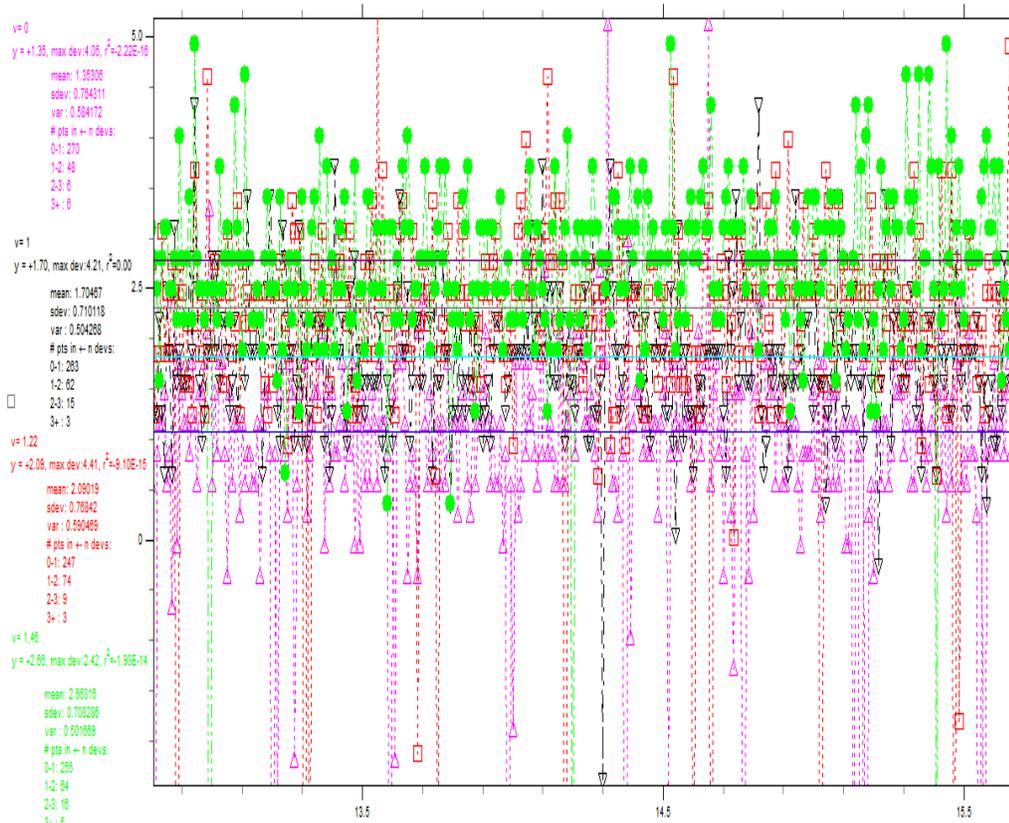


Figura C - 4 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Aumentada Condición Cargada a Velocidades (0, 1.04, 1.36, 1.56 m/seg).

Prueba De Catamarán En Condición Ligera Separación Reducida.

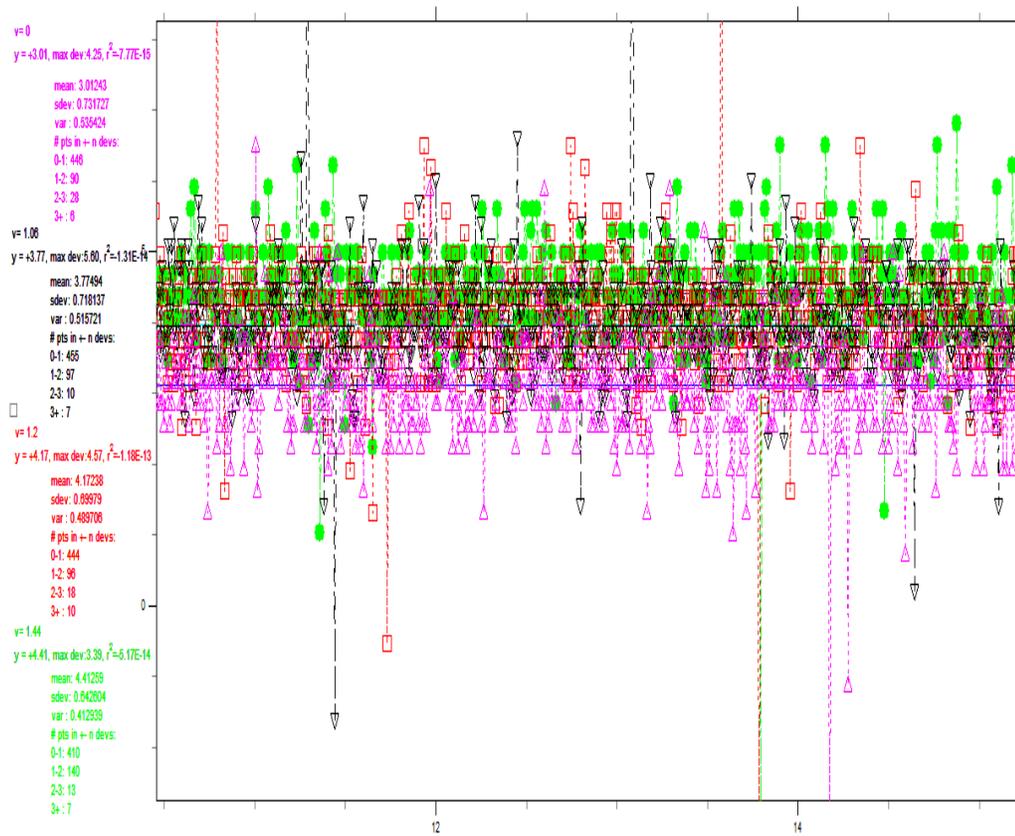


Figura C - 5 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Reducida

Condición Ligera a Velocidades (0, 1.06, 1.2, 1.44 m/seg).

Prueba De Catamarán En Condición Cargada Separación Reducida.

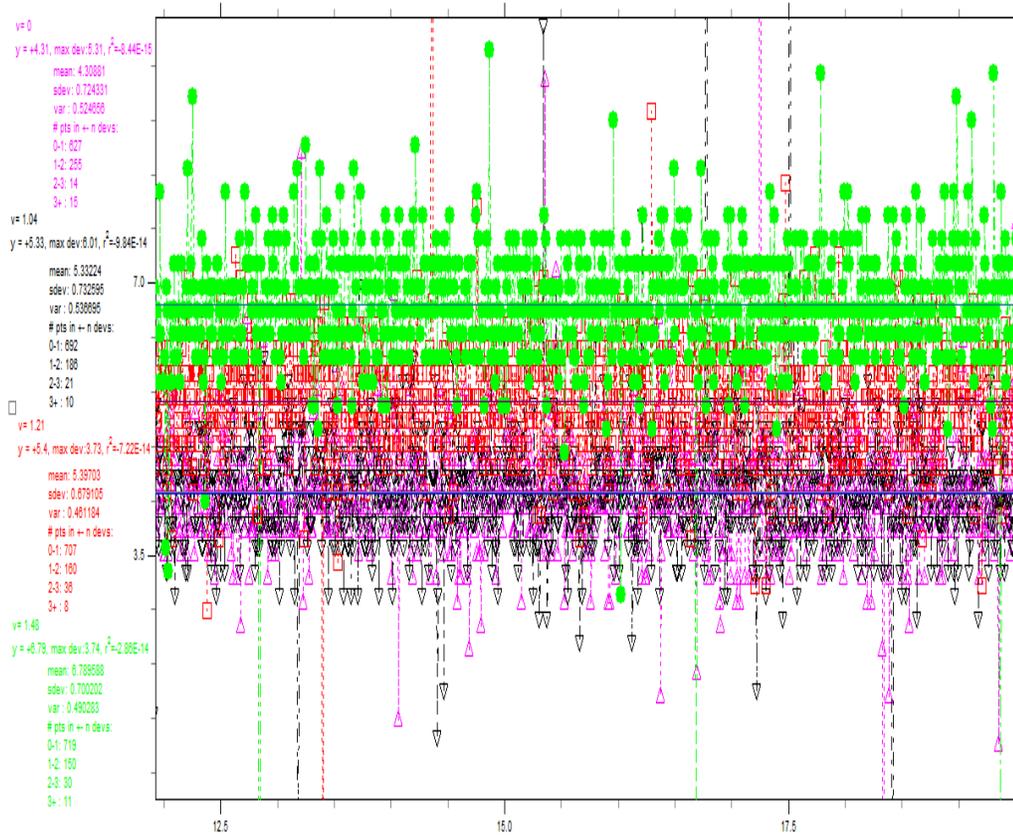


Figura C - 6 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Reducida

Condición Cargada a Velocidades (0, 1.04, 1.21, 1.48 m/sec).

Prueba De Catamarán En Condición Ligera Separación Original.

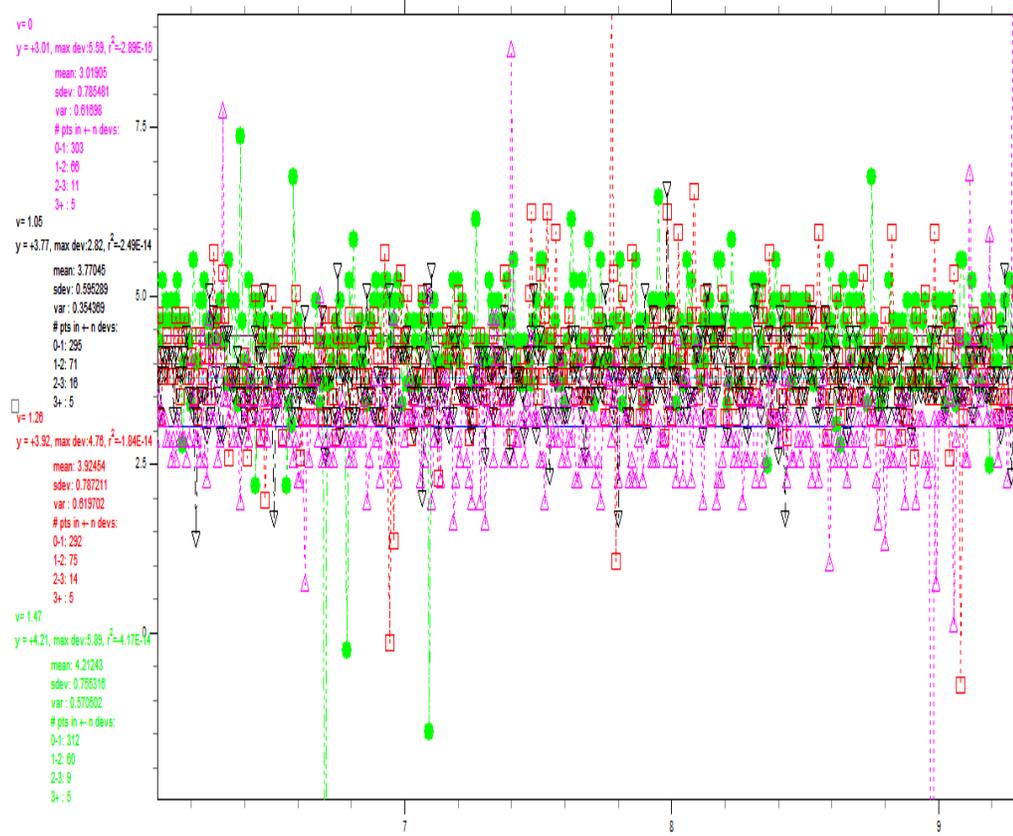


Figura C - 7 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Original

Condición Ligera a Velocidades (0, 1.05, 1.26, 1.47 m/sec).

Prueba De Catamarán En Condición Cargada Separación Original.

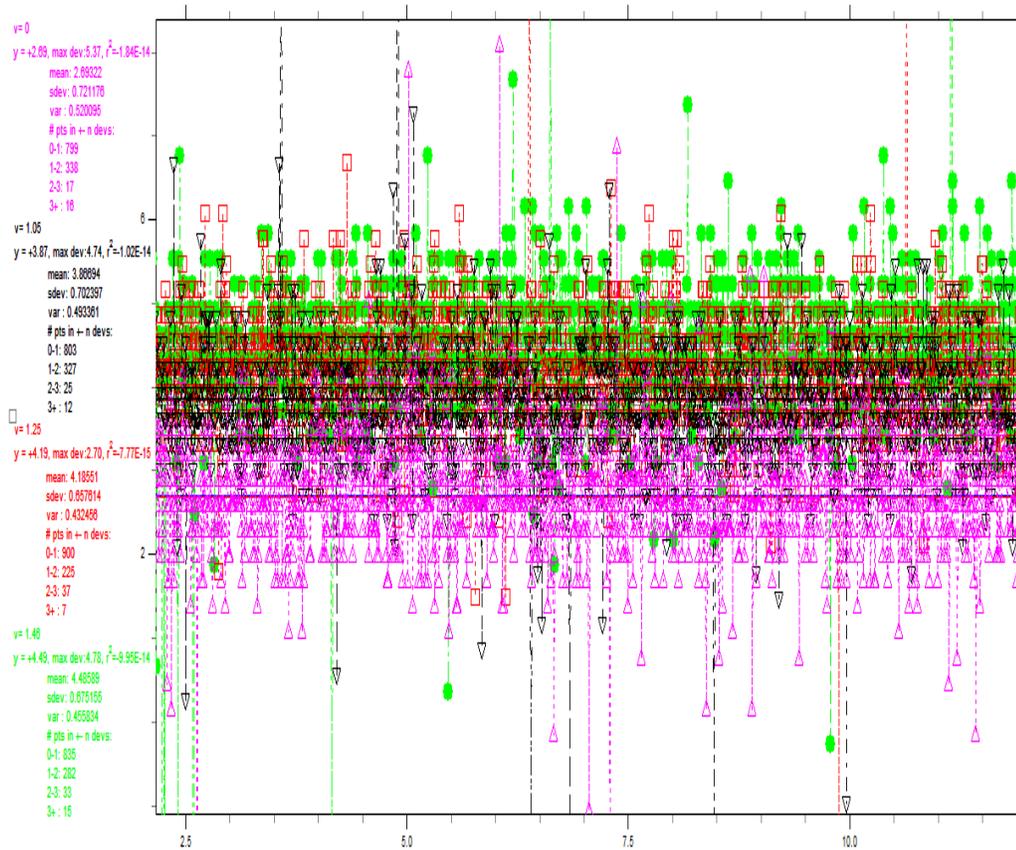


Figura C - 8 Fuerzas Registradas de un catamarán en Separación Original

Condición Cargada a Velocidades (0, 1.05, 1.26, 1.47 m/seg).

APENDICE D

COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON UN TRABAJO DE LA UNIVERSIDAD DE SOUTHAMPTON

El reporte de la Universidad de Southampton, [4], presenta el resultado de un programa de experimentos consecutivos. Ellos presentan la Resistencia Total para varios modelos de Catamaranes, variando las relaciones eslora – desplazamiento y Manga – Calado, y, la separación entre semicascos. Entre los diferentes modelos que se analizan en dicho trabajo, el que tiene más similitud con el estudiado en la presente tesis, es el llamado “4B”. Las relaciones del modelo de Southampton que se acerca al modelo son con la Separación Original en sus dos condiciones de carga. A continuación se muestran sus características principales:

	Modelo Tesis Sep. Ori.		Mod. de Southampton
	Ligero	Cargada	4B
Eslora en Flotación(m)	1,873	1,886	1,600
Manga (m)	0,190	0,200	0,178
Calado (m)	0,086	0,103	0,089
Δ (Kg)	0,018	0,024	0,010
2k/L	0,300	0,299	0,300
L/B	9,858	9,430	9,000
B/T	2,209	1,942	2,000
$L/\Delta^{1/3}$	7,147	6,538	7,410

Tabla D - 1 Características del modelo de Southampton y del modelo presente.

Tomando los valores de Coeficiente de Resistencia Total los valores de Resistencia e Interferencia para el modelo 4B son:

Vel. (m/s)	Num. Froude	Semicasco		Catamaran		Rw (Kg)
		C_{RT}	Rt (Kg)	C_{RT}	Rt (Kg)	
1,540	0,200	7,20E-03	0,078	7,43E-03	0,080	-0,038
1,925	0,250	7,00E-03	0,118	7,74E-03	0,131	-0,053
2,311	0,300	7,74E-03	0,188	8,32E-03	0,202	-0,087
2,696	0,350	7,84E-03	0,260	8,89E-03	0,295	-0,112
3,081	0,400	8,49E-03	0,367	9,90E-03	0,428	-0,153
3,466	0,450	9,28E-03	0,508	1,17E-02	0,638	-0,189

Tabla D - 2 Resistencia Total e Interferencia del modelo 4B

Los valores de Interferencia para el modelo del “Cormorant Evolution” en su Separación Original entre semicascos para sus dos condiciones de carga se calcula con la fórmula:

$$R_w = \frac{R_{T \text{ CAT}} - 2R_T}{2}$$

Se presente en la siguiente tabla los valores de la Interferencia entre semicascos para la Separación Original:

V(Nudos)	Fn	Rw (Kg)	
		Ligera	Cargada
1,860	0,223	0,132	0,066
1,984	0,238	0,062	0,043
2,108	0,253	-0,004	0,022
2,232	0,268	-0,063	0,002
2,356	0,283	-0,118	-0,016
2,480	0,298	-0,167	-0,032
2,604	0,312	-0,210	-0,047
2,728	0,327	-0,248	-0,060
2,852	0,342	-0,281	-0,071
2,976	0,357	-0,309	-0,081
3,100	0,372	-0,331	-0,089
3,224	0,387	-0,347	-0,095
3,348	0,402	-0,358	-0,100
3,472	0,417	-0,364	-0,102
3,596	0,432	-0,365	-0,104
3,720	0,446	-0,360	-0,103

Tabla D - 3 Interferencia entre semicascos para la separación Original del modelo “Cormorant Evolution”.

A continuación se presenta la grafica que compara las Interferencias de estos dos trabajos:

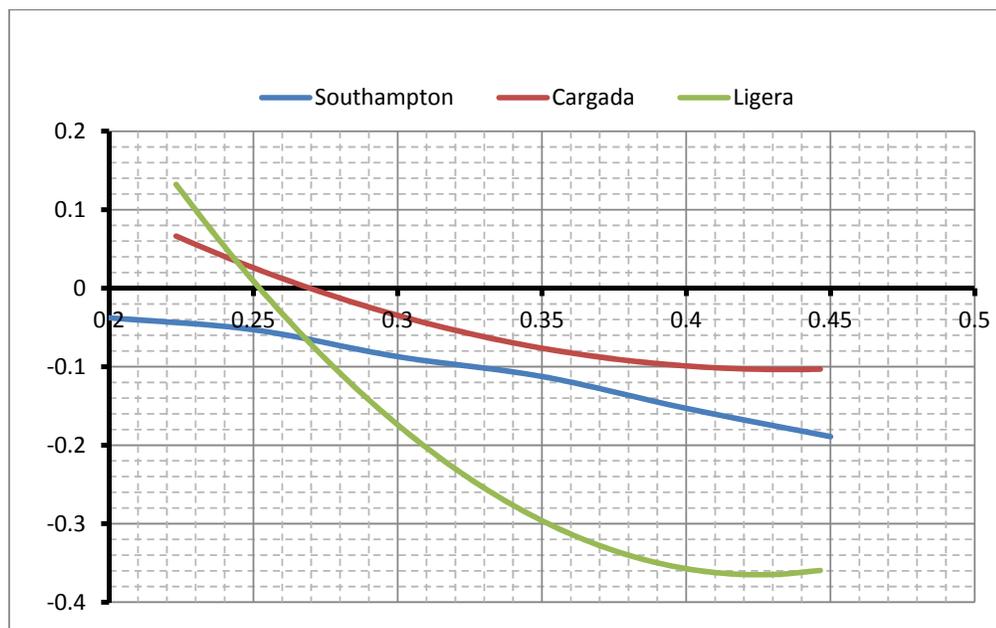


Figura D - 1 Interferencia entre semicascos vs Número de Froude

Se observa la tendencia similar entre los resultados de este trabajo y los de Southampton, por lo que se puede decir que los resultados obtenidos con los equipos empleados lucen razonables.

APENDICE E

Ejemplo Práctico para Encontrar la Separación entre Semicascos en un Catamarán.

A partir de los resultados Experimentales, se presenta una gráfica en la cual en el eje de las X se tiene el número de Froude y en el de las Y la interferencia como un porcentaje de la resistencia residual.

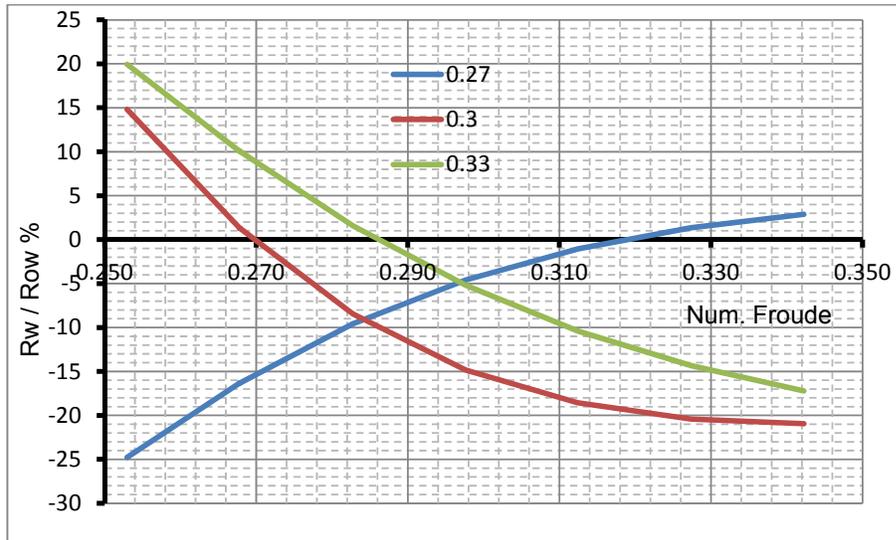


Figura E1.- Porcentaje de Interferencia para las distintas separaciones

Por ejemplo:

Se quiere diseñar un catamarán de 25 metros de eslora el cual se va a dedicar a la actividad turística en las Islas Galápagos, este va a navegar a 10

Nudos. ¿Cuál es la separación entre semicascos, la cual produzca una mayor reducción a la resistencia?

Primeramente se calcula el número de Froude para dicha velocidad.

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{(10 \times 0.5144)}{\sqrt{9.81 \times 25}} = 0.328$$

Entrando con el número de Froude en la gráfica vemos en cual curva se da la menor interferencia:

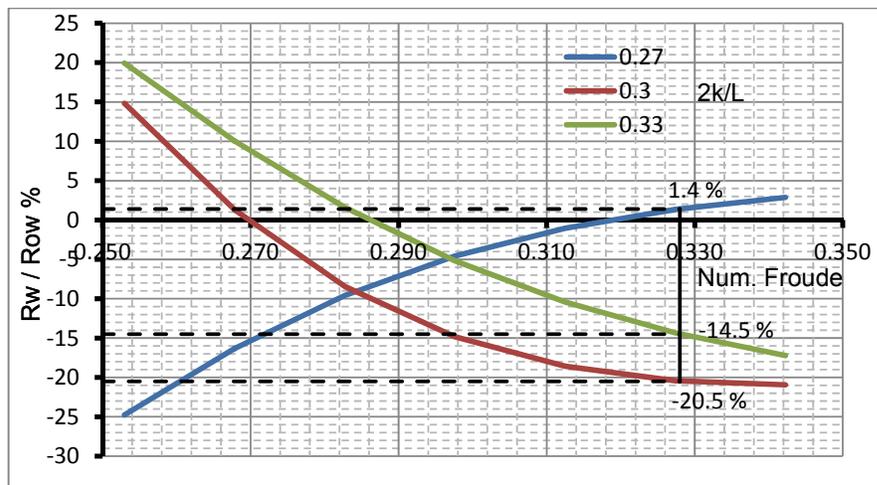


Figura E2.- Cálculo de la menor Interferencia

Se observa que para un $2k/L = 0.3$ tiene una reducción por Interferencia de 20.5%, por lo tanto la separación entre semicasco es:

$$\frac{2k}{L} = 0.3$$

$$2k = 0.3 \times 22$$

$$2k = 6.6 \text{ m.}$$

Entonces, para la separación de 6.6 m. vamos a tener una reducción de la Resistencia Residual de 20.5 % por efecto de Interferencia.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Astillero y Marina BOTTO CIA. LTDA, Memoria Técnica del Catamarán Cormorant Evolution, 2010.
- [2]. HOLTROP J. y MENNEN G., "Approximate Power Prediction Method", 1984.
- [3]. ARAUZ D. y VARGAS A., Programa de Holtrop, Espol, 2010.
- [4]. VAN MANEN J. D. y VAN OOSSANEN P., Resistance, Capítulo 5 en el PNA Vol II editado por Lewis G. SNAME 1988.
- [5]. YOKOO K. y TASAKI Ryo, Reporte Técnico No1: "On the twin-hull ship" of the University of Michigan, 1951.
- [6]. YOKOO K. y TASAKI Ryo, Technical Report No2: "On the twin-hull ship" of the University of Michigan, 1951.
- [7]. ALAEZ JOSE A., "EMBARCACIONES RAPIDAS DE POCO DESPLAZAMIENTO", Seminario organizado por el CINAVE.

- [8]. INTERNACIONAL TOWING TANK CONFERENCE, "Recommended, Procedures and Guidelines of Model Manufacture Ship Models", 2002.
- [9]. VACA B., Apuntes de la materia Resistencia y Propulsión. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (2006).
- [10]. MOLLAND A., WELLICOME J. y COUSER P., Tesis "Resistance Experiment on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio". University of Southampton, Marzo 1994.