



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y
Recursos Naturales

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PRESIÓN
DINÁMICA EN EL FONDO DE UNA EMBARCACIÓN
PLANEADORA**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO NAVAL

Presentado por:

LUIS EDUARDO SÁNCHEZ LÓPEZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

2013

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme y estar presente en cada etapa de mi vida; a mis padres, hermana y novia por darme su infinito apoyo, así como, comprensión en la realización de una nueva meta en mi vida. A mi director de tesis PhD. José Marín por su constante tutela y orientación en la elaboración de este documento.

DEDICATORIA

A Dios, mis padres y hermana, por su guía y devota motivación brindada para la culminación del presente trabajo, a sus consejos y enseñanzas, convirtiéndose en los pilares fundamentales de mi educación académica y de la vida. Y a mi novia por sus incansables y afables consejos llenos de motivación en todo momento.

TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Marco Velarde, M.Sc.
Presidente del Tribunal

José R. Marín L., PhD.
Director de Tesis

Ing. Alejandro Chanabá. M.Sc.
Miembro Principal

Ing. Roberto Morante
Miembro Suplente

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica de Litoral”.

(Reglamento de Exámenes y Título Profesionales de la ESPOL)

Luis Eduardo Sánchez López

RESUMEN

En esta tesis se analizó la presión en el fondo de una embarcación planeadora prototipo de 25.76 m de eslora y 74.19 ton de desplazamiento ligero con un ángulo de astilla muerta de 15° diseñada para operar a 27 nudos. Se estimó la presión dinámica, usando las “*Guías para Construcción y Clasificación de Embarcaciones de Alta Velocidad*”, [4], de la Sociedad Clasificadora American Bureau of Shipping (ABS) 2012. En los cálculos se obtuvieron los valores de aceleración vertical y de presión para 3 condiciones de carga: Salida de Puerto o Condición Máxima, con 90 toneladas de desplazamiento, Condición de Servicio, y, Llegada a puerto o Condición Ligera, con el 83% y 76% respecto de la salida. Se determinó que las variables que más influyen en la estimación de la presión Dinámica son: aceleración vertical del CG, desplazamiento y el factor F_D que depende de la separación relativa de refuerzos respecto del área del fondo. El valor máximo de aceleración fue 2.14 g's para la Condición Ligera y el presión de presión fue, 165.45 kN/m² en Condición máxima.

Luego se realizaron pruebas de caída libre usando un modelo del buque de 1.70 m de eslora y 13.5 kg de peso, construido en madera. Los equipos usados, incluyen un acelerómetro, el cual se conecta a una tarjeta de

adquisición de datos. Se usaron campanas de construcción local para medir la presión a través de mangueras acopladas a orificios en el modelo dispuestos en 3 posiciones transversales. Las pruebas de caída libre del modelo fueron realizadas en una piscina de 6x3.8x1.0 m en la facultad de Ingeniería Marítima de la ESPOL y empezaban con la calibración de los equipos de medición y luego se dejaba caer libremente el modelo registrando la presión y aceleración luego de que era liberado. Se probaron 3 condiciones de carga del modelo (21.3, 23.3, 25.8 kg) y 3 alturas de caída (15, 20 y 25 cm) con medición de la presión en 3 posiciones longitudinales ($x/L_w = 0.29, 0.58, 0.95$). Cada prueba se la realizó 8 veces para confirmar la repetitividad del experimento.

Finalmente se realizó la filtración de los registros de presión y aceleración, y, usando el Teorema de los Números Adimensionales "II" de Buckingham se obtuvieron los correspondientes valores de presión para el prototipo. Los registros temporales muestran que las curvas de distribución de presión poseen un desfase promedio de 0.04 segundos entre posiciones de medición transversal. Y por último este trabajo muestra que los valores de presión registrados se encuentran 44% por debajo de la curva de ABS, confirmando la forma de la distribución longitudinal de presión y ratificando que la zona donde se presentan los valores de presión máximos, es en el centro de la semimanga de la china (b_c) alrededor de Sección Media.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS.....	X
INDICE DE TABLAS	XV
INDICE DE ANEXOS.....	XVIII
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1.....	4
CALCULO DE PRESION DINAMICA CON LAS REGLAS DE ABS 2012.	4
1.1 Descripción de la lancha planeadora.....	4
1.2 Resumen y Esquema del cálculo de ABS.	13
1.3 Cálculo de la Presión Dinámica.....	18
CAPITULO 2.....	22
PRUEBAS EXPERIMENTALES CON MODELO.....	22
2.1 Descripción del modelo y los equipos.....	22
2.2 Descripción del Proceso de las Pruebas.	28
2.3 Procesamiento de la Información.	31
2.4 Resumen de Resultados Experimentales.....	41

CAPITULO 3.....	54
ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL.....	54
3.1 Análisis Dimensional para la Presión Dinámica.....	54
3.2 Cálculo de Presión Dinámica en prototipo.	58
3.3 Resumen de valores de Presión Teórica y Experimental.	63
3.4 Análisis de Equivalencia de Presión Dinámica para cada condición.	66
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES.....	75
ANEXOS.....	76
BIBLIOGRAFIA.....	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Líneas de Forma del prototipo. Fuente: Elaboración Propia.....	6
Figura 2. Modelo de embarcación 3D. Fuente: Elaboración Propia.....	7
Figura 3. Curvas Hidrostáticas. Fuente: Elaboración Propia	8
Figura 4. Coeficientes de Forma. Fuente: Elaboración Propia	9
Figura 5. Variación de la Manga en la china. Fuente: Elaboración Propia....	10
Figura 6. Variación del ángulo de astilla muerta. Fuente: Elaboración Propia	11
Figura 7. Distribución Factor Fv, Fuente: Referencia [4].....	16
Figura 8. Diagrama del proceso de Cálculo de Presión. Fuente: Elaboración Propia.	17
Figura 9. Curvas de Distribución de Presiones. Fuente: Elaboración Propia	21
Figura 10. Modelo usado para las pruebas experimentales.	24
Figura 11. Esquema del conjunto. Fuente: Elaboración Propia	25
Figura 12. Modelo de embarcación y base. Fuente: Elaboración Propia	26
Figura 13. Equipos usados durante la prueba. Fuente: Elaboración Propia	27
Figura 14. Curvas de calibración de campanas. Fuente: Elaboración Propia	29
Figura 15. Posiciones longitudinales y transversales de medición. Fuente: Elaboración Propia.....	30
Figura 16. Calibración campana 1. Prueba 1. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia.....	32

Figura 17. Calibración campana 2.Prueba 1. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia.....	33
Figura 18. Calibración campana 3. Prueba 1. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia.....	33
Figura 19. Promediación de un escalón. Fuente: Elaboración Propia	34
Figura 20. Curva de conversión de campana. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia.....	35
Figura21. Curvas de presión y aceleración sin filtrar. Fuente: Elaboración Propia	36
Figura 22. Curvas de presión filtradas. Fuente: Elaboración Propia	37
Figura 23. Curva de aceleración filtrada. Fuente: Elaboración Propia	38
Figura 24. Curvas de Presión para una misma altura. Fuente: Elaboración Propia	39
Figura 25. Curva de Presión promediada típica. Fuente: Elaboración Propia	40
Figura 26. Presiones en posición longitudinal 1. Fuente: Elaboración Propia	44
Figura 27. Presiones en posición longitudinal 2. Fuente: Elaboración Propia	44
Figura 28. Presiones en posición longitudinal 3.Fuente: Elaboración Propia	45
Figura 29. Variación temporal de Presión, Prueba 8. Cond 1. h=15cm. Fuente: Elaboración Propia	46

Figura 30. Aceleraciones verticales, Condición de carga 1. Fuente: Elaboración Propia.....	47
Figura 31. Aceleraciones verticales. Condición de carga 2. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Figura 32. Aceleraciones verticales, Condición de carga 3. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Figura 33. Gráfico Presión-aceleración a $\frac{1}{4}$ de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia.....	50
Figura 34. Gráfico Presión-aceleración a $\frac{1}{2}$ de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia.....	50
Figura 35. Gráfico Presión-aceleración a $\frac{3}{4}$ de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia.....	51
Figura 36. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 1. Fuente: Elaboración Propia	52
Figura 37. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 2. Fuente: Elaboración Propia	52
Figura 38. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 3. Fuente: Elaboración Propia	53
Figura 39. Interpolación de Presión con aceleración vertical, Condición Ligera, Popa. Fuente: Elaboración Propia	61
Figura 40. Distribución longitudinal de presión en $b/2$. Condición de carga Ligera. Fuente: Elaboración Propia.....	64

Figura 41. Distribución longitudinal de presión en b/2. Condición de Servicio. Fuente: Elaboración Propia	65
Figura 42. Distribución longitudinal de presión en b/2. Condición máxima. Fuente: Elaboración Propia	65
Figura 43. Base para levantar el modelo.	76
Figura 44. Acelerómetro Brüel&Kjaer	77
Figura 45. Conexión Acelerómetro.	77
Figura 46. Tarjeta de adquisición de datos.	78
Figura 47. Campanas de Presión.	79
Figura 48. Conexión de las campanas de presión.	80
Figura 49. Medidor de deformaciones.	81
Figura 50. Densímetro	81
Figura 51. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 52. Presiones Experimentales. Condición de Servicio. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia	85
Figura 53. Presiones Experimentales. Condición máxima. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia	87
Figura 54. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.....	89
Figura 55. Presiones Experimentales. Condición de servicio. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia	91

Figura 56. Presiones Experimentales. Condición máxima. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia	93
Figura 57. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.....	95
Figura 58. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.....	97
Figura 59. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.....	99
Figura 60. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición Ligera en popa. Fuente: Elaboración Propia.....	100
Figura 61. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición Ligera. Fuente: Elaboración Propia.....	101
Figura 62. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición de Servicio. Fuente: Elaboración Propia.....	102
Figura 63. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición máxima. Fuente: Elaboración Propia	103

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Características Principales del Prototipo. Fuente: Elaboración Propia	5
Tabla II. Descripción de Condiciones de Navegación. Fuente: Elaboración Propia	11
Tabla III. Características de cada Condición. Fuente: Elaboración Propia ...	12
Tabla IV. Valor de altura de ola significativa. Fuente: Referencia[4].	14
Tabla V. Valor de Coeficiente FD. Fuente: Referencia[4].	15
Tabla VI. Datos para el cálculo de presión dinámica. Fuente: Elaboración Propia	19
Tabla VII. Resultados de aceleración y presión. Fuente: Elaboración Propia	19
Tabla VIII. Distribuciones de Presión. Fuente: Elaboración Propia.....	20
Tabla IX. Resumen de Presiones y Aceleraciones Máximas. Fuente: Elaboración Propia.....	21
Tabla X. Características principales modelo. Fuente: Elaboración Propia....	23
Tabla XI. Condiciones de carga del modelo. Fuente: Elaboración Propia	24
Tabla XII. Resumen de presiones y aceleraciones. Fuente: Elaboración Propia	1
Tabla XIII. Características de curvas presión-gravedad. Fuente: Elaboración Propia	49

Tabla XIV. Presiones estimadas para el prototipo en b/2. Fuente: Elaboración Propia	60
Tabla XV. Interpolación de presión. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Tabla XVI. Presión interpolada para aceleración de prototipo. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Tabla XVII. Presiones registradas y presiones promedio para condición de carga Ligera en popa. Fuente: Elaboración Propia.....	82
Tabla XVIII. Presiones registradas y presiones promedio para condición de Servicio en popa. Fuente: Elaboración Propia	84
Tabla XIX. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en popa. Fuente: Elaboración Propia	86
Tabla XX. Presiones registradas y presiones promedio para condición ligera en sección media. Fuente: Elaboración Propia.....	88
Tabla XXI. Presiones registradas y presiones promedio para condición en servicio en sección media. Fuente: Elaboración Propia.....	90
Tabla XXII. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en sección media. Fuente: Elaboración Propia	92
Tabla XXIII. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en proa. Fuente: Elaboración Propia.....	94
Tabla XXIV. Presiones registradas y presiones promedio para condición de Servicio en proa. Fuente: Elaboración Propia.....	96

Tabla XXV. Presiones registradas y presiones promedio para condición Ligera en proa. Fuente: Elaboración Propia	98
--	----

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	76
ANEXO B.....	82
ANEXO C.....	100

INTRODUCCION

Una embarcación de alta velocidad puede levantarse fuera del agua causando un impacto al ingresar de regreso al mar. El resultado de esta acción es una presión dinámica en el fondo, la cual depende del cuadrado de la velocidad relativa, y por tanto de mucha importancia en estas embarcaciones, llamadas planeadoras, [1]. En nuestro medio se han reportado casos de embarcaciones planeadoras que presentan fallas en su estructura del fondo, [2], por lo que es posible pensar que los Ingenieros locales no están familiarizados con la evaluación y aplicación de la presión Dinámica para diseñar adecuadamente la estructura del fondo de lanchas planeadoras.

La Presión Dinámica en el fondo de un bote planeador puede ser calculada por varios métodos, algunos de ellos empíricos, [3], otros establecidos por sociedades de clasificación, [4], ó, mediante métodos numéricos. Las formulaciones de sociedades de clasificación son de sencilla aplicación y proveen un valor constante en una sección cualquiera, que sólo varía espacialmente a lo largo de la eslora. Dado que estas formulaciones pretenden facilitar su aplicación directa, no reflejan la variación temporal de la presión, en una sección dada, [5]. Esto genera inquietud por no entender completamente el fenómeno, y limita la confianza en los resultados.

En la etapa de diseño de una lancha rápida, el estimar el comportamiento de la Presión Dinámica, permite alcanzar el diseño estructural adecuado. Además, el analizar los valores máximos temporales de la curva de Presión permitirá utilizar de manera adecuada la distribución equivalente estática, estimada por las sociedades de clasificación. Para perfeccionarnos en la estimación del parámetro mencionado, la forma adecuada de hacerlo, según recomienda [3], debe ser experimental. Esto es, realizando pruebas de Caída Libre, [6] y [7], de un modelo sobre el agua, y registrando la variación de presión cuando el modelo impacta el agua. Todo esto permitirá una mejor comprensión del fenómeno cuando la embarcación se encuentre en operación.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la distribución de presión dinámica en el fondo de una embarcación planeadora, mediante pruebas de modelo en Caída Libre (*Drop Test*).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la distribución de la Presión Dinámica en el fondo mediante las formulaciones de la Sociedad Clasificadora ABS 2012 para una lancha planeadora prototipo.

- Determinar experimentalmente la distribución espacial y temporal de la Presión Dinámica en el fondo mediante pruebas de Caída Libre del modelo.
- Calcular la distribución de presión dinámica a partir de los resultados experimentales para la embarcación prototipo.

BENEFICIOS

El presente trabajo servirá de consulta cuando se requiera determinar experimentalmente la distribución de la presión dinámica y así comprender de su fenómeno en el fondo de una lancha rápida. Se podrá entonces, usar con mayor confianza el valor de presión que es aplicado en el cálculo de la estructura del fondo.

HIPÓTESIS

La variación temporal de la presión dinámica en el fondo una embarcación, puede estudiarse de manera experimental mediante pruebas de caída libre.

CAPITULO 1.

CALCULO DE PRESION DINAMICA CON LAS REGLAS DE ABS 2012.

1.1 Descripción de la lancha planeadora.

La embarcación planeadora prototipo que será analizada en esta tesis tiene 25.76 m de eslora y se espera que alcance 26.6 nudos de velocidad. Posee una china que va desde el espejo hasta el 70% de la eslora juntándose desde ese punto con el perfil de proa. El ángulo de astilla muerta en el espejo y en Sección Media, son 15 y 25° respectivamente. De los cálculos hidrostáticos realizados, se obtuvo un centro de boyantez a 0.45 de L medido desde popa, para la condición de carga máxima. Para el estudio se analizaron tres condiciones de carga: Salida de Puerto, con 89.67 toneladas de desplazamiento a un calado medio de 1.4 m, Condición de Servicio y Llegada a Puerto, con el 83% y 90% respecto de la salida, a calados de 1.28 y 1.23 m, respectivamente.

La embarcación prototipo usada en esta tesis para analizar la presión en el fondo por caída libre, está basada en un modelo de embarcación que se encontraba disponible en el Laboratorio de Ingeniería Naval de la ESPOL. El factor de escala utilizado para el análisis fue 15.15. A continuación en la Tabla I se presentan las características principales de la embarcación prototipo:

Características principales		
Eslora Total	25.76	m
Eslora entre perpendiculares	24.00	m
Manga Total	5.89	m
Puntal	4.18	m
Calado de diseño	1.40	m
Desplazamiento cargado	74.19	ton
Velocidad	26.62	nudos
Astilla Muerta en Sección Media (β_{cg})	25	grados (°)
Tipo Embarcación	Planeadora	

Tabla I. Características Principales del Prototipo. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 1 se presentan las líneas de formas, notando su fondo en “V”, y sus formas finas en la vista transversal (relación $L/\Delta= 0.35$).

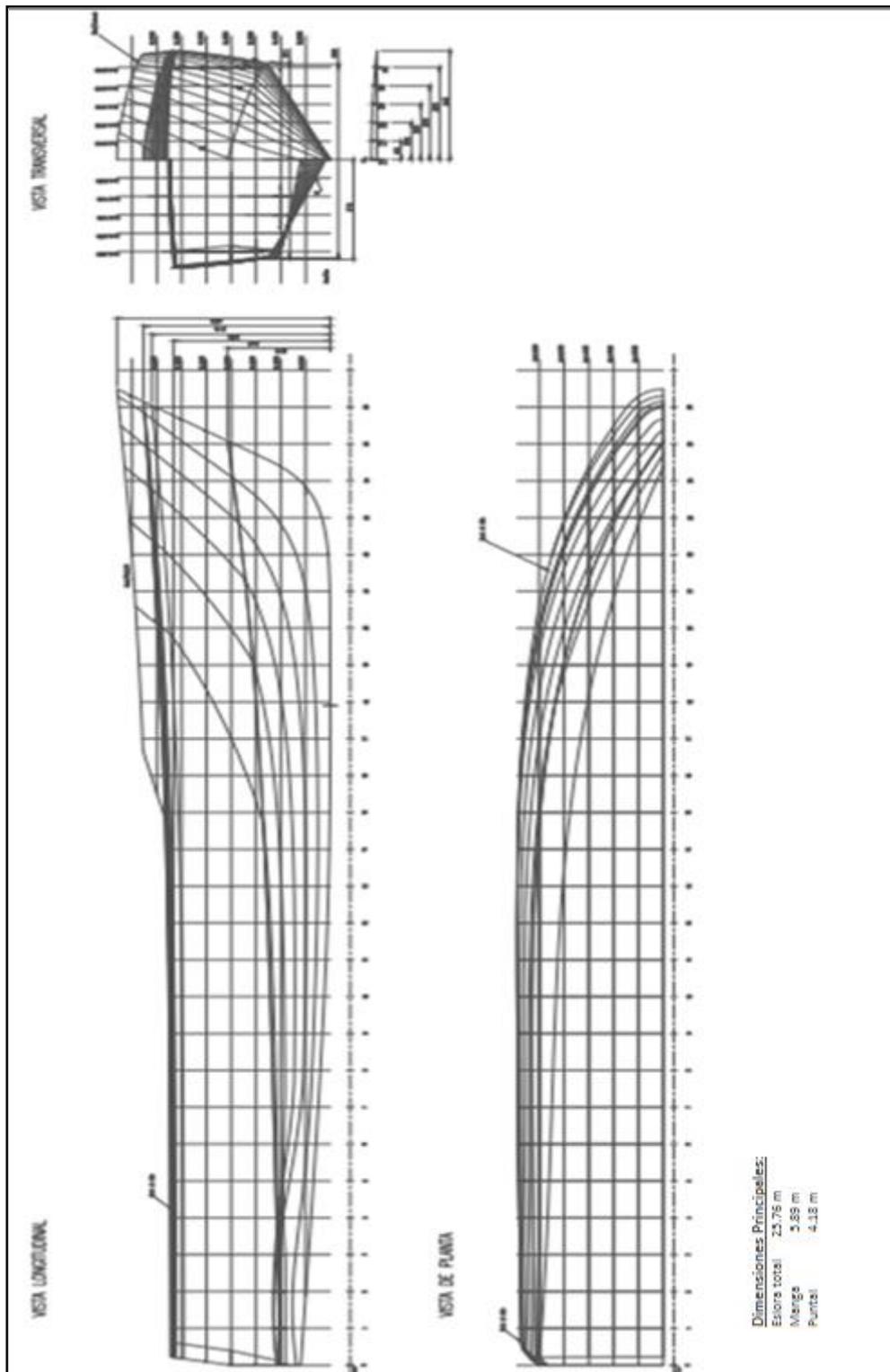


Figura 1. Líneas de Forma del prototipo. Fuente: Elaboración Propia

Con las líneas de forma, se desarrolló el modelo en tres dimensiones, como se muestra en la Figura 2:

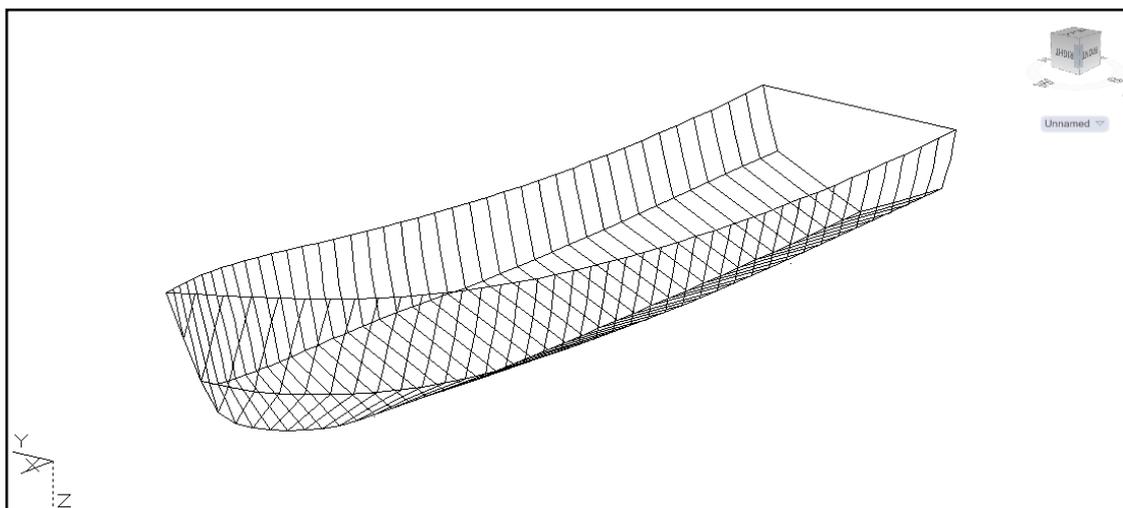


Figura 2. Modelo de embarcación 3D. Fuente: Elaboración Propia

Se realizaron los cálculos hidrostáticos empleando 41 estaciones y usando el programa CHidBuq.exe y se obtuvo un centro de boyantez y de flotación a 0.42 L y 0.40 L medidos desde popa, para la condición de carga ligera, con 74.19 ton de desplazamiento. A continuación, en la Figura 3 se presentan las curvas obtenidas.

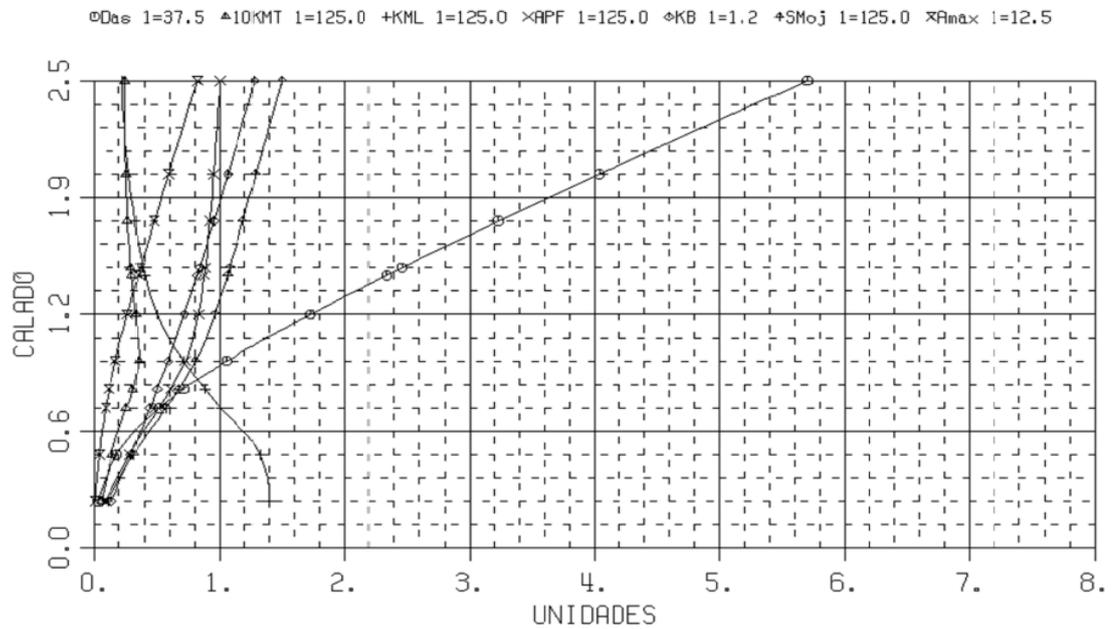


Figura 3. Curvas Hidrostáticas. Fuente: Elaboración Propia

En los coeficientes de formas, Figura 4, se nota que el de Sección Media es de 0.55 al calado de diseño de 1.4 m, verificando con este valor que sus formas son finas y adecuadas para ser una embarcación rápida.

A continuación se presentan los coeficientes de forma:

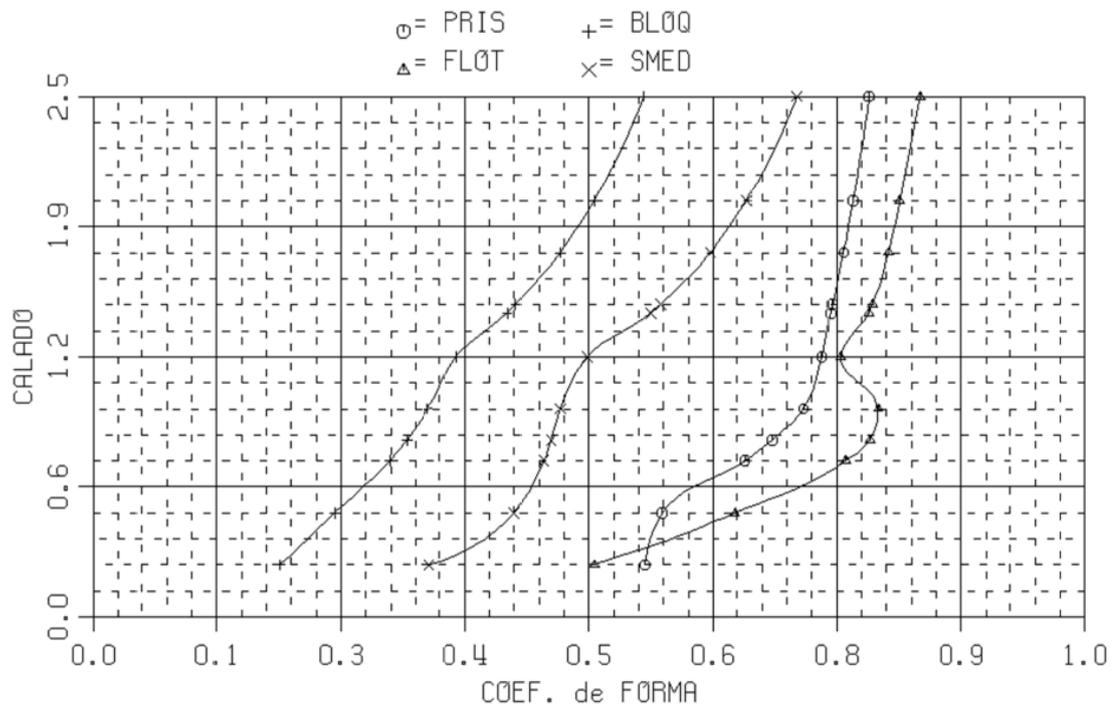


Figura 4. Coeficientes de Forma. Fuente: Elaboración Propia

La embarcación prototipo se considera de tipo planeadora, y de acuerdo a [1], el coeficiente de velocidad y al número de Froude; para operar en régimen, deben satisfacer los siguientes requerimientos:

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{gB_T}} > 1.5, \quad F_{nv} = \frac{V}{\sqrt{g\nabla^{1/3}}} > 2.0$$

donde, B_T , es la manga en la china y, V y ∇ , son la velocidad de servicio y el volumen de desplazamiento de la embarcación. Empleando la velocidad de servicio (26.62 nudos), Manga en el espejo (2.67 m), y Desplazamiento máximo (89.67 ton), los coeficientes mencionados son 1.89 y 4.01, lo que confirma que la embarcación es planeadora.

La embarcación posee formas finas, y ángulo de astilla muerta que varían como se muestra en la Figura 5 y Figura 6, respectivamente.

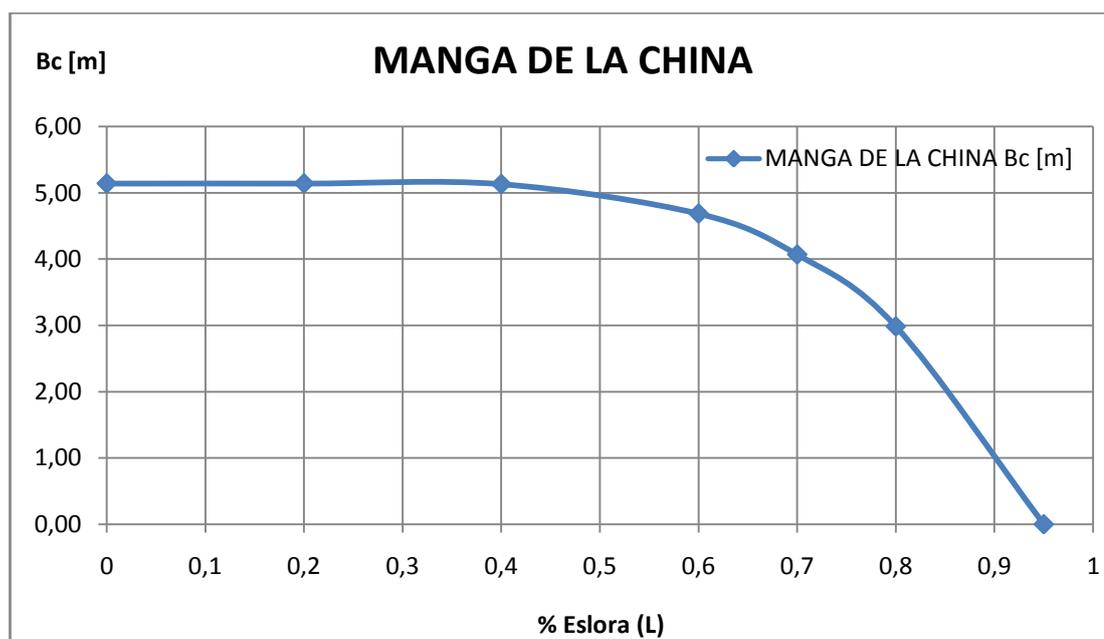


Figura 5. Variación de la Manga en la china. Fuente: Elaboración Propia

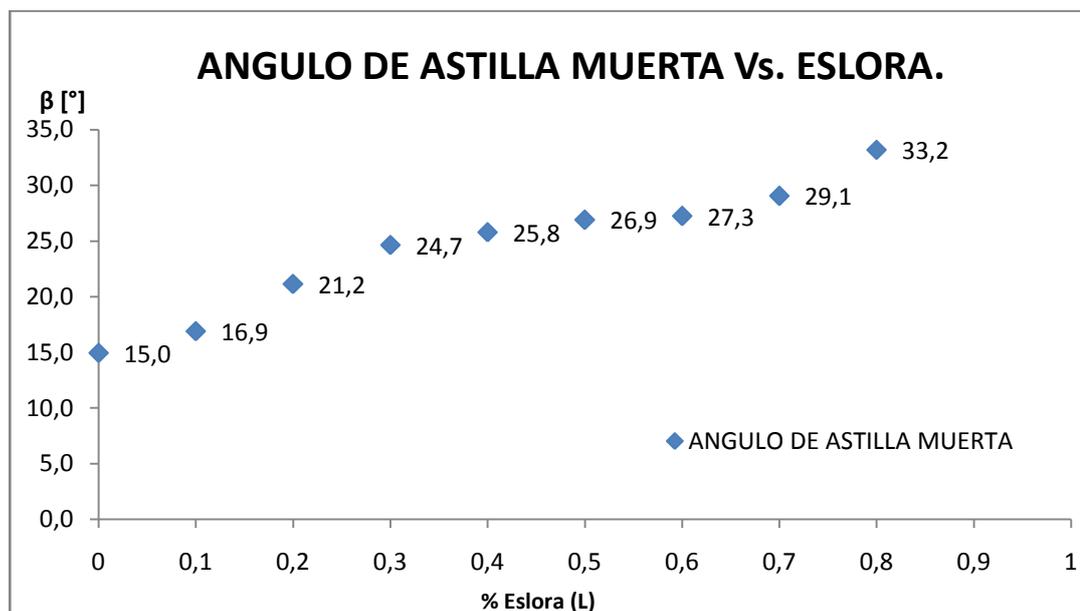


Figura 6. Variación del ángulo de astilla muerta. Fuente: Elaboración Propia

Las condiciones de navegabilidad que se usaron para el estudio fueron tres, como se indica en la Tabla II.

Cond. 1	Llegada a Puerto. 10% de Combustibles y Consumibles
Cond. 2	Servicio. 50% de Combustibles y Consumibles
Cond. 3	Salida de Puerto. 98% de Combustibles y Consumibles

Tabla II. Descripción de Condiciones de Navegación. Fuente: Elaboración Propia

Para estas condiciones; en la Tabla III se detallan las características principales que se necesitan en el cálculo teórico.

Parámetro.	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3
Desplazamiento (Δ). [ton]	74.19	81.00	89.67
Eslora línea de agua (L_w). [m]	24.00	24.73	24.77
Manga línea de agua (B_w). [m]	5.37	5.40	5.43
Calado Medio (H). [m]	1.40	1.47	1.527
Calado Proa (Hfore). [m]	1.36	1.39	1.41
Calado Popa (Haft). [m]	1.44	1.53	1.64
Centro de Flotación desde popa (LCF). [m]	14.796	14.413	14.103
Trimado,+ por popa (τ). [m]	-0.089	-0.127	-0.275

Tabla III. Características de cada Condición. Fuente: Elaboración Propia

1.2 Resumen y Esquema del cálculo de ABS.

Se describe secuencialmente el cálculo de la presión dinámica, usando las *“Guías para construcción y clasificación de embarcaciones de alta velocidad”*, [4], de la Sociedad Clasificadora American Bureau of Shipping (ABS). Se describe la fórmula para estimar la aceleración vertical de la embarcación que usa las características principales de la lancha que depende principalmente del cuadrado de la velocidad de servicio y del ángulo de astilla muerta en el fondo. Esta aceleración debe ser menor a un factor del coeficiente de velocidad, definido como el cociente de la velocidad para la raíz de la eslora, y para las tres condiciones estudiadas fue cumplido. Finalmente con la curva de distribución espacial de presión, se nota que la zona de interés es un 34% hacia proa, alrededor a Sección Media.

Para calcular la distribución de presión dinámica en el fondo de la embarcación prototipo se empleó la sección 2 del capítulo 2, parte 3 de las reglas de la Sociedad Clasificadora American Bureau of Shipping, año 2012, [4]. Para aplicarlas se requiere los siguientes parámetros de la embarcación:

- Eslora en la línea de agua, (L_w)
- Manga máxima en línea de agua, (B_w)
- Desplazamiento en línea de agua, (Δ)
- Velocidad de diseño [nudos], (V)

- Trimado en operación a velocidad $V, (\tau)$
- Ángulo de astilla muerta en centro de gravedad, (β_{cg})
- Tipo de Embarcación/Servicio.
- Separación entre refuerzos, (s)
- Altura de Ola significativa, $(h_{1/3})$
- Constante $N1=0.1$ (Sistema Internacional)
- Constante $N2=0.0078$ (Sistema Internacional)

Los valores de las constantes $N1$ y $N2$ son válidos cuando se utilizan unidades en Sistema Internacional. Si se usara sistema Inglés de unidades, los valores de las constantes serían 0.069 y 0.0016, respectivamente. El valor de la altura de ola significativa se elige según la Tabla IV, acorde al tipo de embarcación.

Condición de Operación	Altura de ola significativa. $(h_{1/3})$
Embarcación planeadora	4 m (13 ft)
Embarcación Costera	2.5 m (8.5 ft)
Embarcación de Río	0.5 m (1.75 ft)

Tabla IV. Valor de altura de ola significativa. Fuente: Referencia[4].

Para aplicar las formulaciones de ABS, [2], en primer lugar se calcula la aceleración vertical del centro de gravedad de la embarcación, denotada como n_{cg} .

El valor resultante de la ecuación 2 debe cumplir que: $n'_{cg} > n_{cg}$, caso contrario el valor mayor (n'_{cg}), se considera como la aceleración vertical en el cálculo. ($k_n = 0.256$, *Sistema Internacional*)

$$n_{cg} = N_2 \left[\frac{12 h_{1/3}}{B_w} + 1 \right] \tau [50 - \beta_{cg}] \frac{V^2 (B_w)^2}{\Delta}, [g' s] \quad (1)$$

$$n'_{cg} = 1.39 + k_n V / \sqrt{L}, [g' s] \quad (2)$$

Luego se selecciona el valor del factor de área designado, F_D , y las características principales. A continuación se presenta la tabla donde se selecciona el valor de F_D para embarcaciones de eslora menor a 24 m (considerando el 96% de la eslora entre perpendiculares).

S mm (in.)	FD
250 (9.75)	0.85
500 (16.75)	0.75
750 (29.5)	0.60
1000 (39.25)	0.50
1250 (49.25)	0.40

Tabla V. Valor de Coeficiente FD. Fuente: Referencia[4].

También para obtener la distribución de la presión, se requiere el factor de distribución de la aceleración vertical, F_V , el cual varía porcentualmente a lo largo de la eslora, como se muestra en la Figura 7. Con estos valores se puede graficar la distribución espacial de la presión, la cual adaptaría la misma forma que la de F_V . Con esta curva se nota que la zona en la cual la

presión es máxima se encuentra entre 0.55 y 0.89 L y corresponde a un 34% de la eslora hacia proa, desde sección media.

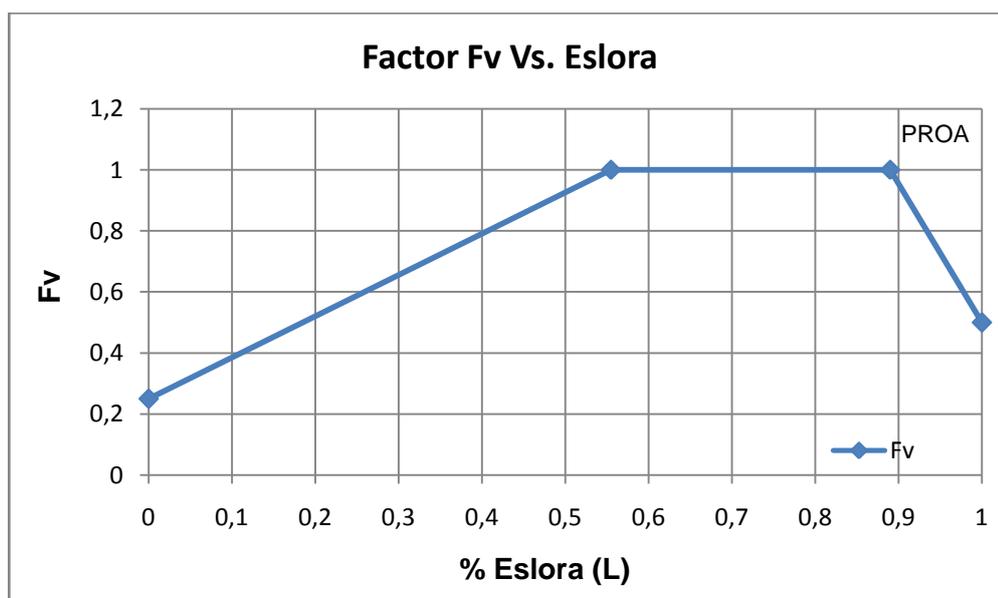


Figura 7. Distribución Factor Fv, Fuente: Referencia [4].

Finalmente para el cálculo de la distribución de presión, se aplican las formulaciones (3) y (4). La primera corresponde al valor de la presión en el centro de gravedad, mientras que la segunda permite calcularla en cualquier posición longitudinal, usando el factor F_V mencionado previamente.

$$p_{bcg} = \frac{N_1 \Delta}{L_w B_w} [1 + n_{cg}] F_D, \quad [KN/m^2] \quad (3)$$

$$p_{bxx} = \frac{N_1 \Delta}{L_w B_w} [1 + n_{cg}] F_D F_V, \quad [KN/m^2] \quad (4)$$

El proceso de cálculo de distribución presión se puede resumir en un Diagrama de flujo, como se muestra en la Figura 8:

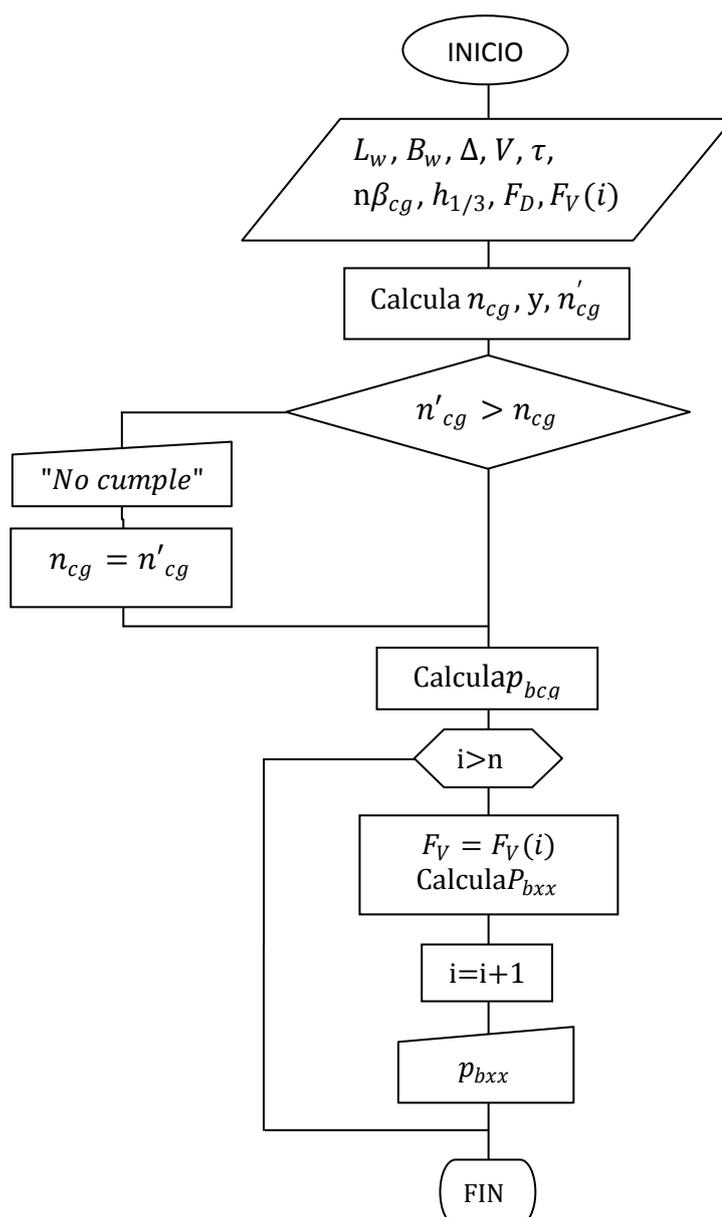


Figura 8. Diagrama del proceso de Cálculo de Presión. Fuente: Elaboración Propia.

1.3 Cálculo de la Presión Dinámica.

Luego de implementar el proceso para el cálculo de distribución de la presión dinámica en el fondo de la embarcación prototipo, se obtuvieron valores de aceleración vertical y de presión para cada condición de carga. Los valores máximos fueron 2.14g's y 165.45 kN/m² (24 psi), respectivamente. Las curvas de la distribución espacial de presión en cada condición, muestran un incremento en presión, la cual crece linealmente hasta 0.55 L donde alcanza su máximo y permanece constante hasta 0.89 L, para luego disminuir linealmente hasta la proa. Finalmente comparando las distribuciones espaciales en la misma gráfica, se nota que para esta embarcación en este caso, la condición que desarrolla la máxima presión es salida de puerto, a pesar que no es una diferencia significativa.

Para el cálculo de la presión dinámica en el fondo, empleando la formulación de ABS, a continuación se presenta una tabla de resumen con los datos necesarios. Se aprecia que para las tres condiciones los valores de las constantes N1, N2, la altura de ola significativa ($h_{1/3}$) y el ángulo de Trimado (τ), son comunes para ellos.

En la Tabla VI se resume los datos que usaron para cada condición.

ABS 2012

Parámetro	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Unidad
Desplazamiento, Δ	74190	81000	89670	Kg
Eslora en flotación, L_w	24.0	24.73	24.77	m
Manga en flotación, B_w	5.37	5.4	5.43	m
Astilla Muerta, β_{cg}	25	25	25	Grados
Calado, T	1.4	1.47	1.527	m
Velocidad, V	26.62	26.62	26.62	nudos
Altura significativa, $h_{1/3}$	4			m
Factor N_1	0.1			
Factor N_2	0.0078			
Ángulo de Trimado. τ	4			Grados

Tabla VI. Datos para el cálculo de presión dinámica. Fuente: Elaboración Propia

Usando las fórmulas (1), (2) y (3) descritas en el subcapítulo 1.2 se calcularon la aceleración vertical y la presión a la altura del centro de gravedad. Estos valores se muestran por cada condición en la Tabla VII. El requerimiento de la aceleración se cumplió para los tres casos.

Parámetro	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Unidad
Aceleración vertical. n_{cg}	2.14	1.97	1.79	g's
Aceleración comprobación. $n_{cg(comp)}$	2.781	2.76	2.759	g's
Factor F_D	0.89	0.89	0.89	
Presión. p_{bcg}	160.63	160.21	165.45	kN/m ²
Presión. p_{bcg}	23.29	23.23	23.99	Lb/plg ²

Tabla VII. Resultados de aceleración y presión. Fuente: Elaboración Propia

Usando la fórmula (4) del subcapítulo 1.2 se calcula la distribución de la presión, incluyendo el factor de distribución, F_v . En la Tabla 8 se muestran los valores de distribución de presión para cada Condición de Carga a lo largo de la eslora del buque.

Posición de L	Fv	Condición 1	Condición 2	Condición 3
		p_{bxx} [KN/m ²]	p_{bxx} [KN/m ²]	p_{bxx} [KN/m ²]
0	0.25	40.16	40.05	41.36
0.2	0.52	83.53	83.31	86.04
0.4	0.79	126.90	126.57	130.71
0.55	1	160.63	160.21	165.45
0.6	1	160.63	160.21	165.45
0.89	1	160.63	160.21	165.45
1	0.5	80.32	80.11	82.73

Tabla VIII. Distribuciones de Presión. Fuente: Elaboración Propia

Con los valores de la tabla anterior, se grafican las curvas mostradas en la Figura 9. Se puede notar que la diferencia entre la Condición de Servicio y la de Llegada, es alrededor del 1%, mientras que la diferencia de las anteriores respecto de la máxima es 4%.

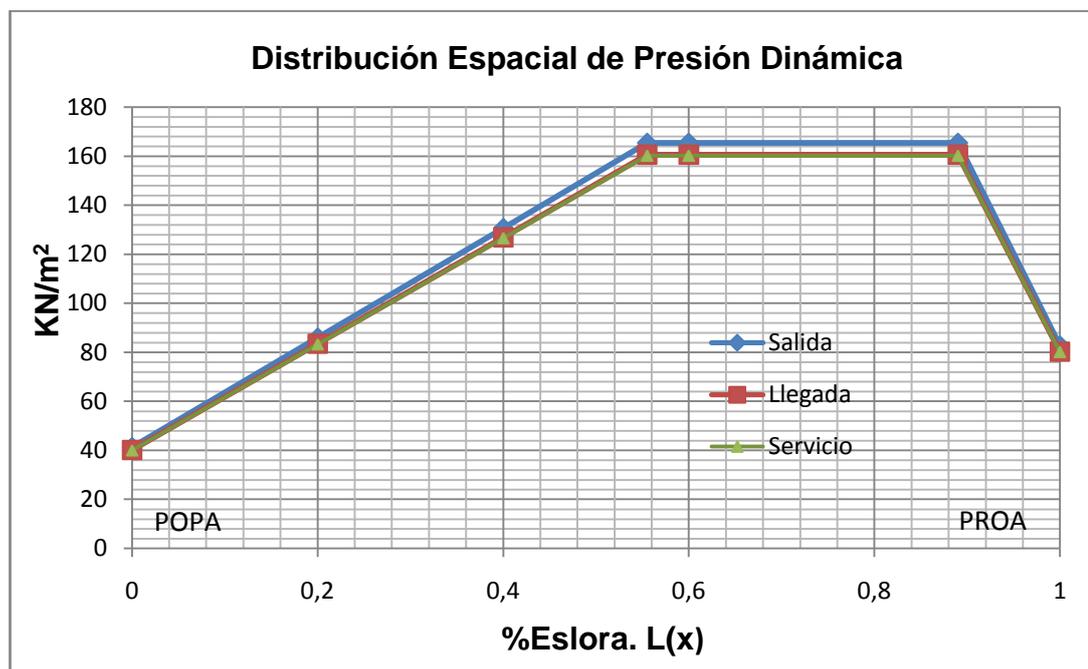


Figura 9. Curvas de Distribución de Presiones. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se resume en la Tabla IX las máximas presiones y aceleraciones por condición de carga.

Parámetro	Cond. 1	Cond. 2	Cond. 3	Unidad.
Presión Dinámica Máxima	160.63	160.21	165.45	[KN/m ²]
Presión Dinámica Máxima	23.29	23.23	23.99	[Lb/plg ²]
Aceleración vertical. n_{cg}	2.14	1.97	1.79	g's

Tabla IX. Resumen de Presiones y Aceleraciones Máximas. Fuente: Elaboración Propia

Se aprecia que la condición en la que se produce la máxima presión, es la condición de carga 1 (salida de puerto con máxima carga), resultando un valor de 165.45 KN/m² (24 Lb/plg²).

CAPITULO 2.

PRUEBAS EXPERIMENTALES CON MODELO.

2.1 Descripción del modelo y los equipos.

El modelo de buque usado para las pruebas de caída libre, tiene una eslora de 1.70 m, 13.5 kg de peso y fue construido con madera Cedro de Castilla. Los equipos usados, incluyen un acelerómetro, el cual se conecta a una tarjeta de adquisición de datos que a su vez se adapta a una computadora personal. Mangueras acopladas a orificios en el modelo, se usan para transmitir la señal a sendas campanas de presión; estos equipos son de construcción local, fabricadas con un recipiente en forma de pirámide truncada con base circular, y tienen instalado un extensómetro en su centro, el cual se conecta al computador mediante un medidor de deformaciones.

El modelo de buque empleado para determinar las presiones en caída libre fue tomado del Laboratorio de Ingeniería Naval de la ESPOI por disponibilidad del mismo, y se usó un factor de escala de 15.15 respecto del prototipo. Las dimensiones principales se encuentran en la Tabla X.

Características principales		
Eslora Total	170	cm
Eslora entre perpendiculares	156	cm
Manga Total	38	cm
Puntal	30	cm
Calado (Ligero)	8.2	cm
Desplazamiento ligero	13.5	Kg
Astilla Muerta en Sección Media (β_{cg})	25	grados (°)

Tabla X. Características principales modelo. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 10 se muestra el modelo suspendido que se usó para las pruebas, con una estructura metálica empernada a este, conformando un solo cuerpo que pesa 21.29 kg, equivalente a la condición de carga ligera del prototipo. Para alcanzar el peso de las condiciones de carga restantes, se usaron pesos calibrados. Se añadieron 4 pesos de 0.5 kg (2 kg en total) para la segunda condición de carga. Se colocaron, 2 pesos en proa a 26 cm del centro de gravedad longitudinal (LCG) y los 2 restantes, ubicados a la misma distancia hacia popa. Para la tercera condición de carga, se aumentó 2.5 kg más, respecto de la segunda condición de carga, colocando un peso de 1.25 kg a proa y otro a popa, en la misma posición que los pesos de la condición anterior.



Figura 10. Modelo usado para las pruebas experimentales.

En la Tabla XI, se resumen las características de las condiciones de carga.

	Desplazamiento. [Kg]	Calado medio. [cm]
Condición 1	21.29	9.17
Condición 2	23.29	9.61
Condición 3	25.79	10.01

Tabla XI. Condiciones de carga del modelo. Fuente: Elaboración Propia

Los equipos utilizados para las pruebas de caída libre del modelo y registro de datos, se muestran en el esquema de la Figura 11, y son:

- i. Una base metálica de pruebas para izar al modelo.
- ii. Una Tarjeta de Adquisición de Datos, *Omega*.
- iii. Un acelerómetro, *Brüel&Kjaer*.
- iv. Cuatro campanas de presión construidas localmente.
- v. Un medidor de Deformaciones, *InstruNet*.

vi. Un computador portátil.

En la Figura 11 se muestra una disposición de los elementos empleados en las pruebas. El acelerómetro, para sensar en dirección vertical, fue ubicado 10.4 cm a popa del centro de gravedad longitudinal del modelo, y se conecta a una tarjeta de adquisición de datos; usando el programa *DaqView*, se registran las señales en el computador. Las campanas de presión se acoplan con mangueras de 1/8 de pulgada a orificios en el fondo del modelo y la señal de presión es transmitida al computador, mediante el medidor de deformaciones y su software, *InstrumentsWorld*.

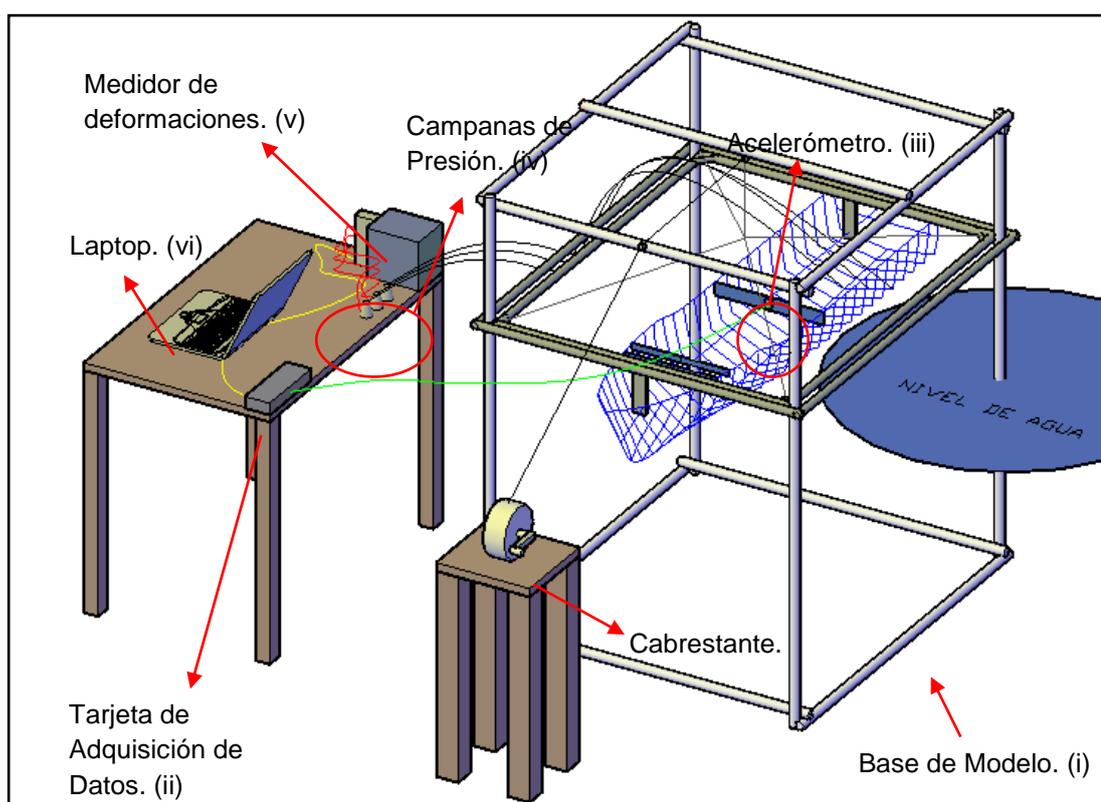


Figura 11. Esquema del conjunto. Fuente: Elaboración Propia

Para mayor facilidad en el izado del modelo durante la prueba se usó un cabrestante manual.



Figura 12. Modelo de embarcación y base. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 12 se aprecia la base metálica y el modelo del buque suspendido empleados para las pruebas, además del acelerómetro el cual, se encuentra revestido con cinta para impermeabilizarlo. El cable de conexión que usa el equipo es mini coaxial y va suspendido sobre el agua, para evitar el contacto con ella.

2.2 Descripción del Proceso de las Pruebas.

Las pruebas de caída libre del modelo de buque fueron realizadas en una piscina de 6x3.8x1.0 m en la facultad de Ingeniería Marítima. La calibración de las campanas de presión se la realizó antes de cada prueba, registrando la deformación unitaria que se produce al ascender el modelo con intervalos de 10 cm, y, descenderlo hasta su posición inicial. Luego se registra y sincroniza el tiempo de inicio de registro de datos tanto del acelerómetro como del medidor de deformaciones, ajustados a 3900 y 494 escaneos por segundo (scan/seg), respectivamente. Finalmente se procede a cortar el hilo que suspende el modelo sobre el agua para dejarlo caer libremente. Se prueban 3 condiciones de carga y 3 alturas de caída (15, 20 y 25 cm) con medición de la presión en 3 posiciones longitudinales. Se realizan 8 veces cada prueba para confirmar la repetitividad del experimento.

Para las pruebas de caída libre del modelo se conectan y se preparan todos los equipos, verificando, para el caso de las campanas de presión, que no hayan burbujas presentes en las mangueras que impidan el adecuado registro de datos. Se realiza la configuración respectiva del software de cada equipo y se procede a calibrar. Este proceso se lo realiza elevando el modelo con intervalos de 10 cm sosteniéndolo alrededor de 4 segundos para obtener el valor de presión por cada elevación; luego se lo hace descender

en los mismos intervalos, hasta que regresa a la posición inicial. De esta calibración se obtienen curvas en forma de pirámide como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Curvas de calibración de campanas. Fuente: Elaboración Propia

Luego de la calibración, se levanta el modelo hasta la altura de caída deseada (15, 20, 25 cm), que corresponde a la distancia entre la quilla y la superficie del agua. Luego se inicia el registro de datos en ambos equipos, tomando el tiempo de desfase entre el inicio de cada programa. Finalmente se procede a cortar el hilo que suspende el modelo, al mismo tiempo que se registra el tiempo de impacto del modelo de buque con el agua.

Completada la prueba, se almacenan los datos de ambos programas tanto de presión como de aceleración. Luego se enceran los equipos, se coloca un nuevo hilo, y se suspende nuevamente el modelo para la siguiente prueba. Si existe presencia de burbujas de aire, se procede a retirarlas, y se procede con la caída del modelo.

Se realizaron 8 veces cada prueba, para confirmar la repetitividad de los valores que se obtienen. Se registran valores de presión para 3 posiciones longitudinales ubicadas a 47, 93, 134 cm, medidos desde popa (véase Figura 15). En cada posición longitudinal se preparan 3 orificios dispuestos transversalmente separados 3 cm, entre sí y desde la quilla (véase Figura 15), en los que se adaptan mangueras de 1/8" que llevan la señal a las campanas de presión.

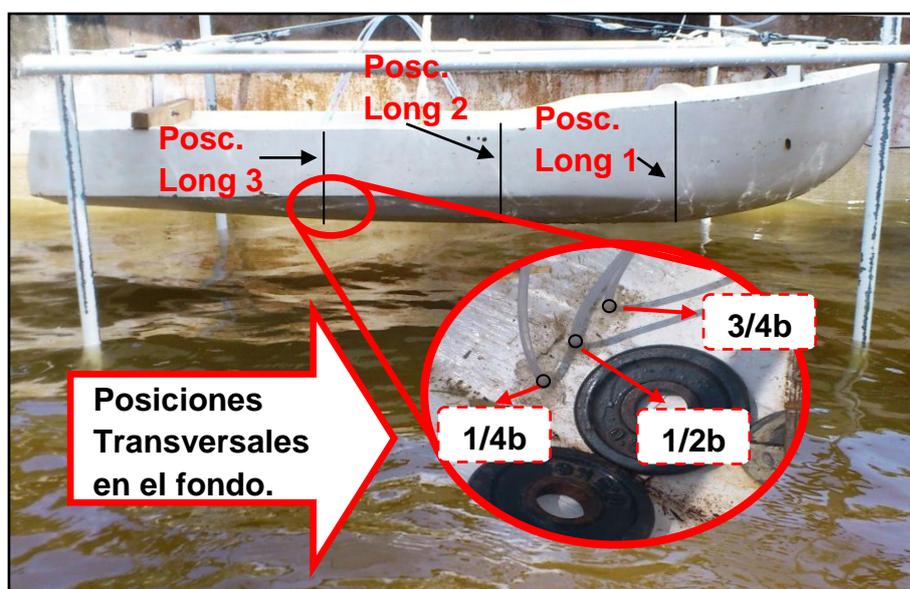


Figura 15. Posiciones longitudinales y transversales de medición.
Fuente: Elaboración Propia

2.3 Procesamiento de la Información.

Con la curva de calibración de las campanas, se obtienen, valores de cambio de presión por unidad de desplazamiento vertical del modelo. Luego, con el programa “*EasyPlot*”, se suavizan los registros temporales obtenidos durante las pruebas usando el comando “*Smooth*” y un rango de integración de 0.01 seg. para la presión y de 0.001 seg. para la aceleración, lo que implica un promedio por cada 5 puntos en ambos casos, [8]. Este proceso permite disponer 445 y 390 puntos en el rango de interés donde se forman los picos de presión (1 seg.) y aceleración (0.1 seg.), respectivamente. La presión registrada en las pruebas inicia en cero, luego disminuye conforme desciende el modelo hasta impactar el agua, desde ese momento se incrementa hasta un máximo para luego volver a disminuir. El valor de presión máxima reportado corresponde a la diferencia entre el valor en el pico de la curva menos el mínimo. La aceleración registrada en las pruebas inicia en cero, se hace negativa en un valor cercano a la aceleración de la gravedad para luego incrementar hasta un máximo, luego de que el modelo golpea el agua.

Curva de calibración de las campanas de presión.

En los siguientes gráficos (véase las Figuras 16, 17 y 18), se muestran ejemplos de las curvas de calibración para las campanas de presión. Estas

figuras poseen forma de pirámide y cada escalón representa la deformación unitaria registrada por la elevación del modelo en un valor de 10 cm. En la parte izquierda de la pirámide se tiene la elevación del modelo de buque, mientras que en el derecho, el descenso. En las gráficas las abscisas representan el tiempo, y las ordenadas, el equivalente a la deformación unitaria en mili voltios [mV].

Los ejemplos mostrados (Figuras 16, 17 y 18), corresponden a la calibración de las 3 campanas, y sirvieron para la primera prueba, en la posición longitudinal de medición 2 (Sección Media) con condición de carga 1 (ligero). Cabe insistir en que esta calibración se la realizaba antes de cada prueba.

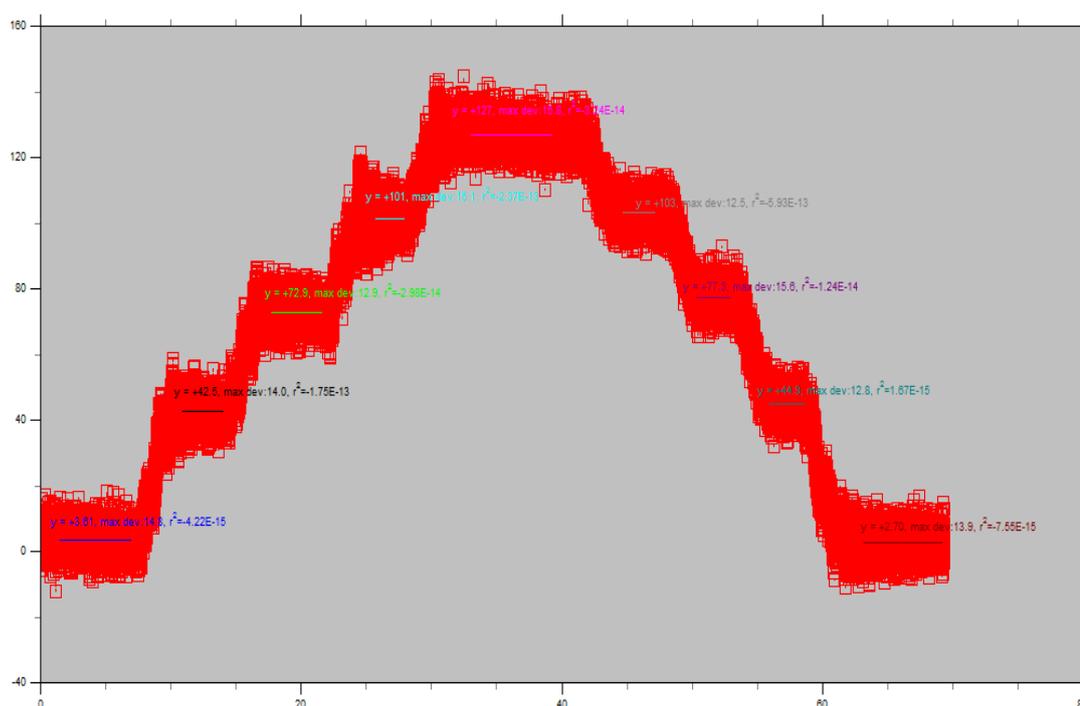


Figura 16. Calibración campana 1. Prueba 1. PoscLong2. Cond 1.
Fuente: Elaboración Propia

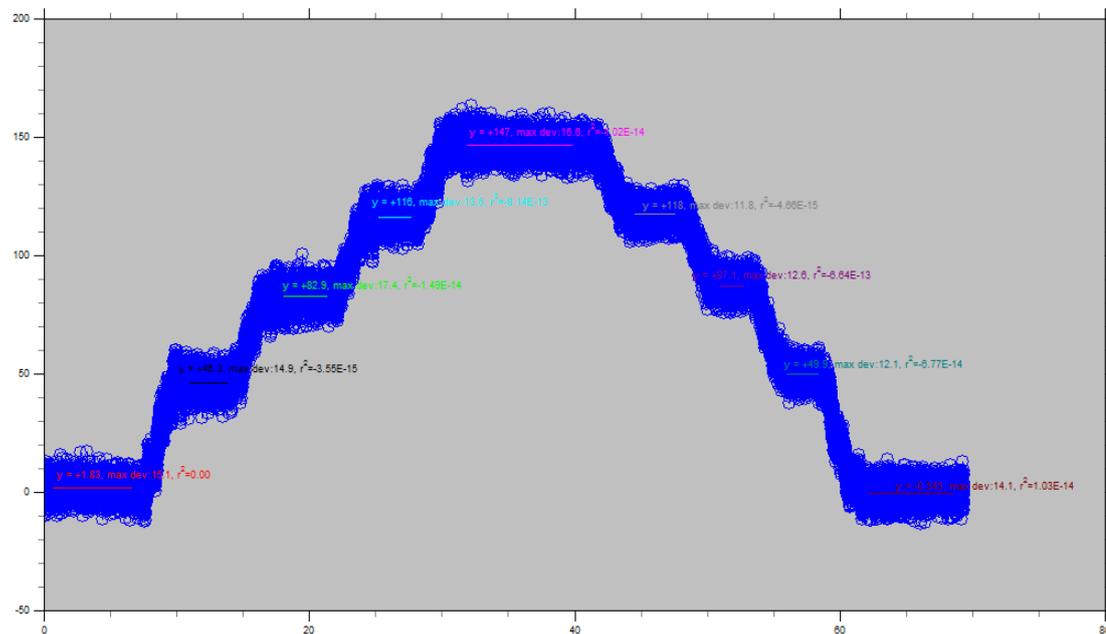


Figura 17. Calibración campana 2. Prueba 1. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia

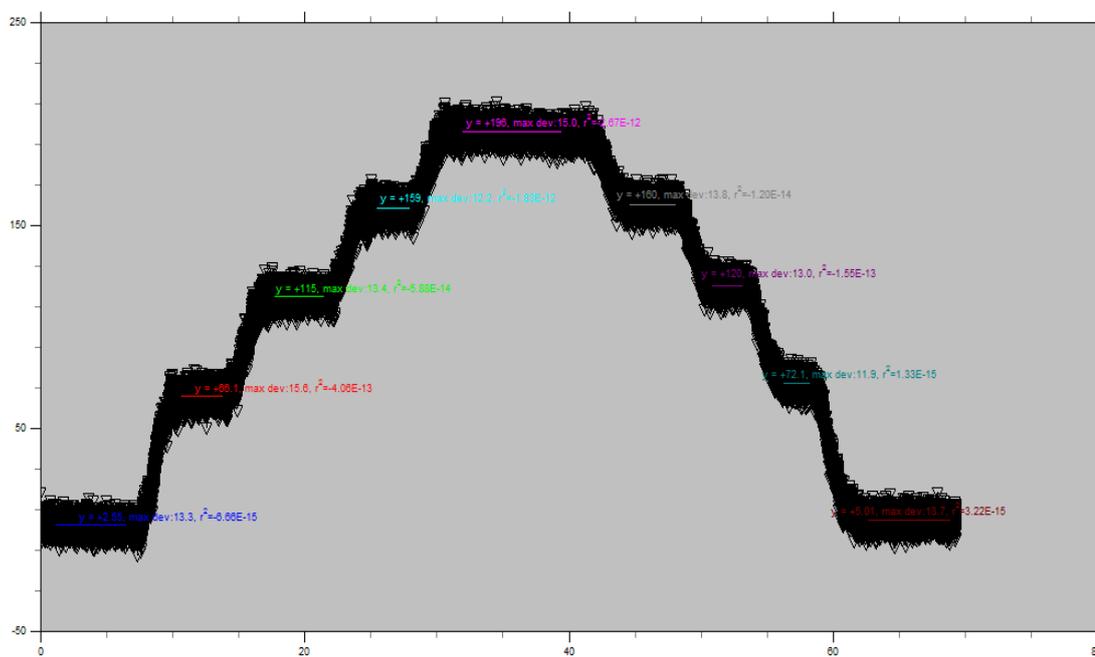


Figura 18. Calibración campana 3. Prueba 1. PoscLong2. Cond 1. Fuente: Elaboración Propia

Promediación de cada escalón.

Con el programa “*Easyplot*”, se obtiene los valores promedios de cada escalón de las curvas de calibración, antes mostradas, (véase Figura 18). Este proceso consiste en seleccionar el rango de un escalón, seleccionar el comando “*Curve Fit*”, ingresar el grado del polinomio, en este caso, cero, para obtener un valor constante (véase, Figura 19). Luego se repite, el proceso hasta finalizar con las constantes de todos los escalones de la pirámide (véase, Figura 14).

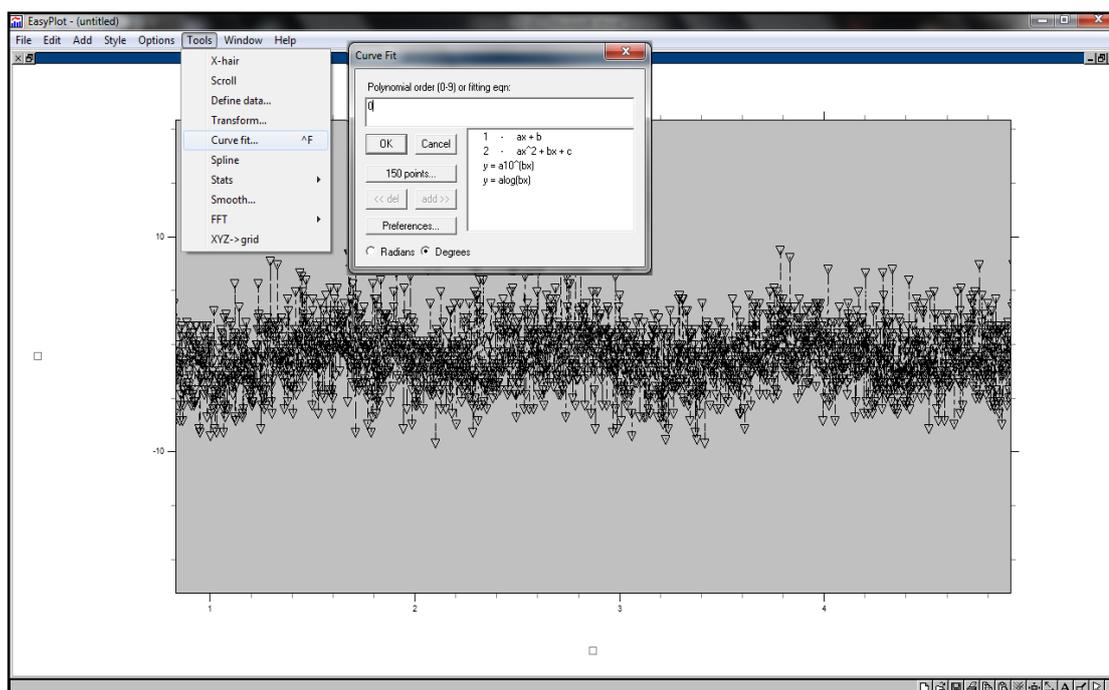


Figura 19. Promediación de un escalón. Fuente: Elaboración Propia

Gráfico altura-deformación de las campanas de presión.

Con los valores constantes de las curvas de calibración de las campanas, se prepara un gráfico de la deformación unitaria equivalente (mili voltios), versus, posición vertical (cm). En la Figura 20 se muestra un ejemplo, en la cual las deformaciones unitarias de cada escalón, están representadas en las abscisas, mientras que en las ordenadas, se encuentran las posiciones verticales correspondientes a la elevación del modelo de buque (10, 20, 30 y 40 cm). Con este grupo de puntos se obtiene una fórmula para la línea de tendencia, la cual, corresponde a la ecuación de conversión, para cada campana para cada prueba.

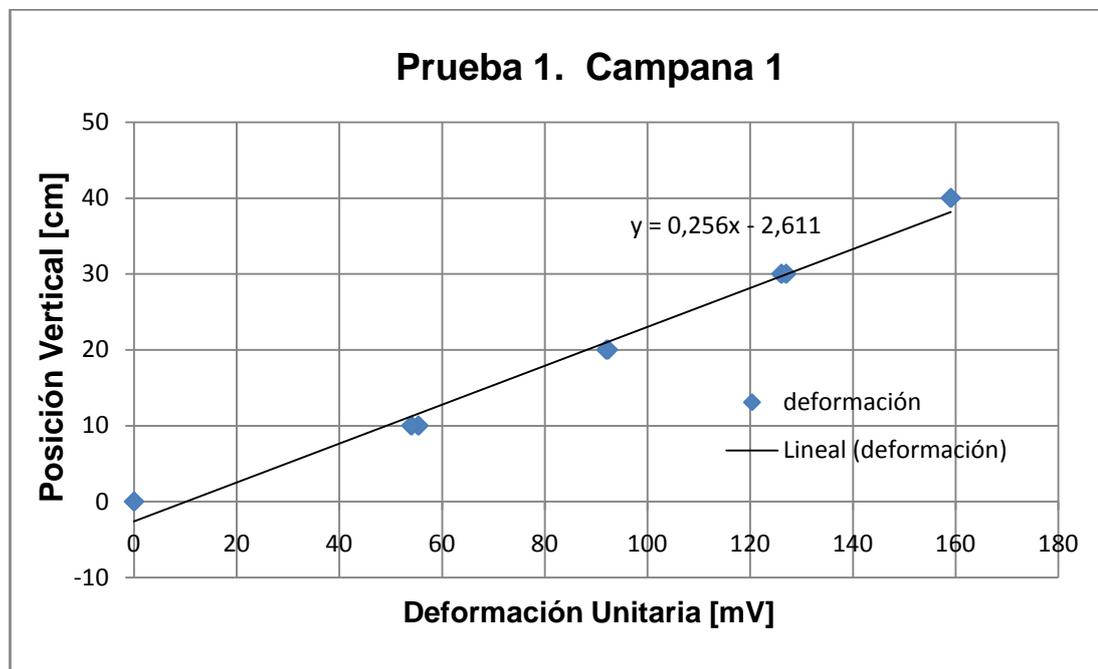


Figura 20. Curva de conversión de campana. PoscLong2. Cond 1.
Fuente: Elaboración Propia

En la ecuación de cada curva, en este caso, $y = 0.256x - 2.611$, se reemplaza la deformación equivalente unitaria en mili voltios registrado en la prueba, para obtener los valores de presión en cm de agua.

Alisamiento de curvas.

A continuación se realiza la filtración, [8], (“smooth”=alisamiento) de los registros de presión, con el mismo programa “EasyPlot”. En este caso se usa el comando “smooth”, con un rango de integración de 0.01 seg. Esto permite disponer de 445 puntos en la zona de interés, donde se forma el pico de presión, luego del impacto. En la Figura 21 se muestra un ejemplo de curva de presión sin alisar mientras que la Figura 22, las curvas filtradas.

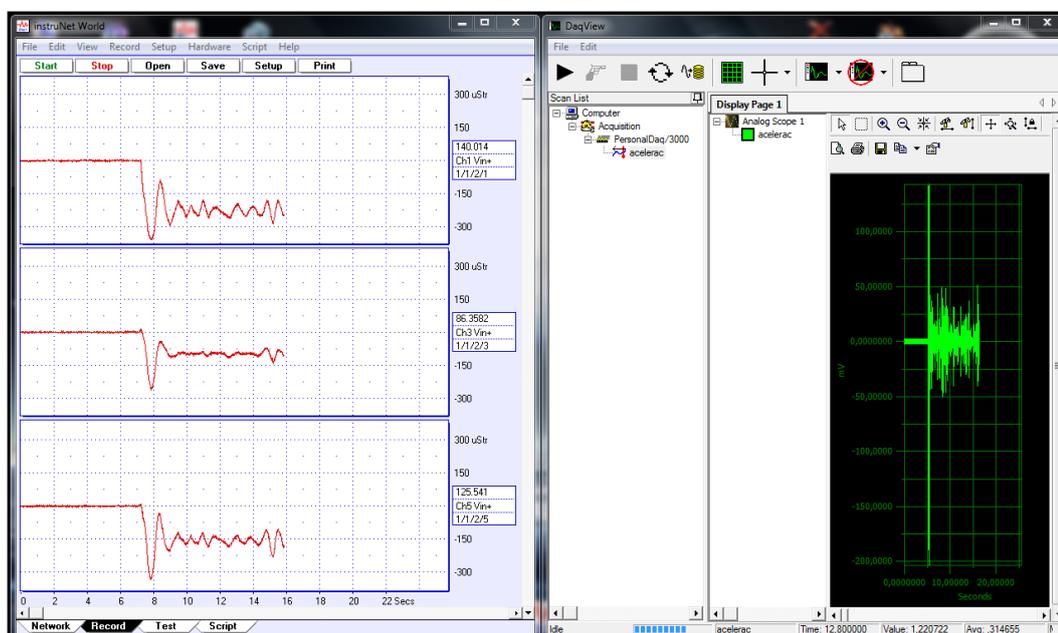


Figura 21. Curvas de presión y aceleración sin filtrar. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 22 se aprecia la variación de la presión en una prueba, la cual comienza en cero, luego disminuye debido al descenso libre del modelo, para luego incrementar desde el momento cuando el modelo toca la superficie del agua, hasta alcanzar su máximo.

El valor de presión máximo reportado en este trabajo, es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo en la base de la curva (instante de contacto con el agua). En la Figura 22 el tiempo hasta el impacto es alrededor de 8 segundos, y a partir de allí se incrementa la presión hasta los 8.5 segundos aproximadamente. Para este ejemplo se encuentran mostrados los valores máximos de presión para cada señal (Prueba 13, Condición 2, altura de caída =20 cm).

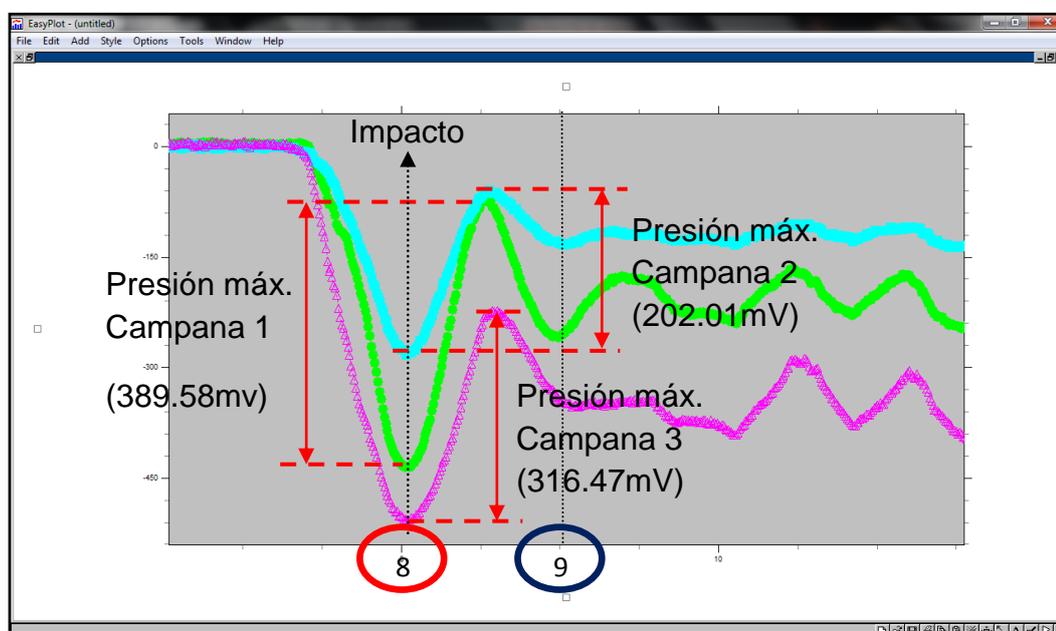


Figura 22. Curvas de presión filtradas. Fuente: Elaboración Propia

En el caso de los registros de la aceleración, el rango de integración usado para filtrar fue 0.001 seg y con este valor se dispone de 390 puntos, en el rango de la zona de aceleración máxima. A pesar de esta filtración en los gráficos resultantes se nota que no se pudo evitar la variación armónica de la señal. En la Figura 23 se muestra una curva de aceleración filtrada, en mili voltios ($1g= 80mV$). Se aprecia una zona entre 5.7 y 5.9 segundos, donde se presenta un valor negativo, en el orden de la aceleración de la gravedad, cuando el modelo cae libremente. Luego se forma un pico de aceleración positiva después de que ha impactado el agua, con una duración alrededor de 0.1 segundos ($1+n_{cg}$). El valor reportado es el máximo (n_{cg}), medido desde la referencia, es decir, no se incluye la aceleración de la gravedad.

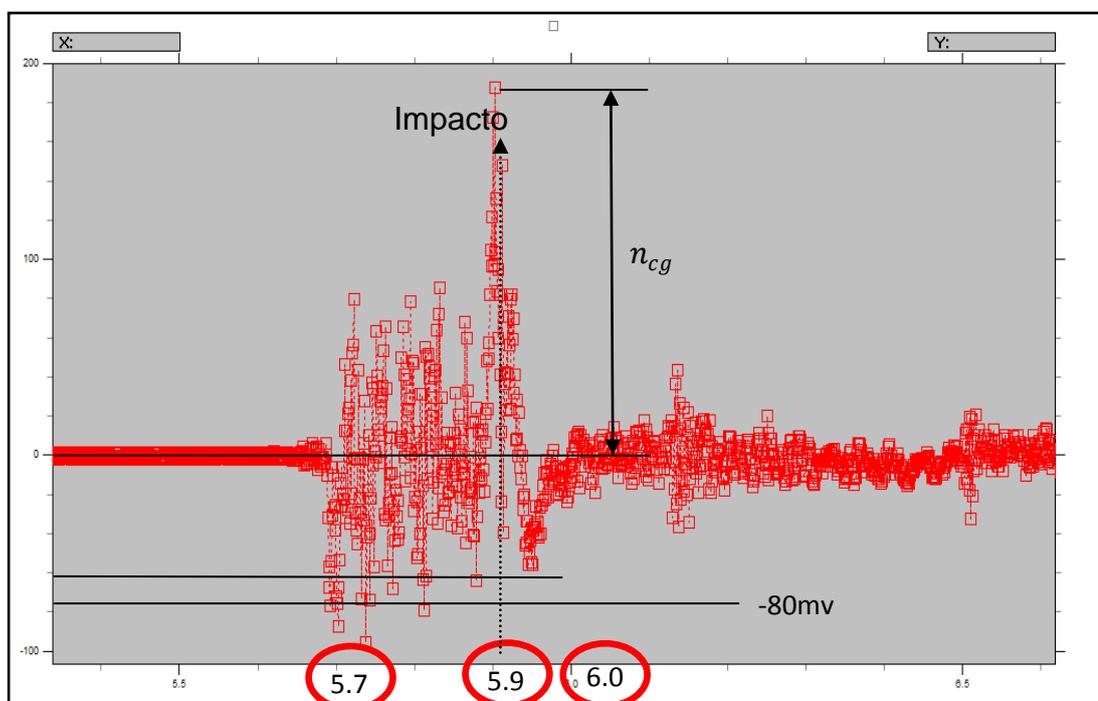


Figura 23. Curva de aceleración filtrada. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se grafica el grupo de los 8 valores obtenidos en igual número de pruebas por cada altura de caída, y se realiza un promedio de estos, despreciando los datos aberrantes. En la Figura 24 se muestra un ejemplo del grupo de datos de presiones en las 3 posiciones transversales, para una misma altura. Para este caso, el grupo posee una buena correlación, con una diferencia máxima del 5% entre los datos, excepto la prueba 7. Se nota que las curvas comienzan con un valor pequeño, en la posición cuarto de la semimanga medido desde la quilla, luego se hace máxima en el centro del fondo para luego reducirse hacia la china casi a cero, [3] y [5].

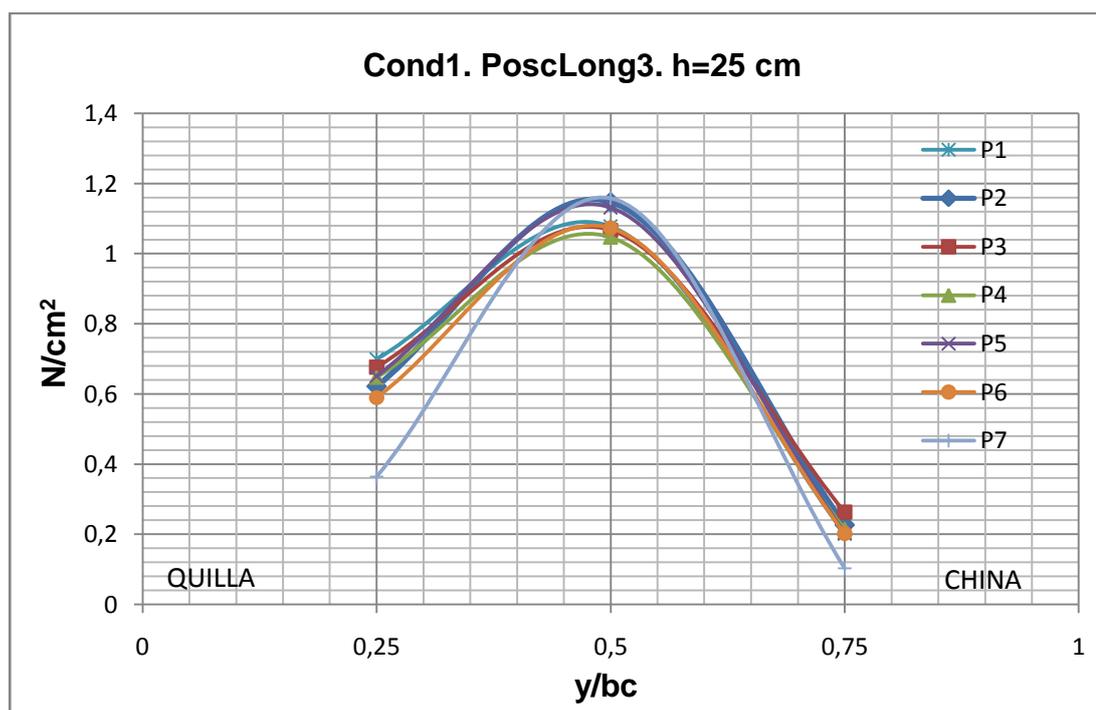


Figura 24. Curvas de Presión para una misma altura. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 25 se presenta la curva promediada de los datos de la Figura 24. En esta gráfica se ha descartado la prueba 7, por tener mala correlación en los extremos de la curva, respecto del resto de datos. En la curva se ha extrapolado a cero el valor en la china, [5].

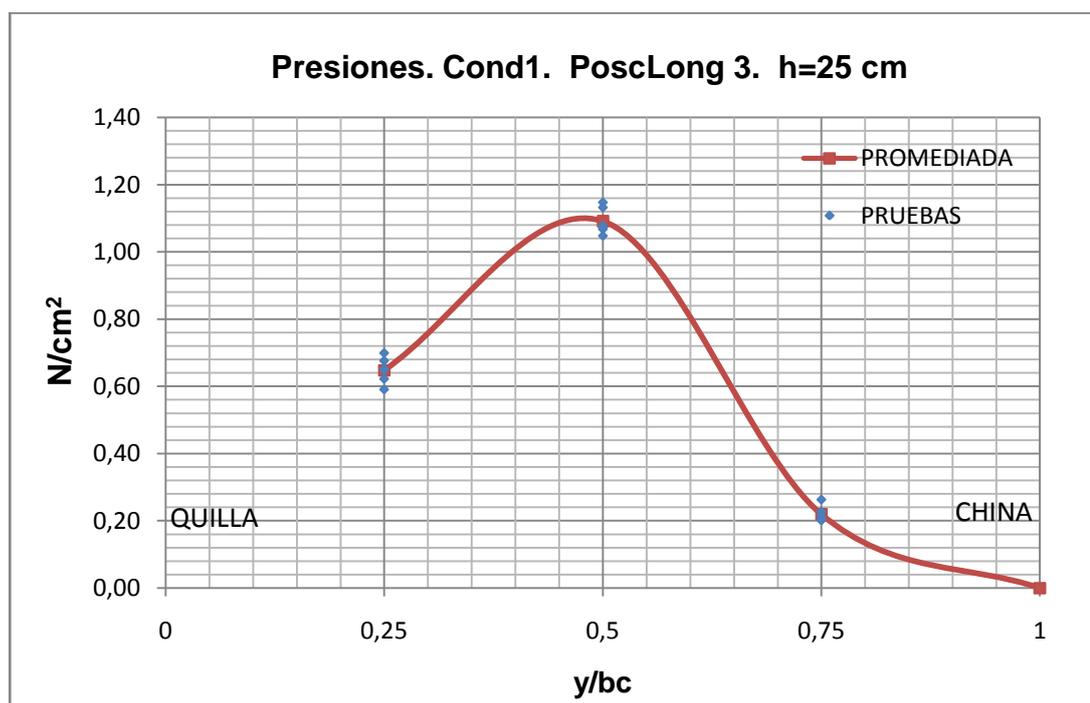


Figura 25. Curva de Presión promediada típica. Fuente: Elaboración Propia

Todas las curvas obtenidas durante la prueba se han incluido en el Anexo B de esta tesis.

2.4 Resumen de Resultados Experimentales.

La distribución de los valores promediados de presión máximos versus la posición transversal, tienen forma similar a una campana, [3] y [5], comienza con un valor bajo en quilla, luego en el centro del fondo se presenta el máximo, para terminar haciéndose cercanamente nulo en la china. Comparando los resultados para una condición de carga, se nota que la presión y aceleración aumentan conforme se incrementa la altura de caída; el incremento de presión de una altura a otra (5 cm), fue alrededor del 20%, y para la aceleración el incremento fue de 6%. Asimismo, como se esperaba, la presión aumenta con la condición de carga. A pesar que, se registró un valor máximo de presión de 1.09 N/cm^2 en Popa (posición longitudinal 3), condición de carga 1 (ligero), para la mayor altura de caída ($h=25\text{cm}$), debido a que poseía la mayor aceleración registrada en la prueba (2.99 g's).

A continuación en la Tabla XII se presenta el resumen de los valores de presión y aceleración obtenidos en las pruebas. Se tabulan los valores por condición de carga y altura, colocándolos en 3 grupos por posición longitudinal, con su respectiva aceleración:

Presión [N/cm ²]. Posición Longitudinal de medición 3 (Popa)									
Posición Transversal. %b	Condición 1 (ligero)			Condición 2 (servicio)			Condición 3 (cargado)		
	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm
0.25	0.08	0.14	0.65	0.49	0.58	0.55	0.33	0.71	0.76
0.5	0.25	0.52	1.09	0.65	0.71	0.86	0.48	0.90	0.95
0.75	0.08	0.15	0.22	0.15	0.09	0.24	0.15	0.25	0.22
Aceleración [g's]	1.85	2.41	2.99	1.88	2.53	2.98	2.39	2.97	2.95
Presión [N/cm ²]. Posición Longitudinal de medición 2 (Sección Media)									
Posición Transversal. %b	Condición 1 (ligero)			Condición 2 (servicio)			Condición 3 (cargado)		
	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm
0.25	0.58	0.56	0.69	0.42	0.44	0.62	0.42	0.51	0.62
0.5	0.67	0.68	0.76	0.51	0.61	0.72	0.61	0.79	0.88
0.75	0.31	0.32	0.36	0.29	0.41	0.52	0.30	0.44	0.56
Aceleración [g's]	1.85	1.98	2.06	1.56	2.06	2.61	1.96	2.30	2.90
Presión [N/cm ²]. Posición Longitudinal de medición 1 (Proa)									
Posición Transversal. %b	Condición 1 (ligero)			Condición 2 (servicio)			Condición 3 (cargado)		
	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm	H=15cm	H=20cm	H=25cm
0.25	0.52	0.56	0.59	0.48	0.53	0.62	0.29	0.34	0.43
0.5	0.62	0.63	0.64	0.52	0.55	0.70	0.38	0.54	0.69
0.75	0.37	0.37	0.33	0.44	0.47	0.56	0.20	0.37	0.30
Aceleración [g's]	1.48	1.77	2.37	1.38	1.87	2.09	1.49	2.46	2.74

Tabla XII. Resumen de presiones y aceleraciones. Fuente: Elaboración Propia

Los valores de la primera columna indican la posición transversal en el fondo como un porcentaje de la semimanga, b , en donde se realizó la medición de la presión. Cada columna presenta las mediciones para una condición de carga y una altura de caída específica. El grupo de presiones se encuentra separado por cada posición longitudinal y al final de cada grupo se muestra la media de la aceleración para cada condición y altura, como porcentaje de la gravedad.

Análisis de resultados.

i) Variación transversal de la Presión.

El resumen de la presión máxima en la posición longitudinal de medición 1 (Proa), se grafica en la Figura 26. Las 9 curvas de presión están separadas en 3 grupos por color, denotando cada condición de carga. La condición de carga 1 representada en color azul, condición de carga 2, rojo y condición de carga 3, verde. Se nota que los valores de la curva aumentan conforme a la altura de caída. En cuanto a la condición de carga, se nota que no siguen el mismo comportamiento en todas las curvas. Sin embargo tomando en cuenta la diferencia entre curvas alrededor del 7% y el valor de aceleración media, se justifica el porqué hay curvas que se cruzan entre sí.

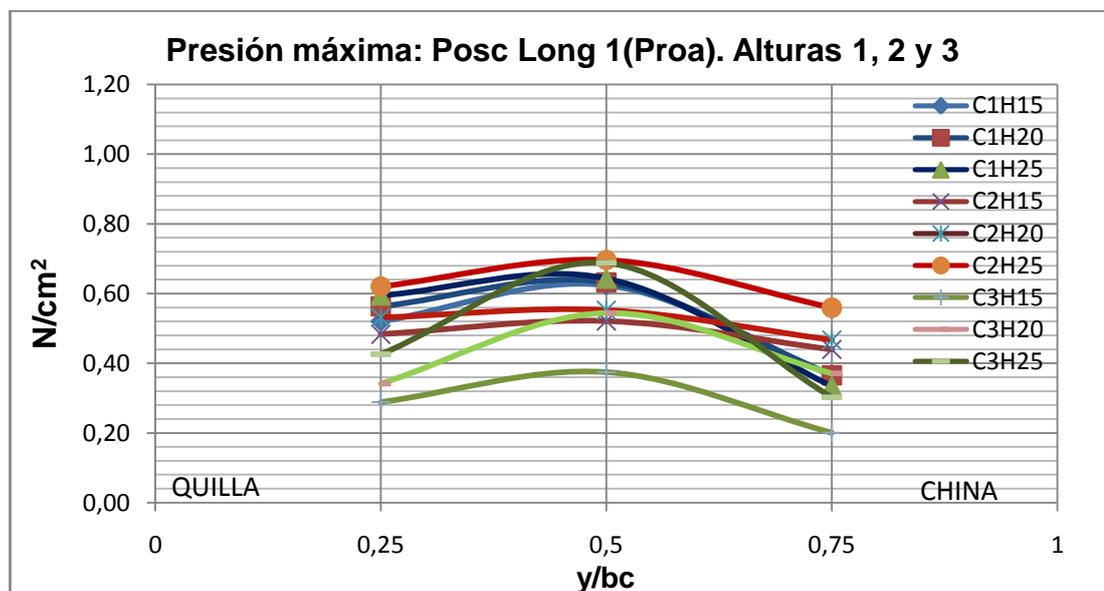


Figura 26. Presiones en posición longitudinal 1. Fuente: Elaboración Propia

A continuación en la Figura 27 se muestran las curvas de presión para la posición longitudinal 2 (Sección Media).

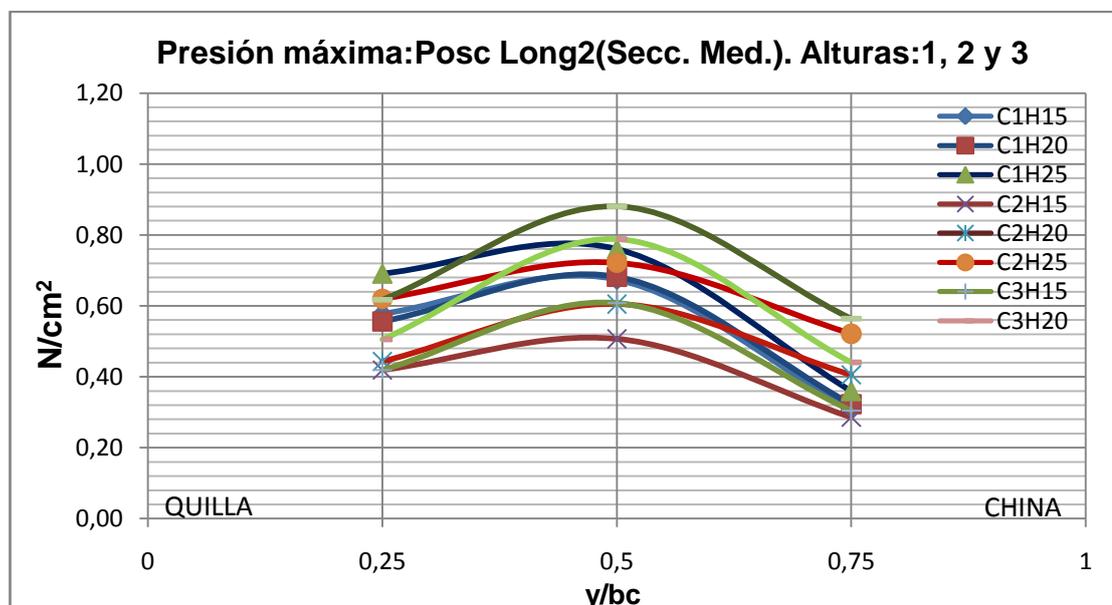


Figura 27. Presiones en posición longitudinal 2. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 27 que presenta los resultados para la Sección Media, se puede apreciar que las curvas tienen mayor diferencia entre sí, alrededor del 15% por altura. Tomando en consideración la aceleración media se nota que al igual que la posición longitudinal anterior, se justifica el cruce entre las curvas.

Las curvas de presión para la posición longitudinal 3 (Popa) se presentan en la Figura 28. Considerando una condición de carga, se nota que las curvas, se separan alrededor de 30% por altura de caída; con excepción de la condición 1 altura 3, la cual se nota que sobrepasa a las demás. Sin embargo si se nota que su aceleración (2.99 g's) es la máxima obtenida durante las pruebas, y se justifica que la curva de presión sea la mayor.

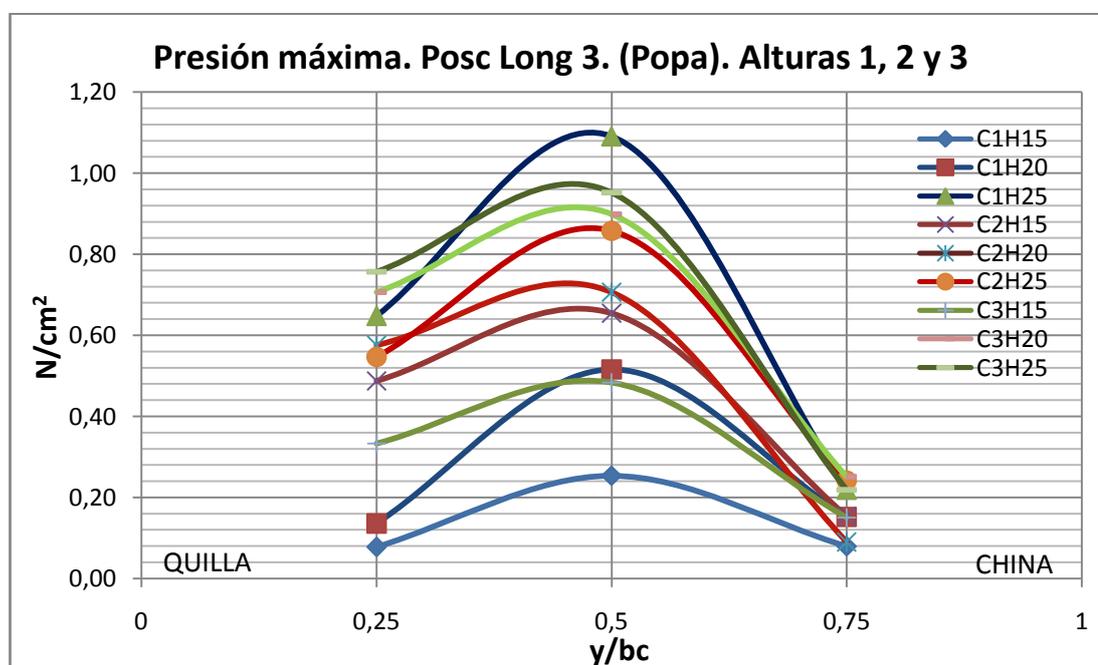


Figura 28. Presiones en posición longitudinal 3. Fuente: Elaboración Propia

ii) Variación temporal de la presión.

En la Figura 29 se muestra la variación de la presión respecto del tiempo de las 3 posiciones transversales, en la que se nota que los máximos de cada curva se encuentran desfasados.

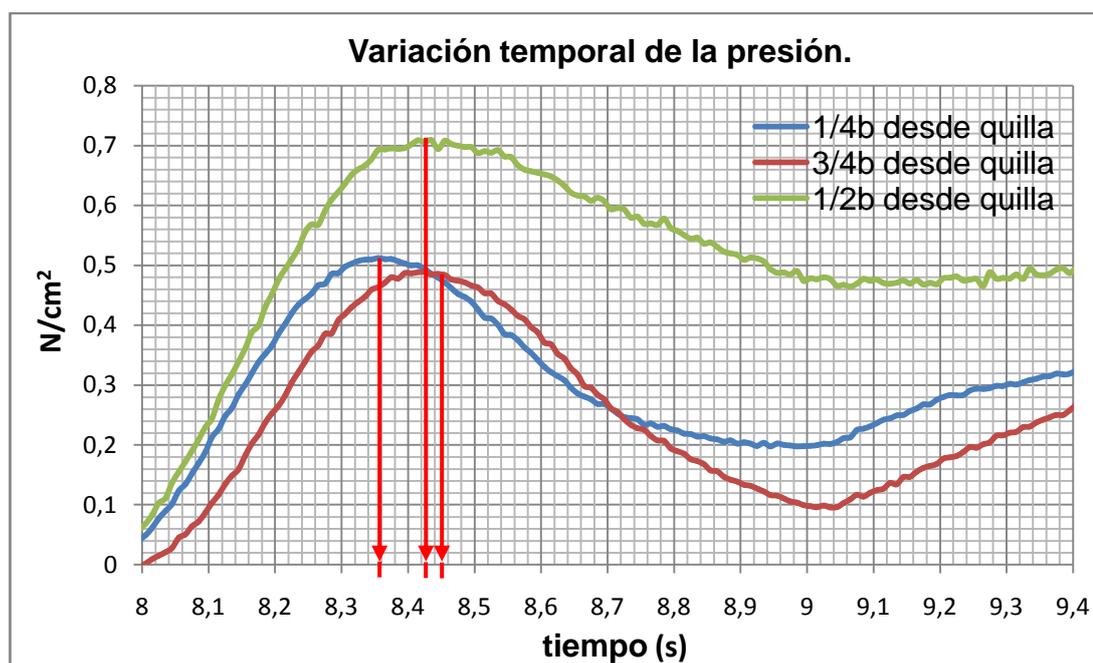


Figura 29. Variación temporal de Presión, Prueba 8. Cond 1. h=15cm.
Fuente: Elaboración Propia

Esto se debe a que, durante la caída del modelo en la prueba, los puntos de medición transversal de presión no entran en contacto con el agua, en forma simultánea, [7]. En el caso de la Figura 29 el primer punto de medición de presión, (1/4 de la semimanga) entra primero en contacto con el agua y su máximo se manifiesta a $t=8.35$ segundos; luego conforme el modelo sigue su descenso, excita al segundo punto de medición (1/2 de la semimanga) con

su máximo a $t=8.42$ segundos, y finalmente excita el último punto de medición (3/4 de la semimanga) con su máximo a $t=8.44$ segundos. Cabe citar que, como se espera, el máximo valor de presión se presenta en la mitad de la semimanga medido desde la quilla.

iii) Relación aceleración vertical (η_{cg}) experimental-teórica (ABS).

En las Figuras 30, 31 y 32 se presentan los valores de aceleración vertical máxima (η_{cg}) experimentales y teóricos. En las abscisas se encuentran las alturas de caída en las pruebas experimentales y en las ordenadas, las respectivas aceleraciones verticales. Con estas gráficas se nota que las aceleraciones obtenidas en el modelo, se encuentran en el rango del valor de la aceleración calculados con las Reglas de ABS, [4]. Las aceleraciones alcanzadas durante las pruebas que más se acercan a las teóricas, corresponden a las obtenidas con 20 cm de altura de caída.

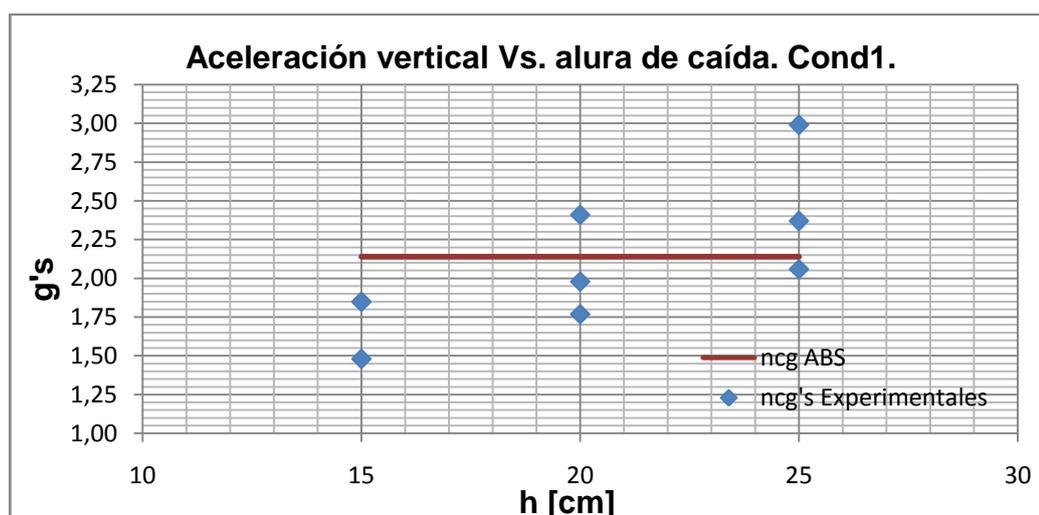


Figura 30. Aceleraciones verticales, Condición de carga 1. Fuente: Elaboración Propia

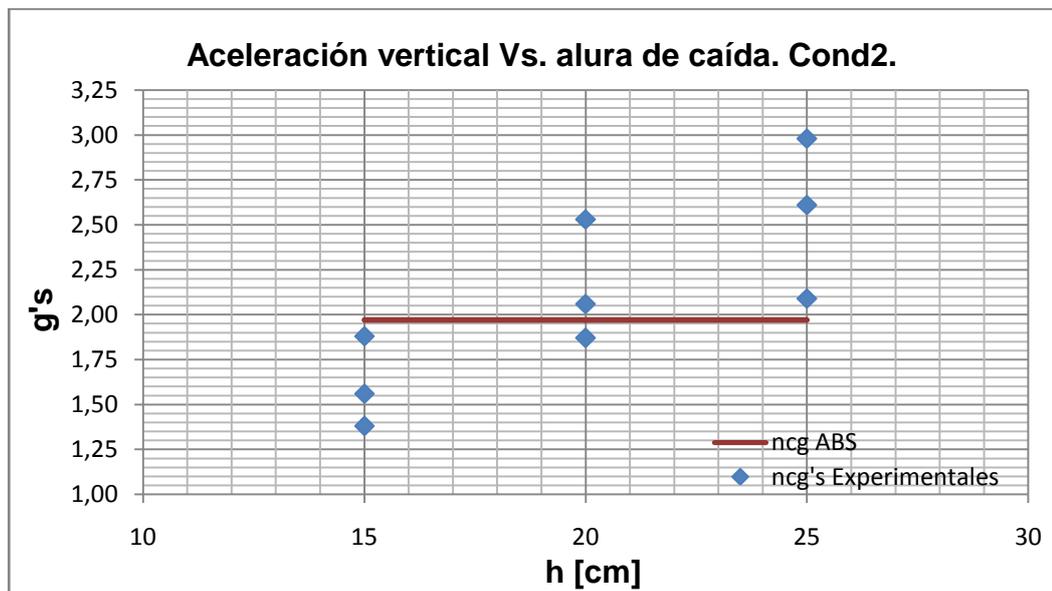


Figura 31. Aceleraciones verticales. Condición de carga 2. Fuente: Elaboración Propia

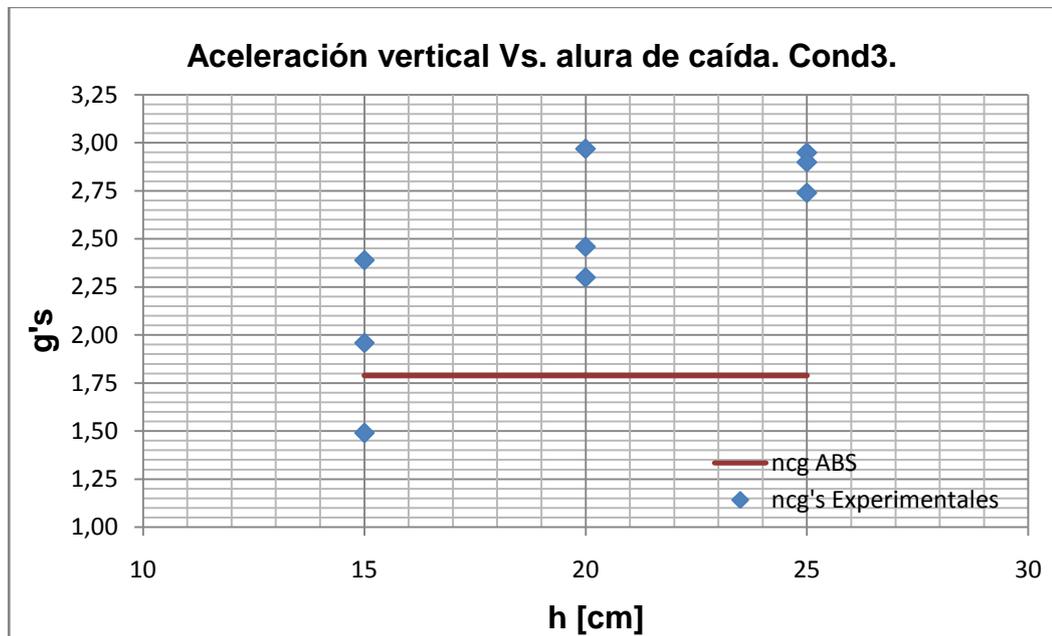


Figura 32. Aceleraciones verticales, Condición de carga 3. Fuente: Elaboración Propia

iv) Relación presión-aceleración vertical (η_{cg}).

En las Figuras 33, 34 y 35, se grafican los valores de presión máxima para las posiciones transversales de medición: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la semimanga, en función de la aceleración en el centro de gravedad. Como se esperaba, se nota que las presiones aumentan con la aceleración. En la Tabla XIII se tabulan los valores de las pendientes para cada posición transversal. Se nota además, que la mayor pendiente se encuentra en la medición a mitad de la semimanga y para las otras posiciones transversales se separan alrededor de 22% respecto de la máxima. Se entiende que la mayor pendiente sea en la mitad de la semimanga, ya que en esta posición transversal, es donde se espera el mayor valor de presión.

Semimanga desde la quilla. b(x)	Pendiente
0.25	0.115
0.5	0.190
0.75	0.150

Tabla XIII. Características de curvas presión-gravedad. Fuente:
Elaboración Propia

A continuación se presentan las gráficas descritas.

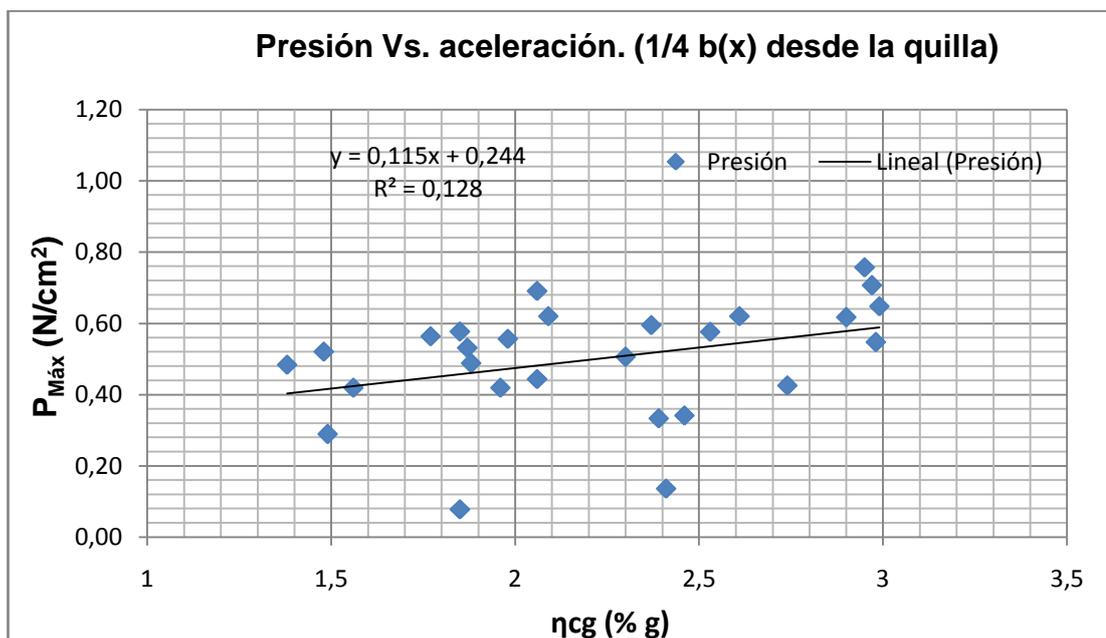


Figura 33. Gráfico Presión-aceleración a 1/4 de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia

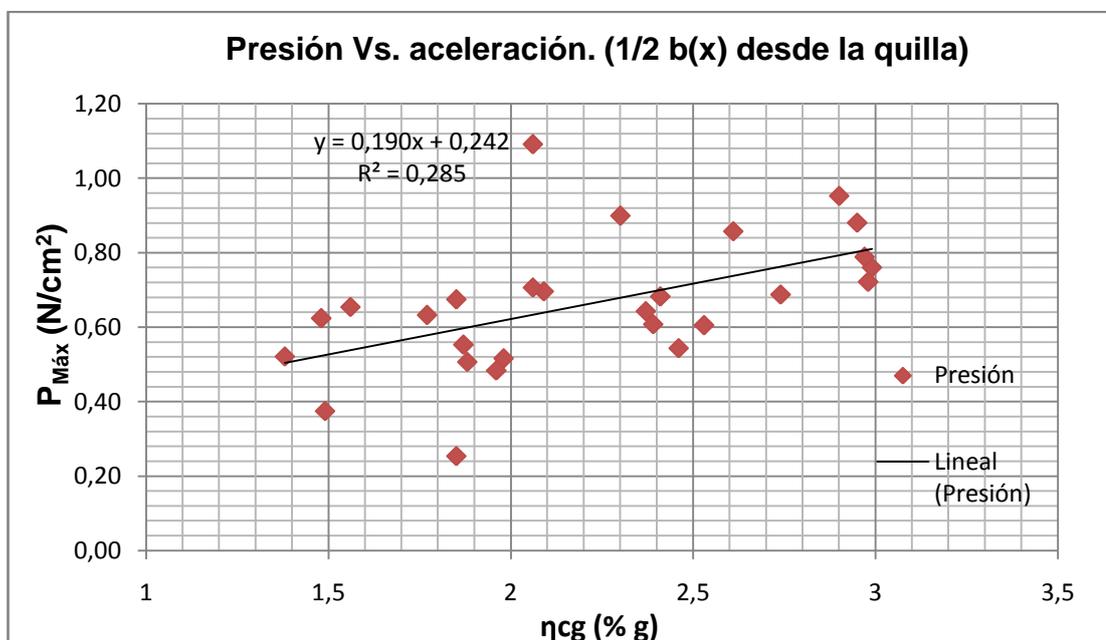


Figura 34. Gráfico Presión-aceleración a 1/2 de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia

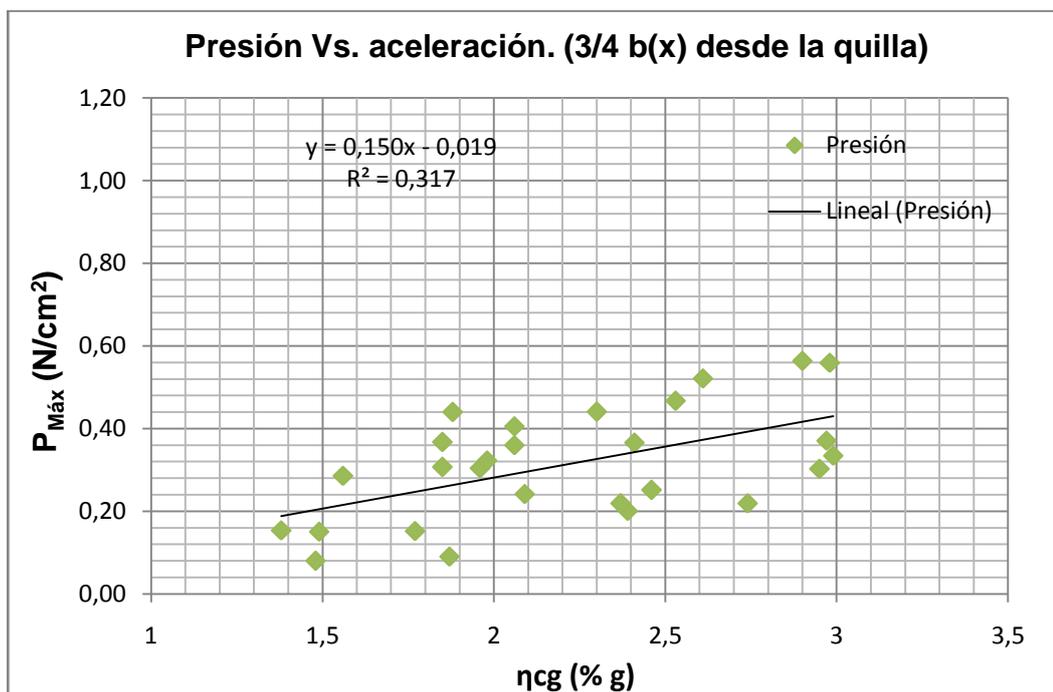


Figura 35. Gráfico Presión-aceleración a $\frac{3}{4}$ de la semimanga. Fuente: Elaboración Propia

v) Variación longitudinal de la presión.

A continuación se presenta la variación teórica de la presión a lo largo de la eslora, para la condición 1 (Ligera) junto con los valores experimentales. En las abscisas se tiene la posición longitudinal relativa respecto de la eslora de flotación (x/Lw) y en las ordenadas, el valor de presión en el centro de la semimanga medido desde quilla. Se grafican por separado las 3 condiciones de carga (véanse Figuras 36, 37 y 38). La línea en azul corresponde a la calculada teóricamente según ABS, [4], para el modelo de embarcación, los datos experimentales, en rojo y su línea de tendencia de orden cero (constante), en negro.

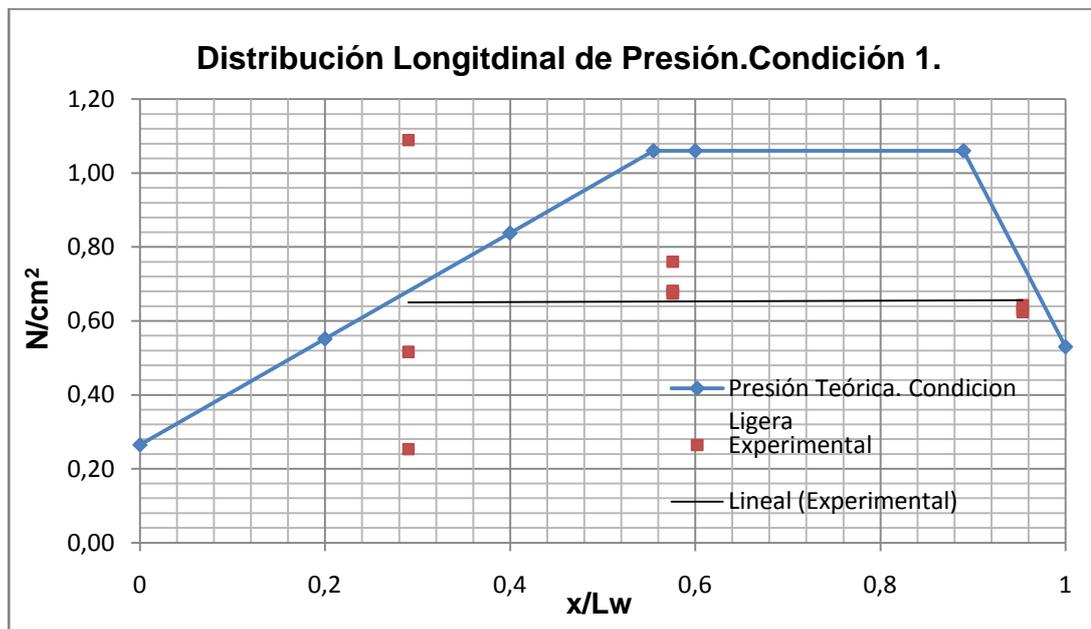


Figura 36. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 1.
Fuente: Elaboración Propia

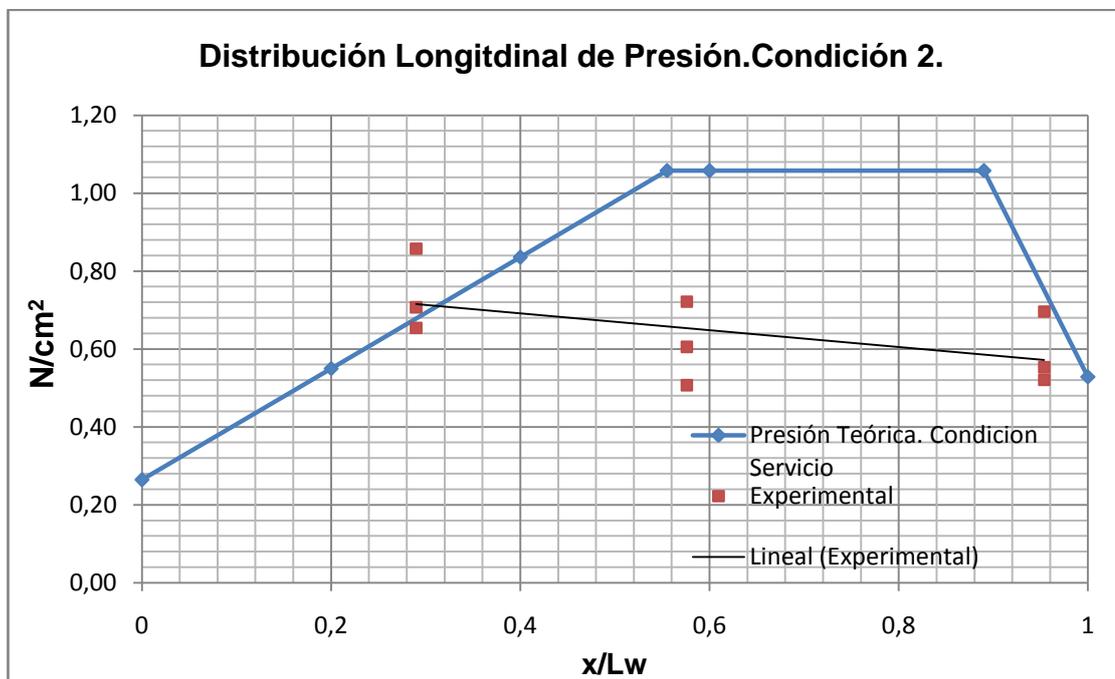


Figura 37. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 2.
Fuente: Elaboración Propia

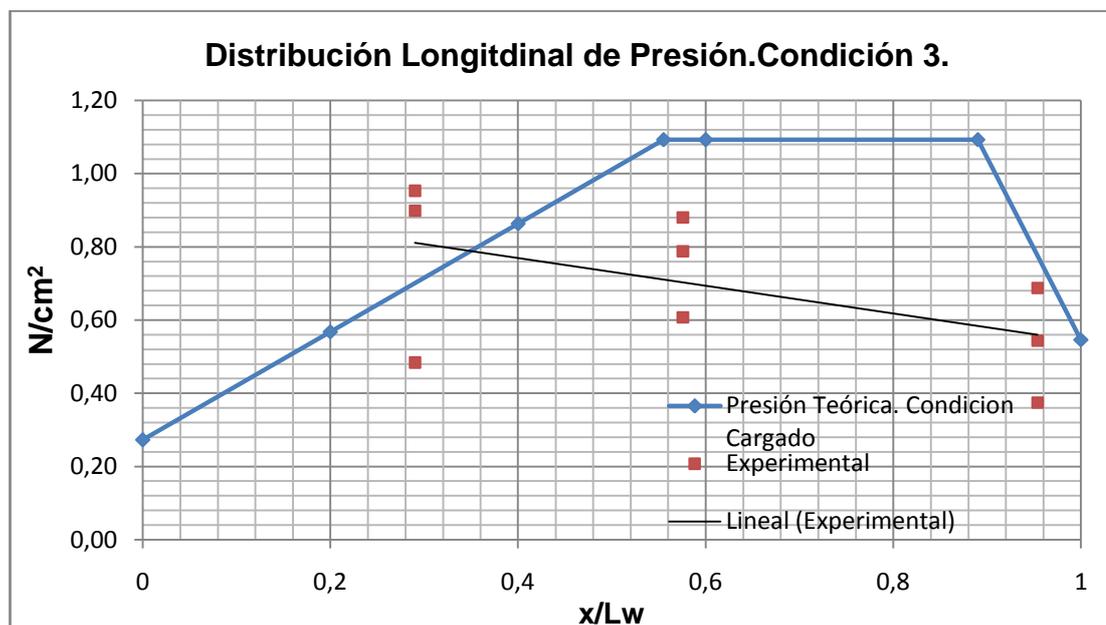


Figura 38. Distribución Longitudinal de presión. Condición de carga 3.
Fuente: Elaboración Propia

En las gráficas anteriores (Figuras 36, 37 y 38), se nota que los valores experimentales son menores que los teóricos hasta en un 52%. Sin embargo cabe recalcar, que en los valores teóricos obtenidos con ABS, [4], (curva azul), el valor de la aceleración vertical, (η_{cg}), es único para cada condición de carga. Por otro lado cada valor experimental graficado posee un valor de aceleración distinto, debido a que en este parámetro influía la altura de caída y la fricción del agarre entre los tubos de la base. Un ejemplo de lo antes mencionado, se encuentra en la Figura 36, en la posición longitudinal 1 ($x/Lw=0.29$), donde el valor de presión en la prueba experimental es 36% mayor del teórico. Sin embargo, esto se debe a que la aceleración experimental en esa prueba es 29% mayor respecto de teórica.

CAPITULO 3

ANÁLISIS DE EQUIVALENCIA TEÓRICA-EXPERIMENTAL

3.1 Análisis Dimensional para la Presión Dinámica.

Se revisa el Teorema de los Números Adimensionales “ Π ” de Buckingham, [9], para deducir las relaciones de similitud entre prototipo y modelo. Se incluyen 5 variables (presión, velocidad, eslora, densidad, y, gravedad), y, 3 dimensiones fundamentales (Masa, Longitud, y, Tiempo), y con ello se definen 2 grupos Pi adimensionales. Los grupos que se obtienen son, el número Froude ($F_V = V/\sqrt{gL}$) y de Euler ($E_u = p/\rho V^2$), lo cual implica que para un mismo número de Froude el correspondiente número de Euler es igual para modelo y prototipo.

Para usar los resultados experimentales obtenidos con un modelo para estimar las correspondientes presiones a una embarcación prototipo, se aplica el teorema Pi de Buckingham, [9], el cual expresa que:

“Un problema físico en que intervengan n magnitudes en la que hay m dimensiones fundamentales, las n magnitudes pueden agruparse en $n-m$ parámetros adimensionales. Si se requiere obtener valores precisos para un proyecto a partir del estudio de un modelo ha de existir semejanza dinámica entre el modelo y prototipo. Esta semejanza requiere que exista semejanza geométrica exacta y que la relación de las presiones dinámicas en puntos correspondientes sea constante”.

Para usar el teorema mencionado primero se listan las variables involucradas en el fenómeno, n , en total 5:

Velocidad, V [LT^{-1}]	Densidad, ρ [ML^{-3}]	presión, p [$ML^{-1}T^{-2}$]
Eslora, L_p [L]	Gravedad, g [LT^{-2}]	

Con las variables mencionadas y con $m=3$ dimensiones fundamentales: masa (M), longitud (L) y tiempo (T), como cita el teorema, se deben definir 2 parámetros adimensionales ($n-m=2$).

Luego para cada número adimensional se realiza la selección de variables para la deducción de sus exponentes. De esta manera se tiene:

Variables del grupo 1. $G1: p, \rho, V, L$:

$$G1 \rightarrow p\rho^a V^b L^c = (ML^{-1}T^{-2})(ML^{-3})^a(LT^{-1})^b(L)^c$$

$$M: 0 = 1 + a \rightarrow a = -1$$

$$T: 0 = -2 - b \rightarrow b = -2$$

$$L: 0 = -1 - 3a + b + c \rightarrow c = 0$$

$$\Pi_1 = \frac{p}{\rho V^2}$$

Este primer grupo se denomina Número de Euler, E_u , [9].

Para el segundo grupo de variables, se tiene. $G2: V, L, g, \rho$:

$$G2 \rightarrow VL^d g^e \rho^f = (LT^{-1})(L)^d(LT^{-2})^e(ML^{-3})^f$$

$$M: 0 = f$$

$$T: 0 = -1 - 2e \rightarrow e = -1/2$$

$$L: 0 = 1 + d + e - 3f \rightarrow d = -1/2$$

$$\Pi_2 = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Este grupo se denomina el número de Froude, F_V .

Entonces, si entre modelo y prototipo se tiene igualdad en número de Froude, el correspondiente número de Euler será igual entre ellos. En el

presente caso no se realizan pruebas con el modelo avanzando con velocidad, sino que se asume que el modelo avanzará con una velocidad equivalente para alcanzar igualdad de número de Froude. Las pruebas dejan caer el modelo desde diferentes alturas, pretendiendo alcanzar aceleraciones equivalentes en el modelo.

3.2 Cálculo de Presión Dinámica en prototipo.

Usando los factores de semejanza dimensional del subcapítulo anterior con la presión de una prueba, y asumiendo el mismo número de Froude, el número de Euler servirá para calcular el correspondiente valor de presión para el prototipo. En las pruebas, dejando caer el modelo desde diferentes alturas, se registran las variaciones de las aceleraciones y las correspondientes presiones máximas. Dado que la aceleración del centro de gravedad del modelo en las pruebas no podrá controlarse directamente, se grafica la presión versus aceleración vertical (n_{cg}) y se interpola la presión correspondiente a la aceleración del prototipo según la formulación de ABS, [4], para las 3 condiciones de carga. El valor máximo de presión estimada (119.89 KN/m^2) se lo obtuvo para la máxima aceleración teórica (condición Ligera).

Las pruebas de caída libre del modelo no consideran movimiento de avance en olas. La velocidad que está implícita en las pruebas corresponde a la velocidad de caída de la embarcación modelo, la cual puede ser deducida a partir de las curvas de aceleración vertical obtenidas durante las pruebas. En los cálculos que se desarrollan, se asume que con el modelo avanzando con la velocidad relativa, se obtendrá aceleraciones resultantes debidas a la presión hidrodinámica registrada.

Luego de las pruebas de caída libre con el modelo construido a una escala, $\lambda = L_p/L_m = 15.15$, y los números adimensionales, Euler y Froude, del subcapítulo anterior, se estiman los valores de presión para el prototipo.

Para el mismo número de Froude se obtiene la relación de velocidades, de esta manera:

$$\Pi_2 = \frac{V_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}}$$

$$\frac{V_p^2}{V_m^2} = \lambda$$

Habiendo asumido el mismo número de Froude entre modelo y prototipo, el correspondiente Euler, permite estimar la presión que actuaría en el prototipo:

$$\Pi_1 = \frac{p_m}{\rho_m V_m^2} = \frac{p_p}{\rho_p V_p^2}$$

$$p_p = \frac{\rho_p V_p^2}{\rho_m V_m^2} p_m$$

$$p_p = \lambda p_m$$

Con esta última expresión se calcula los valores de presión para el prototipo en todas las posiciones transversales y longitudinales, considerando que la relación entre densidades es la unidad.

En la Tabla XIV se presenta el resumen de los valores de las presiones en el centro de la semimanga ($b/2$), tabulados por condición de carga y en las 3 posiciones longitudinales de medición. Para cada una de ellas, a su vez se presentan los resultados promediados de caída desde cada una de las 3 alturas. Cada valor de presión se presenta con la correspondiente aceleración vertical del centro de gravedad (n_{cg}) registrada durante la prueba:

Condición de carga	Popa		Sección Media		Proa	
	n_{cg} .[g's]	Presión. [KN/m ²]	n_{cg} .[g's]	Presión. [KN/m ²]	n_{cg} .[g's]	Presión. [KN/m ²]
Ligera	1.85	39.40	1.85	104.71	1.48	96.89
	2.41	80.12	1.98	105.92	1.77	98.19
	2.99	169.41	2.06	118.10	2.37	99.91
En servicio	1.88	101.64	1.56	78.71	1.38	80.97
	2.53	109.75	2.06	93.97	1.87	85.82
	2.98	133.20	2.61	112.08	2.09	108.16
Carga máxima	1.96	75.09	1.96	94.38	1.49	58.25
	2.30	139.61	2.30	122.44	2.46	84.47
	2.90	147.92	2.90	136.76	2.74	106.81

Tabla XIV. Presiones estimadas para el prototipo en $b/2$. Fuente:
Elaboración Propia

Luego se analizan los resultados por grupos de aceleración y presión, por condición de carga y posición longitudinal del casco. En la Tabla XIV se muestra como ejemplo, el grupo de valores marcados en negrita, correspondientes a la Popa en la condición de carga Ligera. Cada uno de los

grupos se los grafica para obtener la curva de tendencia, como se muestra en la Figura 39.

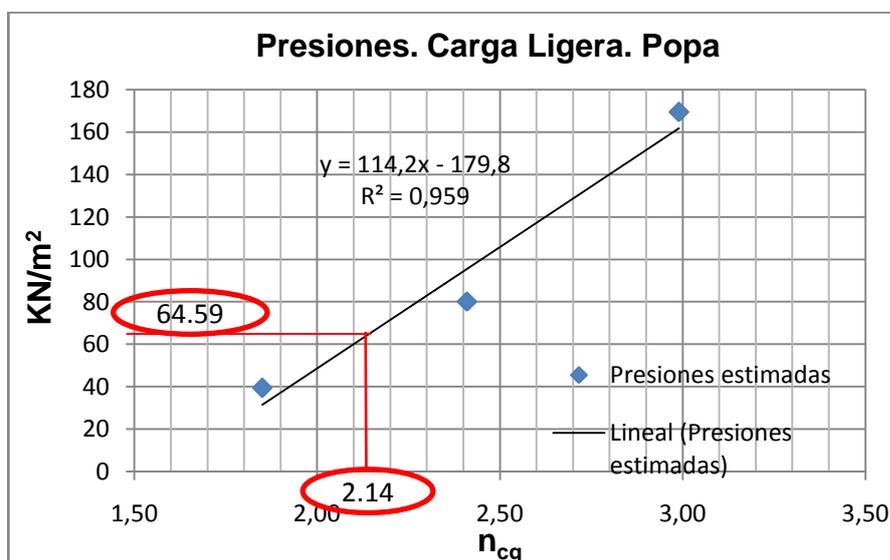


Figura 39. Interpolación de Presión con aceleración vertical, Condición Ligera, Popa. Fuente: Elaboración Propia

Con la ecuación de cada línea de tendencia se interpola la presión, para la aceleración del centro de gravedad, estimada según la formulación de ABS, [4], para cada condición de carga. En la Figura 39, se muestra el ejemplo para el primer grupo de datos, seleccionado anteriormente, del cual se obtiene la presión correspondiente a la aceleración teórica; en este caso para la condición de carga Ligera es 2.14 g's. Cabe citar que estos valores de presión interpolada, corresponden al máximo valor que se puede alcanzar, es decir, en la mitad de la semimanga del fondo de la embarcación.

En la Tabla XV, se muestran los coeficientes obtenidos para las ecuaciones de regresión, ($y = ax + c$), donde y , es la presión y x , la aceleración vertical de cada condición de carga. Los valores de presión interpolada para el prototipo se tabulan en la última columna.

Condición de carga	n_{cg} [g's]	Posición longitudinal. (x/L_w)	a	c	Presión. [KN/m ²]
Ligera	2.14	0.29	114.20	-179.80	64.59
		0.58	58.46	-5.22	119.89
		0.95	3.31	92.12	99.21
En servicio	1.97	0.29	27.54	47.01	101.26
		0.58	31.79	28.89	91.52
		0.95	33.56	31.91	98.02
Carga máxima	1.79	0.29	70.17	-46.60	79.00
		0.58	42.65	16.05	92.39
		0.95	35.78	3.38	67.42

Tabla XV. Interpolación de presión. Fuente: Elaboración Propia

Los gráficos de presión vs. aceleración vertical, con los cuales se obtuvieron las ecuaciones de interpolación en la Tabla XV, se incluyen en el Anexo C de esta tesis.

3.3 Resumen de valores de Presión Teórica y Experimental.

Para la embarcación prototipo de 25.76 m de eslora, se preparan curvas de distribución longitudinal de la Presión, aplicando tanto las formulaciones de ABS, [4], como los valores de presión estimados con los resultados experimentales del subcapítulo anterior. Los valores corresponden al punto central, respecto de la manga ($b/2$), que fue donde se presentaron los máximos valores de presión. La velocidad del prototipo a la cual se estiman estos valores es 26.62 nudos y se consideran las 3 condiciones de carga de la embarcación (74.19, 81.0, 89.67 toneladas).

En la Tabla XVI, se presentan los resultados de las presiones máximas encontradas mediante la interpolación usando la aceleración del prototipo, de acuerdo a lo explicado en el subcapítulo anterior.

Condición de carga.	Aceleración vertical (n_{cg}).[g's]	Posición longitudinal.(x/L_w)	Presión Interpolada.[KN/m ²]
Ligero	2.14	0.29	64.59
		0.58	119.89
		0.95	99.21
Servicio	1.97	0.29	101.26
		0.58	91.52
		0.95	98.02
Carga máxima	1.79	0.29	79.00
		0.58	92.39
		0.95	67.42

Tabla XVI. Presión interpolada para aceleración de prototipo. Fuente:
Elaboración Propia

Las aceleraciones verticales en el centro de gravedad, se las calcula con la formulación de ABS, [4], (véase Capítulo 1, Subcapítulo 1.2), mientras que los valores de presión son calculados, como se indica en el Subcapítulo anterior.

A continuación se grafican los valores de la Tabla XVI, junto con la curva de distribución longitudinal de presión calculada con ABS, [4], en las Figuras 40, 41 y 42 para cada condición de carga.

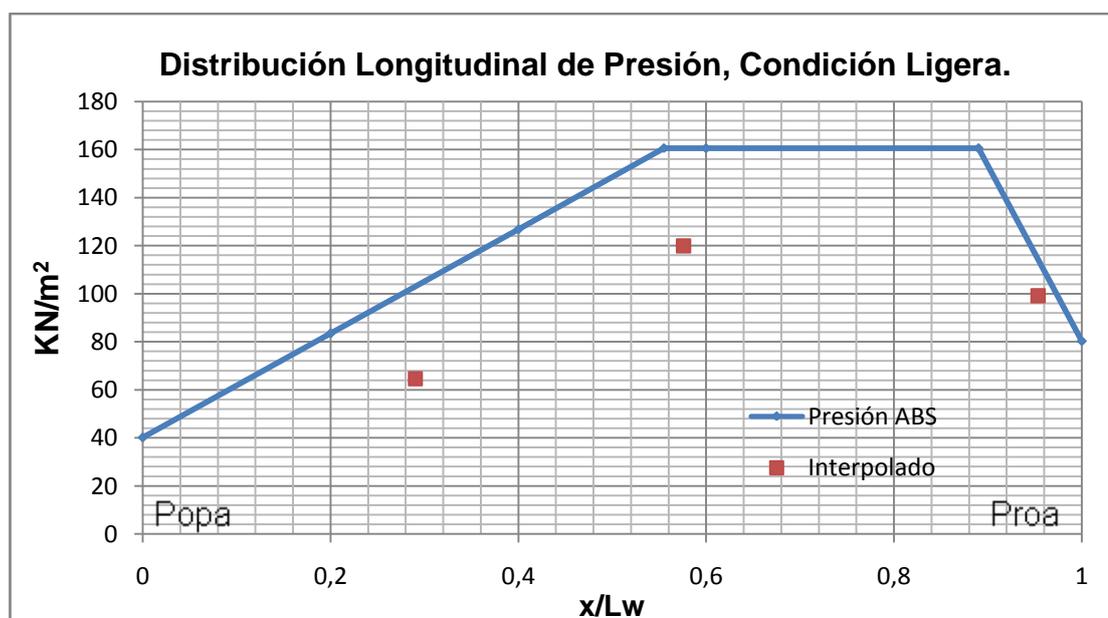


Figura 40. Distribución longitudinal de presión en b/2. Condición de carga Ligera. Fuente: Elaboración Propia

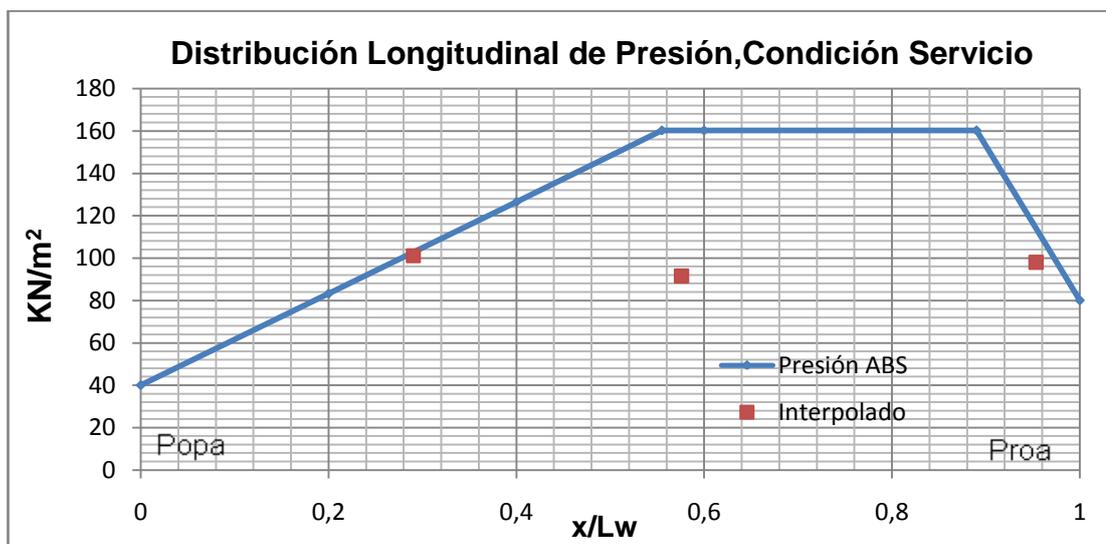


Figura 41. Distribución longitudinal de presión en b/2. Condición de Servicio. Fuente: Elaboración Propia

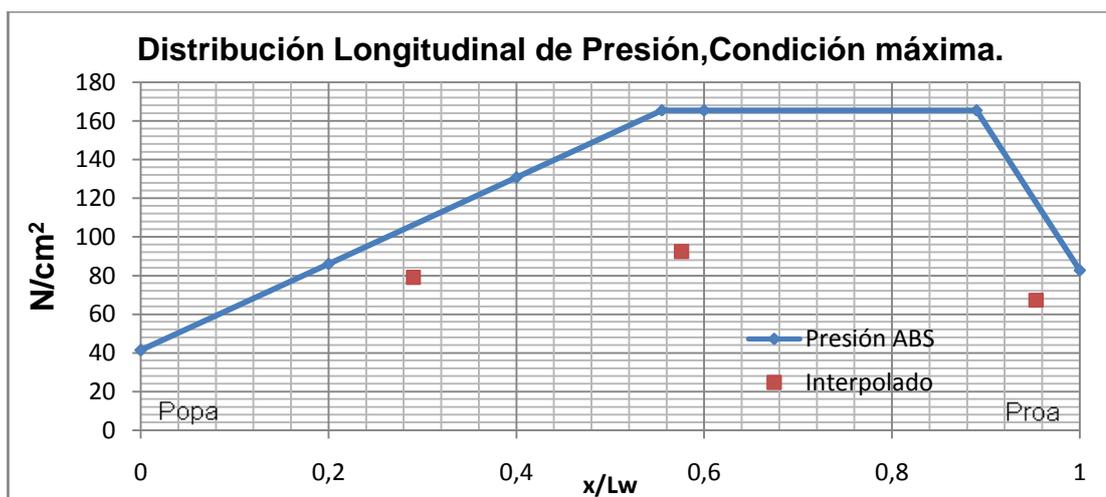


Figura 42. Distribución longitudinal de presión en b/2. Condición máxima. Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar que los valores interpolados, siguen la tendencia de la curva estimada por ABS, es decir, siguen su forma trapezoidal, confirmando los resultados teóricos. Además se aprecia que los valores experimentales se encuentran por debajo de dicha curva.

3.4 Análisis de Equivalencia de Presión Dinámica para cada condición.

En los gráficos de distribución de presión máxima para el prototipo, se nota que los valores experimentales siguen el comportamiento de la curva recomendada por la Sociedad de Clasificación, ABS, [4], es decir, confirman la forma trapezoidal de la distribución de presión. Se aprecia también que los valores alrededor de Sección Media son más altos que los de proa y popa, con excepción de condición de Servicio; sin embargo se nota que en esta condición de carga, la presión tiende a mantenerse constante, por debajo de la curva teórica. Los porcentajes de diferencia entre las formulaciones de ABS y los deducidos a partir de la experimentación se encuentran en un rango entre, 3-44%. Esto es lo esperado, dado que la Sociedad de Clasificación debe asegurar que su formulación cubra las diferentes geometrías y condiciones de operación de un buque.

Del subcapítulo anterior, véase Figuras 40, 41 y 42, se aprecia que en la condición de carga de servicio y máxima, los valores interpolados básicamente son constantes con un porcentaje de 40% bajo la distribución de presión estimada por ABS, [4]. Mientras que en condición de carga Ligera, los puntos siguen el comportamiento de la curva, eso es, un valor mayor en Sección Media, respecto del de Proa y Popa.

Si se utiliza las reglas de la Sociedad Clasificadora, [4], para el cálculo del espesor de planchaje en el fondo, t , sometido a presión, p , se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$t = s \sqrt{\frac{pk}{1000\sigma_a}}$$

De la cual se despeja el esfuerzo de diseño, σ_a :

$$\sigma_a = \left(\frac{s}{t}\right)^2 \left(\frac{k}{1000}\right) \cdot p$$

Es decir, para una plancha, el esfuerzo es proporcional a la presión aplicada. Por lo tanto si se usa esta formulación para encontrar el esfuerzo de la plancha en el fondo, utilizando los mismos parámetros a excepción de la presión, se tiene:

$$\sigma_{a.ABS} = \sigma_{a.pruebas} \frac{p_{ABS}}{p_{pruebas}}$$

De esta manera tomando los valores de presión en Sección Media y a la mitad de la semimanga ($b/2$), donde se presenta los valores de presión máximo, tanto de ABS, como los obtenidos en este trabajo, véase: Tabla VIII y Tabla XIV:

$$\sigma_{a.ABS} = \sigma_{a.pruebas} \left(\frac{160.59}{119.89} \right)$$

$$FS = \frac{\sigma_{a.ABS}}{\sigma_{a.pruebas}} = 1.34$$

Se obtiene un factor de seguridad del esfuerzo de diseño de 1.34. Un valor esperado, debido a que las formulaciones de una Sociedad de Clasificación pretenden cubrir diferentes geometrías y condiciones de operación en diversas embarcaciones, en este caso, planeadoras.

CONCLUSIONES

En esta tesis se calcula primero la distribución espacial de la presión en el fondo de una lancha planeadora, usando las recomendaciones de la Sociedad de Clasificación ABS del 2012, [4]. Luego en forma experimental se obtiene la distribución espacial y temporal de la presión utilizando un modelo de lancha planeadora de 1.70 metros de eslora. Los resultados experimentales se obtuvieron en pruebas en una piscina de 6x3.8x1 m, registrando presión y aceleración, al dejar caer libremente el modelo de la embarcación hasta impactar el agua. Finalmente, se analiza la temporalidad de la presión de los valores experimentales, y, mediante análisis dimensional, se los compara con los resultados teóricos en el fondo de la embarcación. Luego de este proceso, se concluye que:

1. La distribución longitudinal de presión en el fondo de la lancha planeadora, fue estimada usando la formulación de la Sociedad de Clasificación, ABS, y, muestra que la zona donde se genera la mayor presión, se encuentra alrededor de Sección Media. Esta zona es crítica en embarcaciones planeadoras, debido a que al navegar, por su elevado ángulo de trimado a velocidades altas, golpean la superficie del agua en esa zona, generando el máximo impacto hidrodinámico. Por otra parte, la Popa del buque permanece inmersa en el agua soportando menor presión dinámica, y, en Proa, por la elevación que posee la embarcación en operación, el impacto será de menor influencia, respecto de la Sección Media.

2. En la distribución de Presión según las formulaciones de ABS, la aceleración vertical del CG, n_{cg} , el desplazamiento, Δ , y el factor de distribución, F_D , poseen igual influencia en el resultado, debido a que se encuentran en proporción directa a este parámetro. Además el factor de distribución F_D , que depende de la separación entre refuerzos longitudinales, s , se lo ha interpretado como el parámetro que considera la acción de la presión máxima que actúa sobre un porcentaje del panel de plancha. Esto es, si dicha separación

disminuye, la presión máxima que actúa sobre la plancha, cubre mayor cantidad de área entre los refuerzos y se asigna un mayor valor al factor F_D .

3. En las pruebas de caída libre del modelo se registraron mediciones de presión en 3 posiciones longitudinales, y, en cada una de estas, en 3 posiciones transversales. Se repitieron 8 veces cada prueba y la máxima diferencia entre curvas de presión, respecto de su promedio, fue 17%. La distribución transversal de presión dinámica obtenida experimentalmente, tiene forma de campana, iniciando en cero en la china, luego se hace máxima en la mitad del fondo de la embarcación, para finalmente disminuir hasta la quilla. Si se considera la variación longitudinal, los valores máximos (en la posición $b/2$) ligeramente en las mediciones de Popa; en esta sección del buque, el ángulo de astilla muerta es menor. Es decir, que la presión dinámica que soporta un panel en el fondo de la embarcación planeadora durante el impacto hidrodinámico, aumenta conforme el ángulo de astilla muerta disminuye.

4. Los valores máximos de las curvas de presión de los puntos de medición transversal ($y/b_c = 1/4, 1/2$ y $3/4$), tienen un desfase de alrededor de 0.04 segundos. Este atraso de los picos de presión se produce debido al ángulo de astilla muerta, ya que la presión se desarrolla conforme el modelo impacta la superficie del agua. Por lo tanto el máximo valor registrado en cada posición transversal, el cual se encuentra alrededor de 0.4 segundos después del impacto de la quilla, se desarrolla paulatinamente conforme el modelo ingresa al agua.

5. La curva de la aceleración registrada durante las pruebas, muestra gran influencia de ruido electrónico. Sin embargo se nota que inicialmente posee un valor negativo cercano a la aceleración de la gravedad, y luego se incrementa hasta un valor máximo. La sumatoria de este valor de aceleración de la gravedad más el valor de la aceleración vertical del centro de gravedad del modelo cuando impacta el agua ($1 + n_{cg}$), es el parámetro que se encuentra presente en las formulaciones de ABS, [4], y de este, depende principalmente el valor de la presión dinámica en el fondo.

6. En general los valores de presión registrados experimentalmente, confirman la forma trapezoidal de la distribución longitudinal de presión, además ratifican la zona de presión máxima alrededor de Sección Media. Los valores de esfuerzo que se desarrollaran al escoger el espesor del planchaje con los valores experimentales se mantienen por debajo de los teóricos con un factor de seguridad de 1.34. Esto es lo esperado dado que la Sociedad Clasificadora trata de cubrir las posibles diferencias geométricas y condiciones de carga y/o operación, para una embarcación planeadora cualquiera.

RECOMENDACIONES

1. Deberían realizarse estudios adicionales con este tipo de pruebas para entender de mejor manera la influencia de la separación de refuerzos de un panel de planchaje sobre el fondo de una embarcación. Esto permitirá aplicar con más confianza el factor F_D , para la respuesta del fondo estructural.
2. La causa de interferencia de ruido electrónico en la toma de datos de la aceleración en las pruebas, se debió a la falta de un amplificador de señal que permita registrar una más clara curva de aceleración. Además es recomendable disponer un espacio físico cerrado para mejor manejo y ubicación de equipos, así como tomacorrientes polarizados y equipos o bases para evitar influencias externas sobre las pruebas durante la caída.

ANEXOS

ANEXO A.

Detalle de equipos.

Base para izar el modelo.

Fue construida con tubos de hierro galvanizado de 1 pulgada de diámetro. Sus dimensiones finales, basadas en las características del modelo, fueron 1.5x1.27x1 m. La estructura central, donde va acoplado el barco, le permite moverse libremente en dirección vertical. Posee templadores de 15 lb de capacidad y cables de 1/8 de pulgada que la sostienen. El cable central pasa por 2 poleas de 50 lb de capacidad, con el extremo adaptado al gancho de un cabrestante manual mediante un hilo, el cual se lo corta para iniciar la caída libre del modelo.



Figura 43. Base para levantar el modelo.

Acelerómetro.

Transductor de aceleración Brüel&Kjaer, modelo 4370 con sensibilidad de 80mV/g y compatible con una tarjeta de adquisición. Fue instalado en el centro de gravedad longitudinal del modelo de barco, para medir la aceleración vertical durante la caída libre.



Figura 44. Acelerómetro Brüel&Kjaer

Este dispositivo posee 2 cables de salida, que corresponden a la señal de aceleración (cable naranja) mientras que la otra, a la conexión de tierra (cable amarillo). Se acoplan a una tarjeta de adquisición de datos (para esta tesis se usó una OMEGA Daq300), como se muestra en la Figura 45.



Figura 45. Conexión Acelerómetro.

Tarjeta de adquisición de datos.

Tarjeta de adquisición marca OMEGA modelo OMB-DAQ-3000 y su software *DaqView*, para el registro de los datos del acelerómetro. Para las pruebas se usó un solo canal análogo, estableciendo una razón de registro (scanrate) de 3889 scans/seg, valor adecuado para obtener una curva con poca interferencia de ruido.

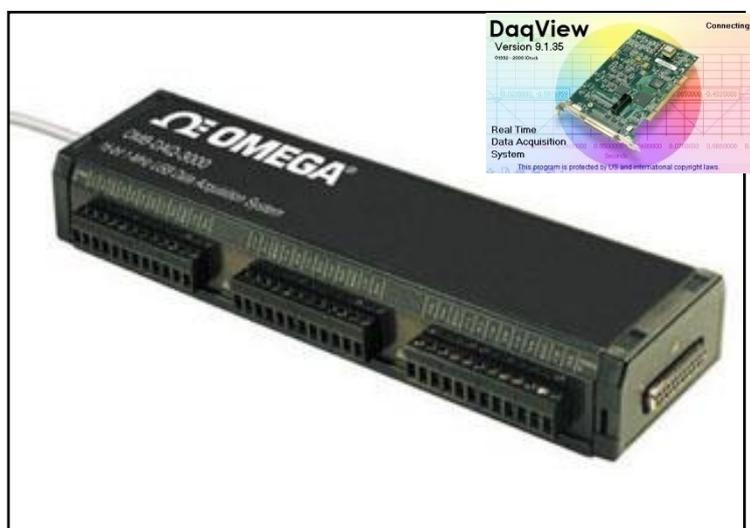


Figura 46. Tarjeta de adquisición de datos.

Campanas de presión.

Construidas localmente, usando recipientes de aluminio en forma de pirámide truncada, que como base tienen una plancha circular del mismo material, de 7.2 cm de diámetro y 0.67mm de espesor. Se montó un accesorio en el extremo del cono que le permita conectarse a una manguera

de 1/8 de pulgada y por el lado de la base se instaló un extensómetro sobre la plancha. Una vez conectado al punto de medición con la manguera, una presión dentro de la campana deforma el extensómetro acoplado en la base y emite una señal (en voltios [V]), proporcional a la deformación unitaria y se transmite al computador mediante el medidor de deformaciones.



Figura 47. Campanas de Presión.

En la Figura 48 se muestra la conexión de cada campana de presión. Éstas se conectan al medidor de deformaciones con 2 cables por canal (rojo y blanco). Los canales se encuentran dispuestos en pares desde abajo hacia arriba y se nota además, que el medidor de deformaciones posee un máximo de 4 canales de conexión.



Figura 48. Conexión de las campanas de presión.

Medidor de deformaciones.

El medidor de deformaciones marca, InstruNet posee una tarjeta de adquisición de datos interna #iNet-410 que se conecta al computador mediante el controlador USB #iNet-240. Usa el software *InstrumentWorld* para la adquisición de los datos.

Para las pruebas se usó el máximo scanrate que permite el equipo, con 3 canales usados simultáneamente, 495 scan/segundo.



Figura 49. Medidor de deformaciones.

Densímetro.

Usado para obtener la densidad del agua durante las pruebas, tomando una muestra. Se obtuvo una densidad de 0.998 g/cm^3 . Ver Figura 50.



Figura 50. Densímetro

ANEXO B.

Curvas experimentales.

En la Tabla XVII se presentan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 1 (Ligera) y posición longitudinal 3 (Popa), para las 3 alturas de caída (15, 29, 25 cm).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.07	0.18	0.70	0.08	0.14	0.65
0.25	0.09	0.25	0.62			
0.25	0.04	0.11	0.68			
0.25	0.11	0.08	0.65			
0.25	0.02	0.03	0.65			
0.25	0.11	0.25	0.59			
0.50	0.21	0.46	1.08	0.25	0.52	1.09
0.50	0.35	0.59	1.15			
0.50	0.16	0.53	1.07			
0.50	0.30	0.57	1.05			
0.50	0.25	0.70	1.13			
0.50	0.25	0.33	1.07			
0.75	0.01	0.24	0.20	0.08	0.15	0.22
0.75	0.10	0.24	0.23			
0.75	0.09	0.13	0.26			
0.75	0.13	0.05	0.22			
0.75	0.10	0.11	0.20			
0.75	0.08	0.17	0.20			

Tabla XVII. Presiones registradas y presiones promedio para condición de carga Ligera en popa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 51 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

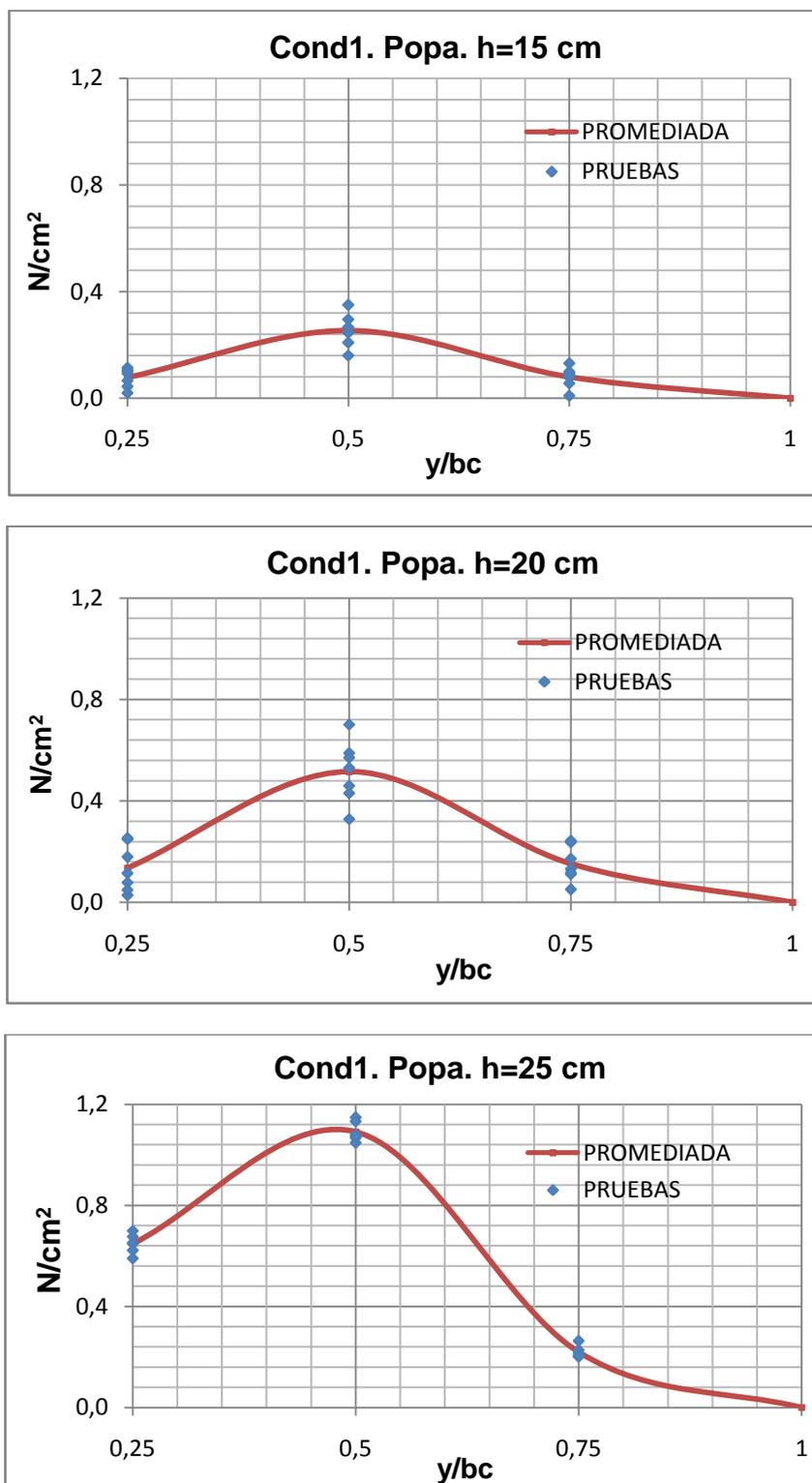


Figura 51. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

A continuación en la Tabla XVIII se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 2 y posición longitudinal 3 (popa).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.52	0.58	0.59	0.49	0.58	0.55
0.25	0.51	0.57	0.50			
0.25	0.50	0.53	0.23			
0.25	0.64	0.51	0.69			
0.25	0.27	0.69	0.73			
0.25	0.40	-	-			
0.50	0.74	0.66	0.77	0.65	0.71	0.86
0.50	0.63	0.73	0.75			
0.50	0.63	0.70	0.80			
0.50	0.64	0.75	0.99			
0.50	0.63	0.69	0.97			
0.50	0.77	-	-			
0.75	0.23	0.07	0.20	0.15	0.09	0.24
0.75	0.18	0.09	0.25			
0.75	0.18	0.03	0.15			
0.75	0.12	0.07	0.29			
0.75	0.06	0.19	0.32			
0.75	0.13	-	-			

Tabla XVIII. Presiones registradas y presiones promedio para condición de Servicio en popa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 52 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

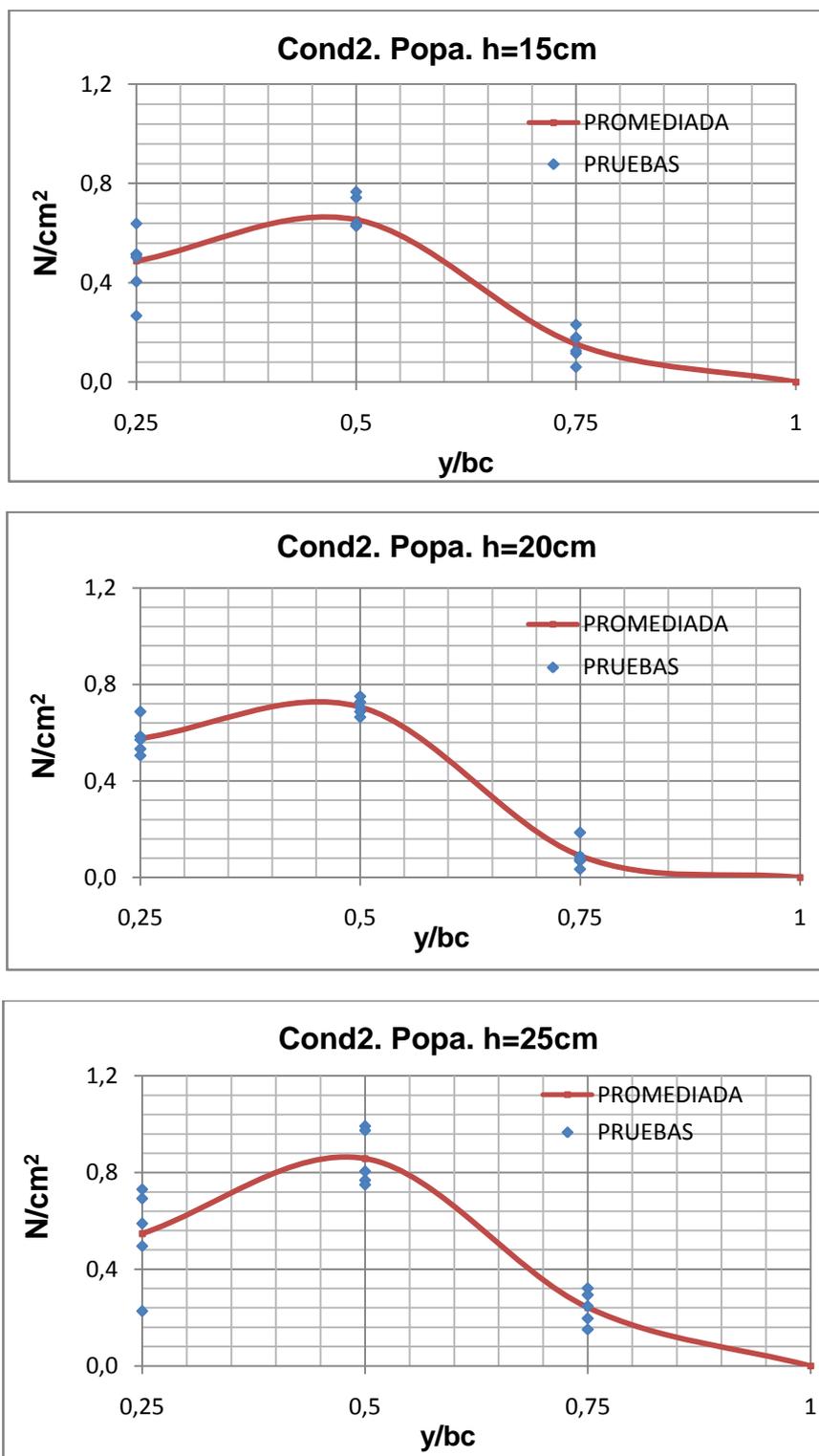


Figura 52. Presiones Experimentales. Condición de Servicio. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XIX se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 3 y posición longitudinal 3 (popa).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.48	0.73	0.69	0.33	0.71	0.76
0.25	0.48	0.80	0.80			
0.25	0.55	0.58	0.85			
0.25	0.36	0.73	0.78			
0.25	0.17	0.68	0.69			
0.25	0.34	0.69	0.73			
0.25	0.19	0.73	-			
0.50	0.75	0.91	0.89	0.48	0.90	0.95
0.50	0.60	0.99	1.01			
0.50	0.58	0.78	0.95			
0.50	0.42	0.97	0.90			
0.50	0.40	0.68	0.99			
0.50	0.34	0.99	0.97			
0.50	0.40	0.97	-			
0.75	0.25	0.26	0.20	0.15	0.25	0.22
0.75	0.21	0.18	0.22			
0.75	0.21	0.18	0.21			
0.75	0.27	0.26	0.28			
0.75	0.06	0.26	0.29			
0.75	0.10	0.29	0.32			
0.75	0.03	0.32	-			

Tabla XIX. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en popa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 53 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

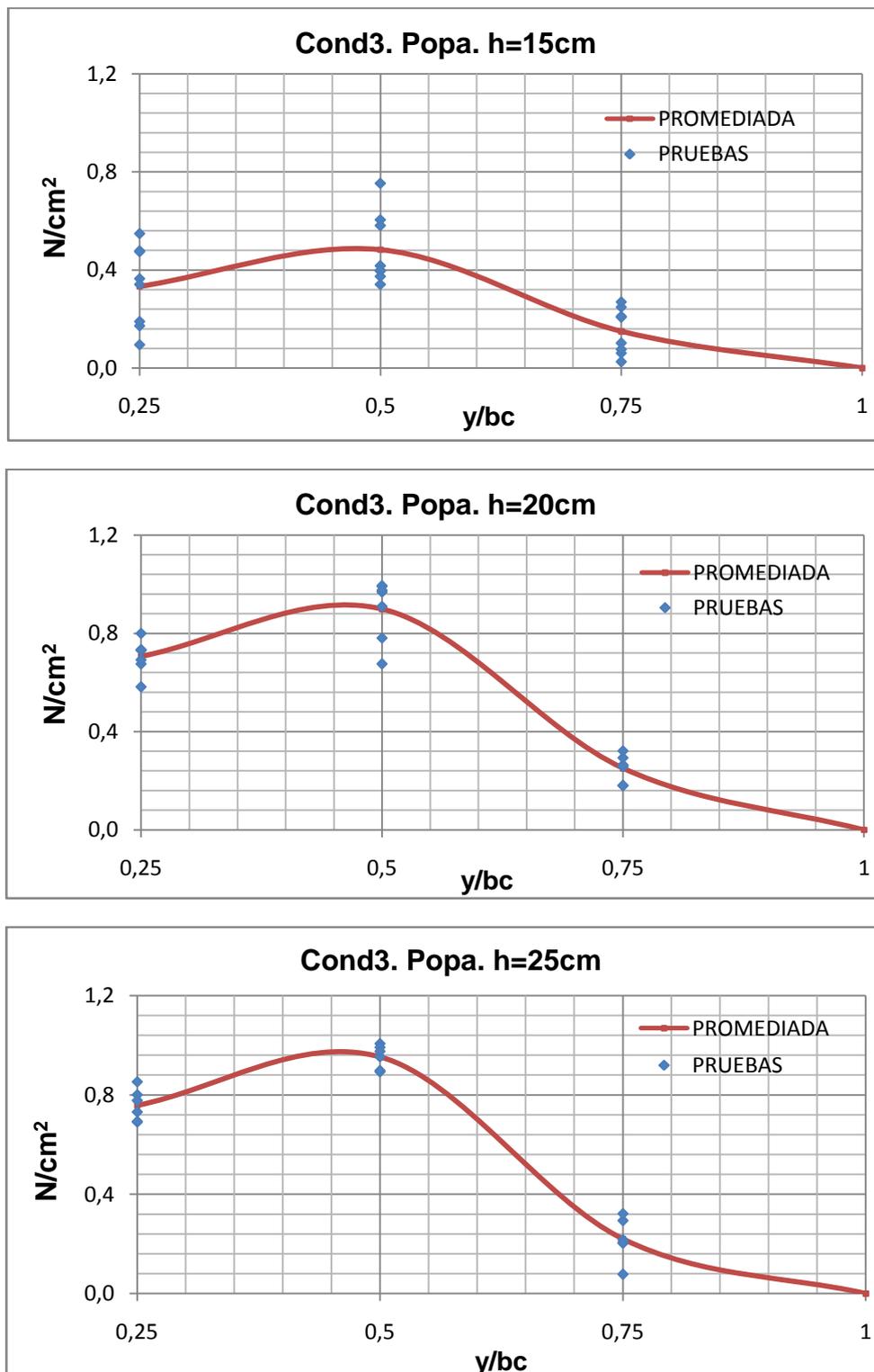


Figura 53. Presiones Experimentales. Condición máxima. Posición Longitudinal 3. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XX se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 1 y posición longitudinal 2 (sección media).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.70	0.51	0.74	0.58	0.56	0.69
0.25	0.61	0.68	0.63			
0.25	0.55	0.70	0.73			
0.25	0.46	0.54	0.63			
0.25	0.45	0.47	0.68			
0.25	0.79	0.48	0.74			
0.25	0.49	0.51	0.68			
0.50	0.78	0.64	0.82	0.67	0.68	0.76
0.50	0.79	0.70	0.76			
0.50	0.60	0.77	0.77			
0.50	0.53	0.72	0.72			
0.50	0.62	0.64	0.71			
0.50	0.79	0.66	0.79			
0.50	0.61	0.65	0.76			
0.75	0.21	0.25	0.34	0.31	0.32	0.36
0.75	0.22	0.44	0.27			
0.75	0.49	0.46	0.54			
0.75	0.33	0.30	0.50			
0.75	0.25	0.23	0.29			
0.75	0.33	0.28	0.22			
0.75	0.32	0.31	0.21			

Tabla XX. Presiones registradas y presiones promedio para condición ligera en sección media. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 54 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

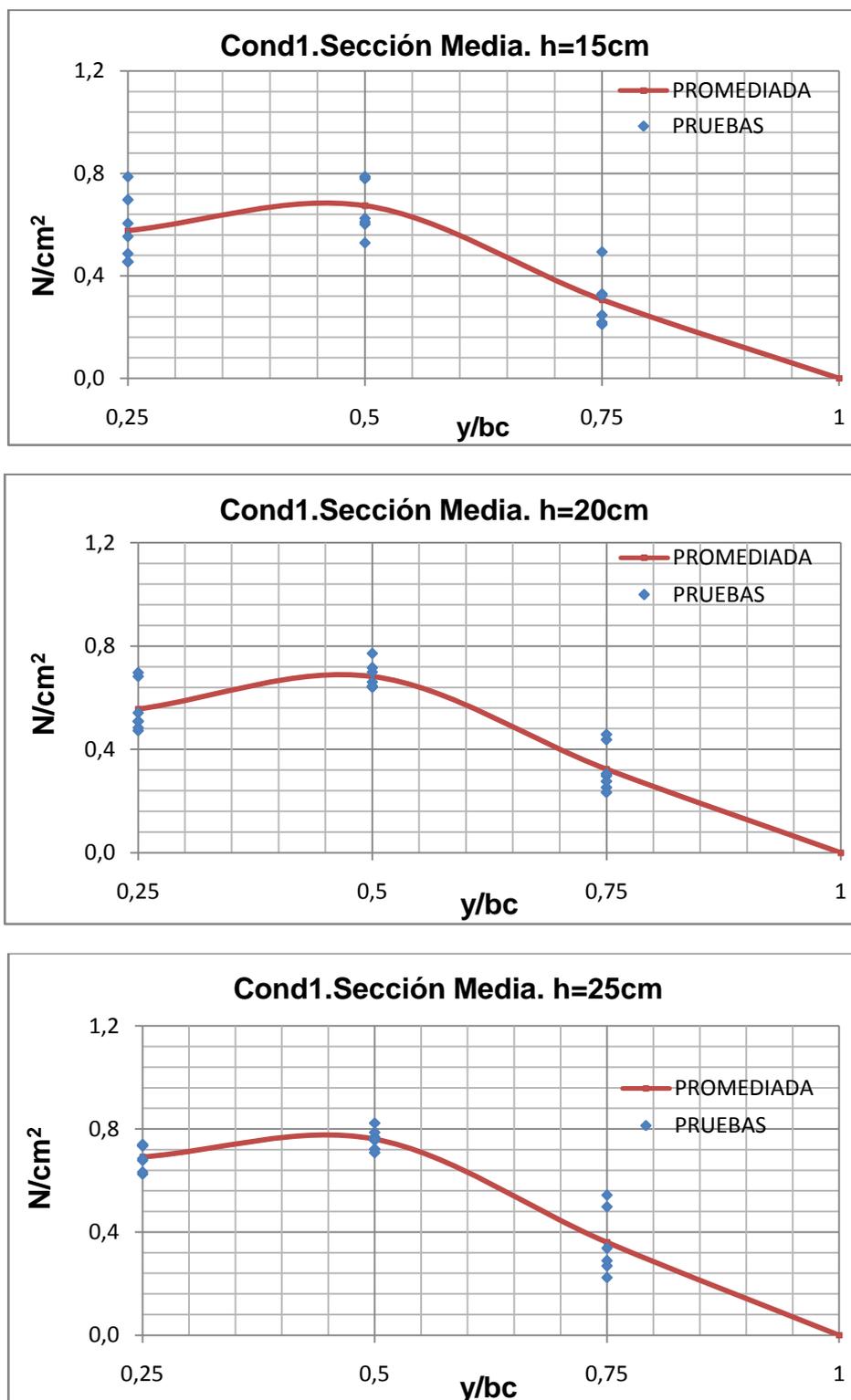


Figura 54. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XXI se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 2 y posición longitudinal 2 (sección media).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.39	0.42	0.69	0.42	0.44	0.62
0.25	0.42	0.46	0.56			
0.25	0.45	0.45	0.68			
0.25	0.41	0.46	0.60			
0.25	0.43	0.36	0.57			
0.25	0.39	0.49	0.62			
0.25	0.44	0.46	0.62			
0.50	0.50	0.55	0.79	0.51	0.61	0.72
0.50	0.47	0.66	0.72			
0.50	0.49	0.64	0.73			
0.50	0.59	0.67	0.67			
0.50	0.49	0.57	0.78			
0.50	0.51	0.57	0.69			
0.50	0.49	0.57	0.75			
0.75	0.33	0.33	0.56	0.29	0.41	0.52
0.75	0.25	0.44	0.68			
0.75	0.35	0.45	0.60			
0.75	0.25	0.37	0.57			
0.75	0.29	0.33	0.62			
0.75	0.27	0.48	0.62			
0.75	0.27	0.43	0.65			

Tabla XXI. Presiones registradas y presiones promedio para condición en servicio en sección media. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 55 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

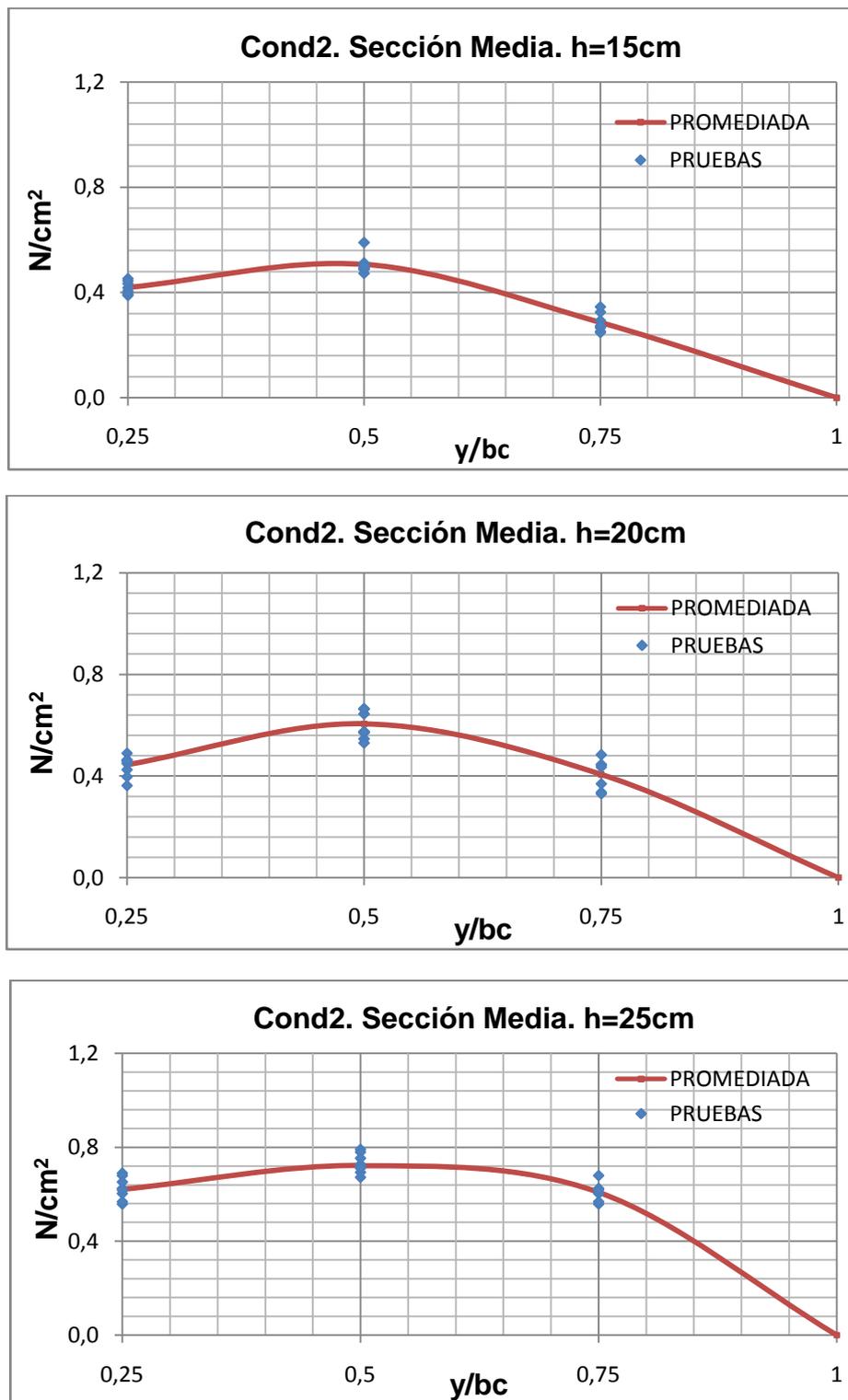


Figura 55. Presiones Experimentales. Condición de servicio. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XXII se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 3 y posición longitudinal 2 (sección media).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.54	0.53	0.66	0.42	0.51	0.62
0.25	0.34	0.54	0.54			
0.25	0.47	0.44	0.68			
0.25	0.35	0.44	0.67			
0.25	0.43	0.43	0.55			
0.25	0.39	0.57	0.60			
0.25	0.41	0.59	-			
0.50	0.63	0.76	0.92	0.61	0.79	0.88
0.50	0.60	0.81	0.83			
0.50	0.61	0.78	0.92			
0.50	0.57	0.75	0.87			
0.50	0.57	0.79	0.87			
0.50	0.64	0.80	0.88			
0.50	0.63	0.83	-			
0.75	0.21	0.46	0.64	0.30	0.44	0.56
0.75	0.26	0.50	0.54			
0.75	0.28	0.40	0.61			
0.75	0.27	0.39	0.55			
0.75	0.30	0.36	0.51			
0.75	0.34	0.57	0.54			
0.75	0.46	0.41	-			

Tabla XXII. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en sección media. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 56 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

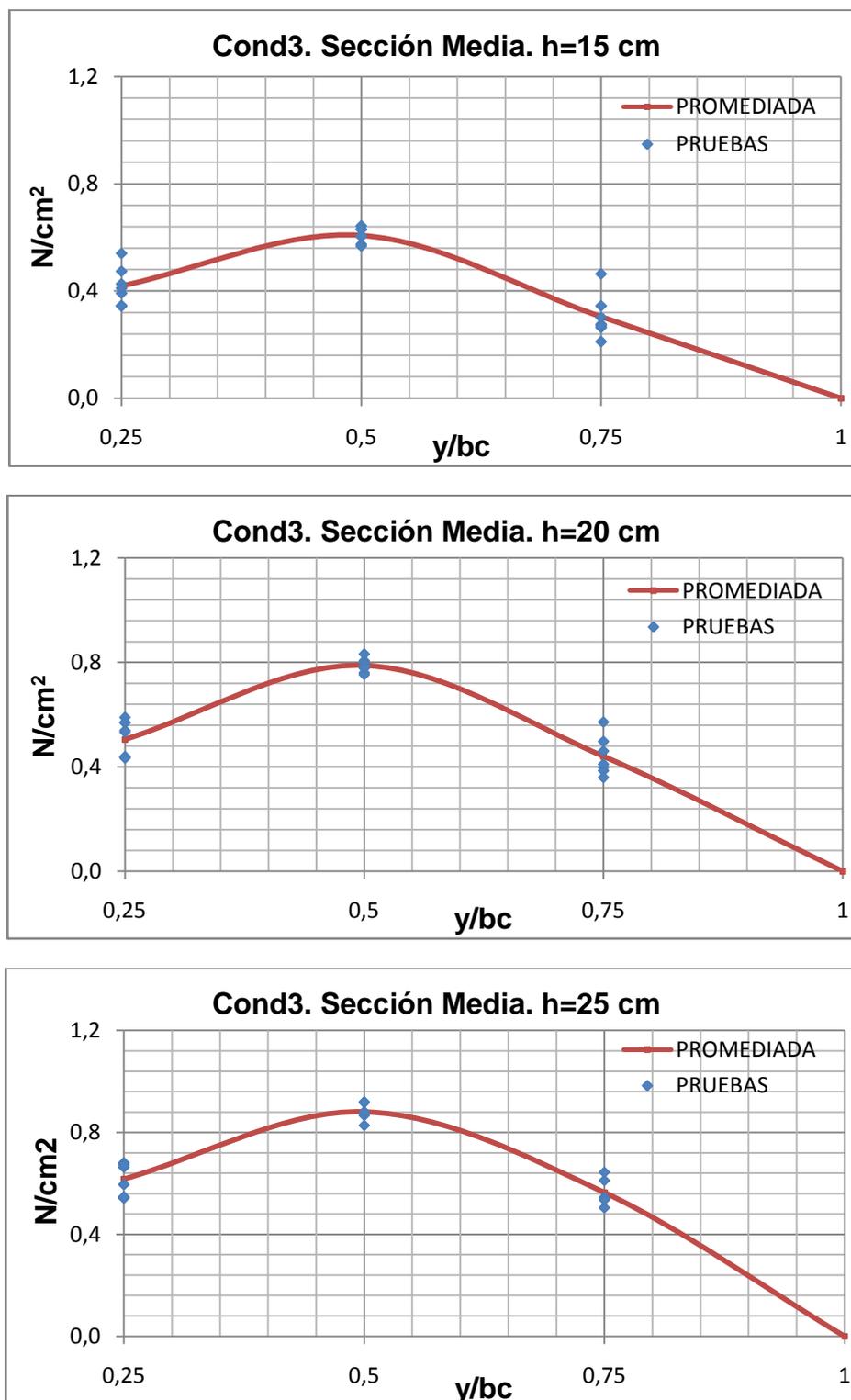


Figura 56. Presiones Experimentales. Condición máxima. Posición Longitudinal 2. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XXIII se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 3 y posición longitudinal 1 (proa).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.27	0.26	0.60	0.29	0.50	0.51
0.25	0.25	0.36	0.47			
0.25	0.32	0.31	0.56			
0.25	0.22	0.28	0.43			
0.25	0.28	0.44	0.49			
0.25	0.33	0.41	0.49			
0.25	0.35	-	-			
0.50	0.38	0.49	0.74	0.38	0.79	0.69
0.50	0.27	0.50	0.71			
0.50	0.32	0.63	0.73			
0.50	0.26	0.00	0.58			
0.50	0.37	0.58	0.72			
0.50	0.60	0.52	0.66			
0.50	0.44	-	-			
0.75	0.22	0.22	0.36	0.20	0.54	0.30
0.75	0.15	0.32	0.33			
0.75	0.14	0.39	0.32			
0.75	0.18	0.59	0.21			
0.75	0.14	0.39	0.29			
0.75	0.30	0.33	0.31			
0.75	0.28	-	-			

Tabla XXIII. Presiones registradas y presiones promedio para condición máxima en proa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 57 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

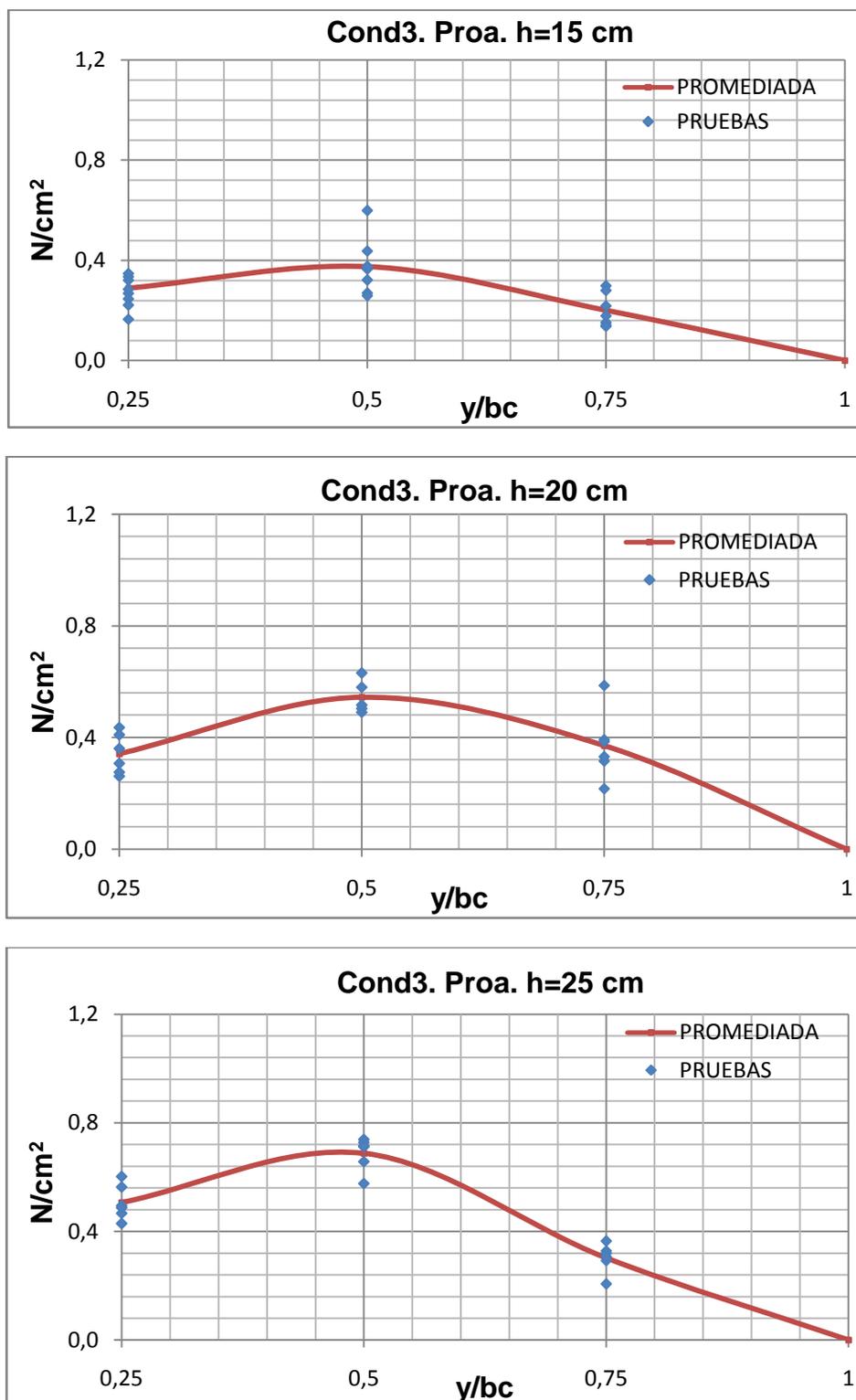


Figura 57. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XXIV se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 2 y posición longitudinal 1 (proa).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.48	0.58	0.60	0.48	0.53	0.62
0.25	0.52	0.47	0.63			
0.25	0.48	0.52	0.60			
0.25	0.41	0.56	0.64			
0.25	0.40	0.51	0.63			
0.25	0.57	0.56	0.64			
0.25	0.53	0.52	-			
0.50	0.51	0.59	0.65	0.52	0.55	0.70
0.50	0.54	0.51	0.72			
0.50	0.53	0.53	0.66			
0.50	0.46	0.56	0.79			
0.50	0.47	0.56	0.67			
0.50	0.58	0.58	0.68			
0.50	0.56	0.54	-			
0.75	0.39	0.52	0.55	0.44	0.47	0.56
0.75	0.47	0.44	0.60			
0.75	0.39	0.47	0.59			
0.75	0.38	0.44	0.61			
0.75	0.40	0.43	0.50			
0.75	0.54	0.51	0.50			
0.75	0.50	0.46	-			

Tabla XXIV. Presiones registradas y presiones promedio para condición de Servicio en proa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 58 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

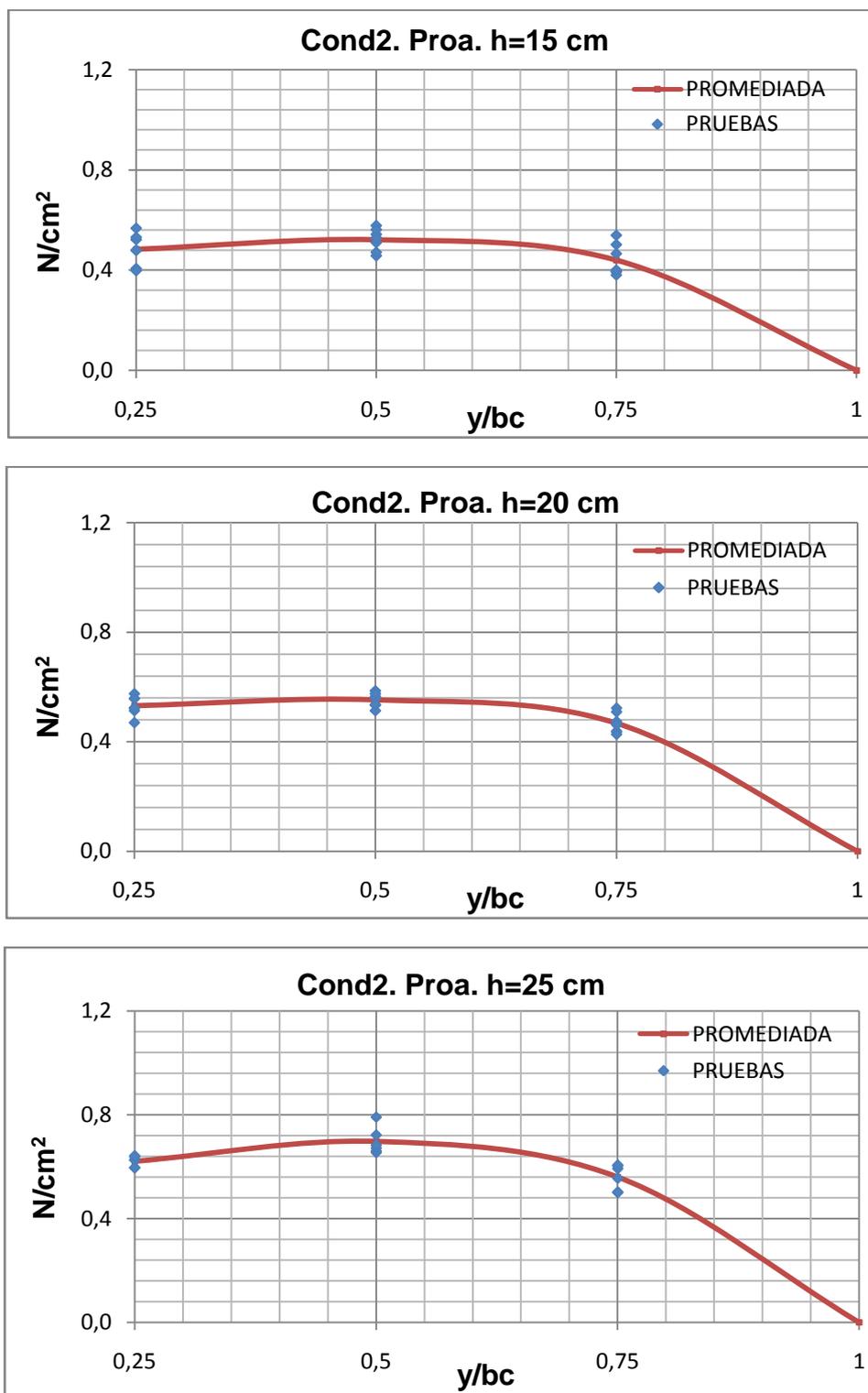


Figura 58. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla XXV se tabulan las presiones registradas durante las pruebas para la condición de carga 1 y posición longitudinal 1 (proa).

Posición transversal (y/bc)	Presiones registradas. [N/cm ²]			Presiones promedio. [N/cm ²]		
	h = 15	h = 20	h = 25	h = 15	h = 20	h = 25
0.25	0.50	0.51	0.60	0.52	0.56	0.59
0.25	0.50	0.61	0.59			
0.25	0.49	0.59	0.55			
0.25	0.48	0.56	0.63			
0.25	0.58	0.57	0.61			
0.25	0.57	0.54	0.62			
0.25	-	0.57	0.56			
0.50	0.50	0.59	0.62	0.62	0.63	0.64
0.50	0.67	0.59	0.63			
0.50	0.63	0.67	0.63			
0.50	0.64	0.68	0.66			
0.50	0.67	0.68	0.61			
0.50	0.64	0.59	0.72			
0.50	-	0.66	0.62			
0.75	0.30	0.34	0.34	0.37	0.37	0.33
0.75	0.38	0.39	0.27			
0.75	0.35	0.36	0.27			
0.75	0.34	0.35	0.39			
0.75	0.41	0.38	0.33			
0.75	0.42	0.38	0.41			
0.75	-	0.39	0.33			

Tabla XXV. Presiones registradas y presiones promedio para condición Ligera en proa. Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 59 se grafican los valores de la tabla anterior. Las presiones obtenidas durante las pruebas se grafican en azul, mientras que la curva promedio de esos datos se grafica en rojo.

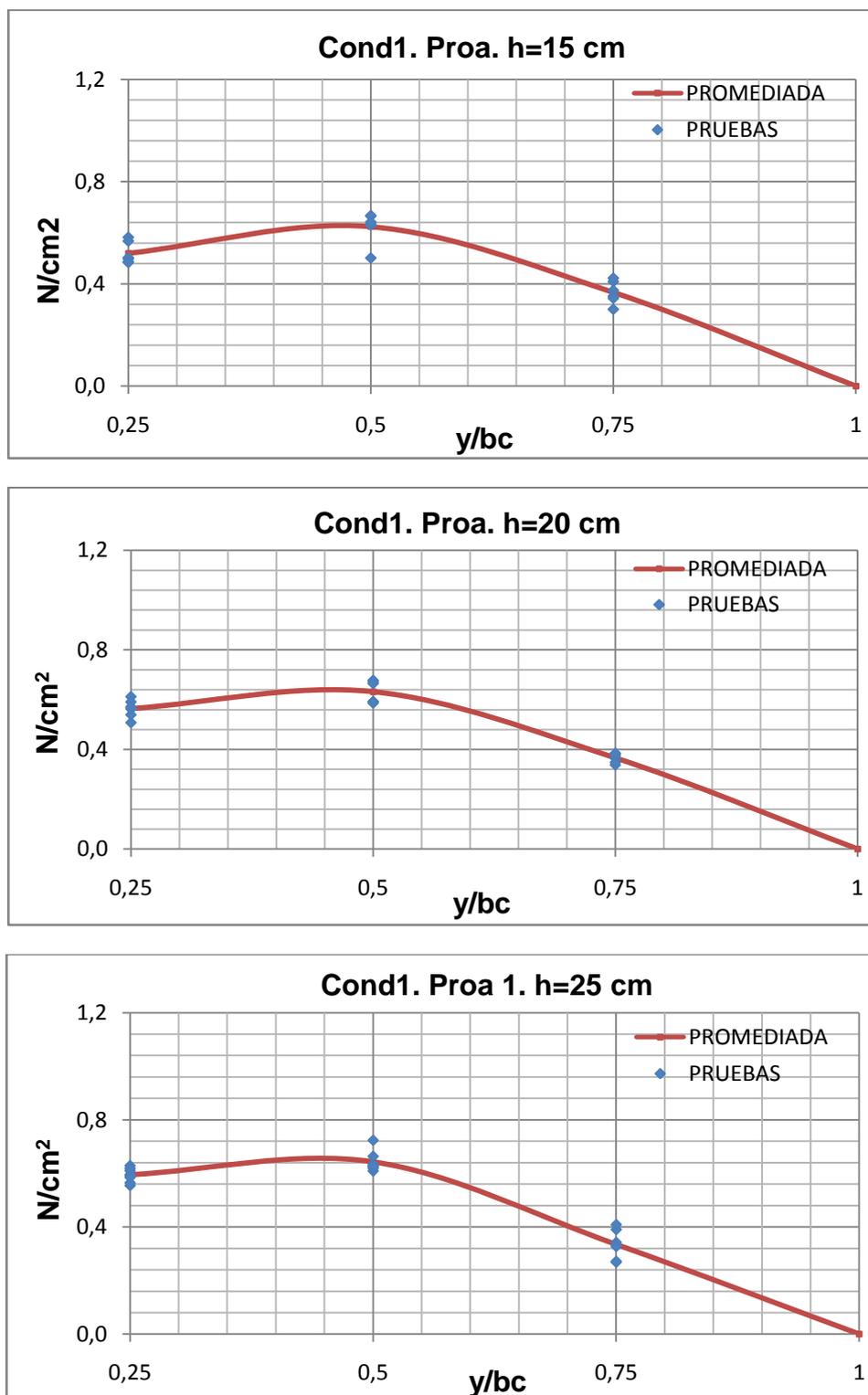


Figura 59. Presiones Experimentales. Condición Ligera. Posición Longitudinal 1. Alturas 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia

ANEXO C.

Curvas para interpolación de presión.

A continuación se presentan las curvas de Presión vs. aceleración vertical del centro de gravedad, con las cuales se obtuvieron los valores de presión en $b/2$ para el prototipo. Los datos de las siguientes graficas, se encuentran en la Tabla XIV. Se nota que la presión aumenta conforme aumenta la aceleración y son graficados respecto a las 3 alturas de caída registradas durante la pruebas.

Debido a la diferencia de valores registrados tanto en aceleración y presión entre condiciones y posiciones longitudinales, los datos se grafican con diferentes escalas.

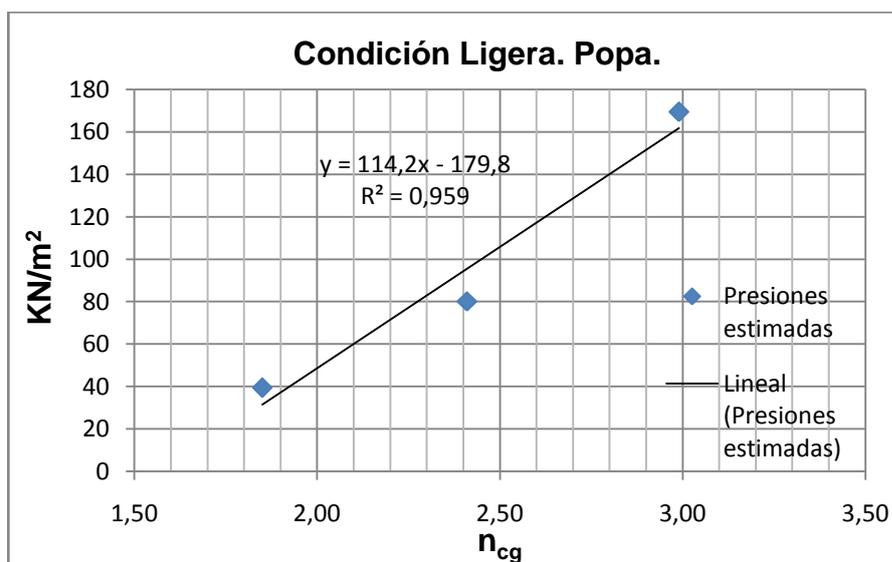


Figura 60. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición Ligera en popa. Fuente: Elaboración Propia

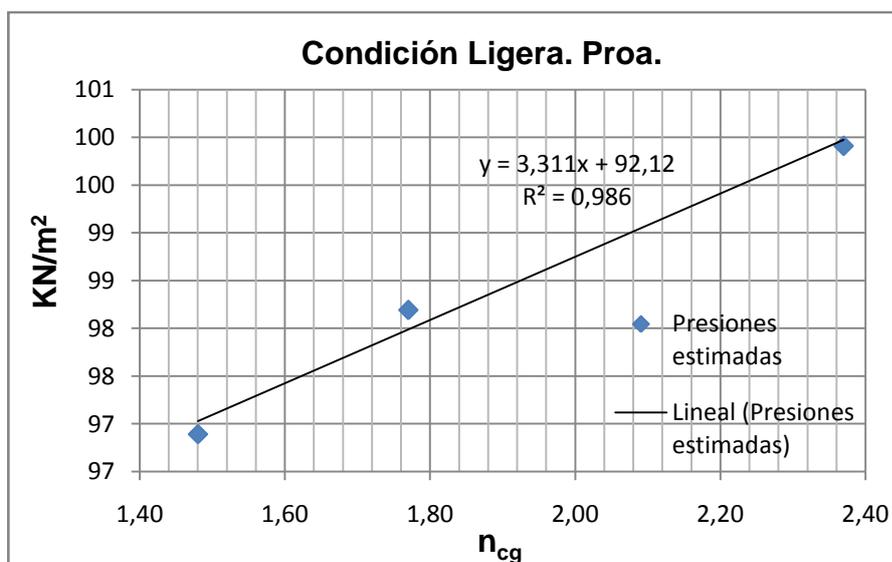
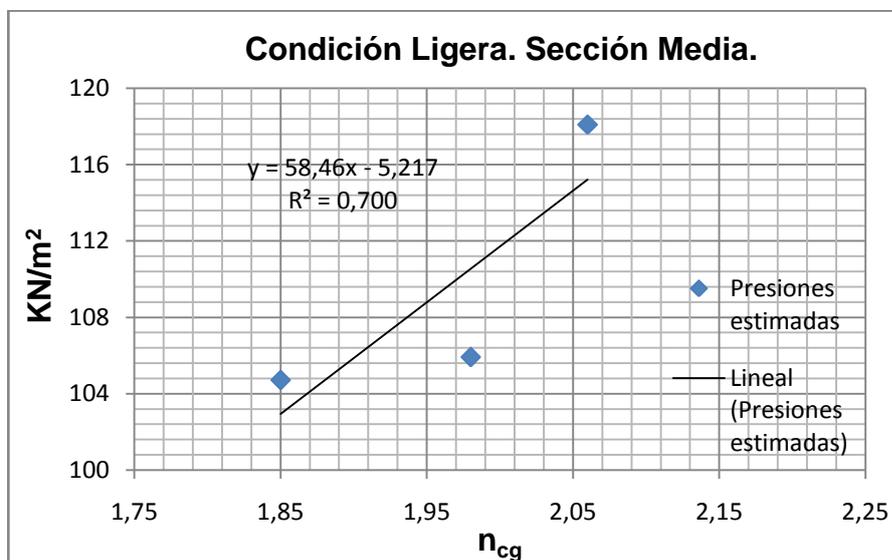


Figura 61. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición Ligera. Fuente: Elaboración Propia

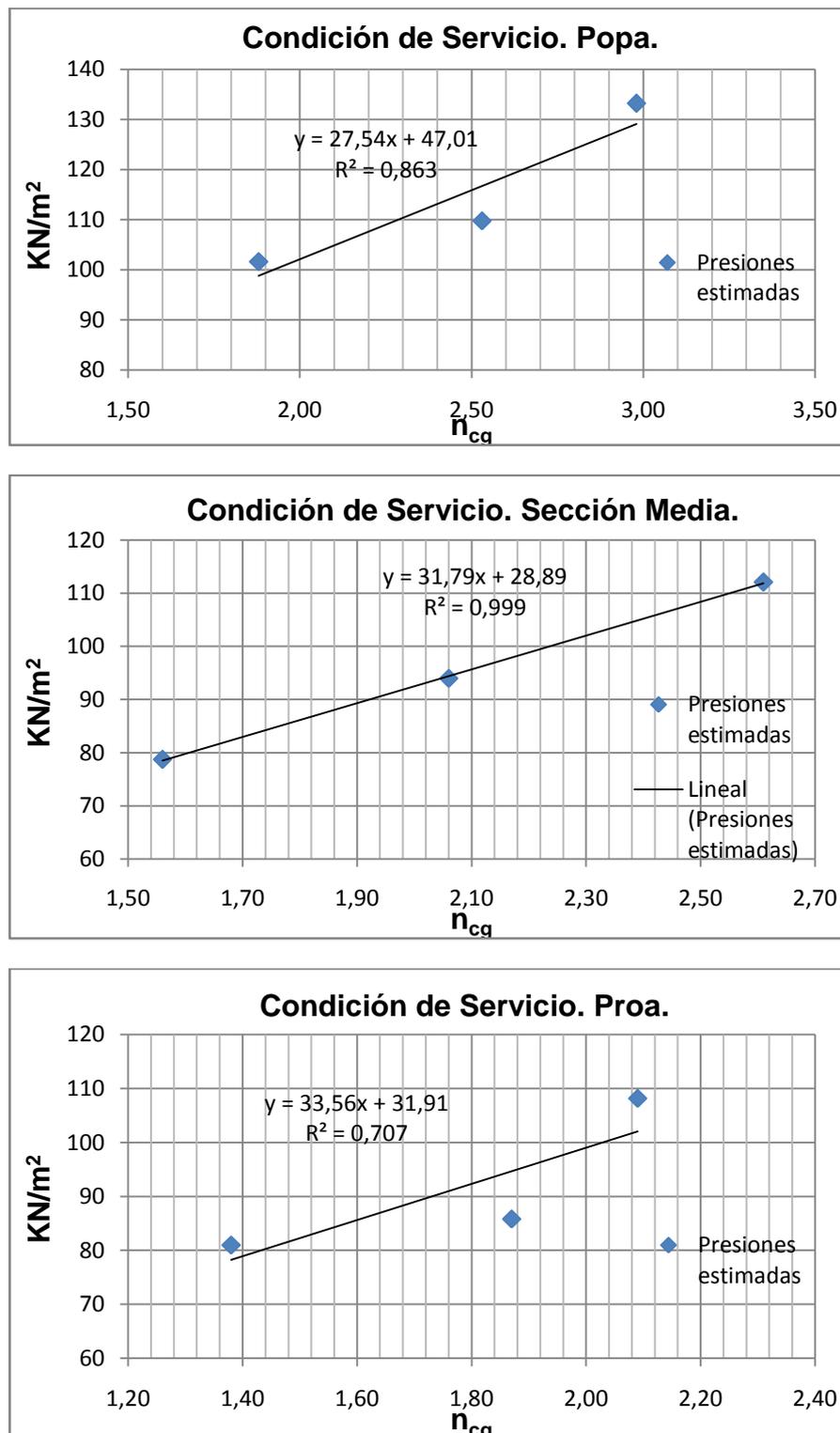


Figura 62. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición de Servicio. Fuente: Elaboración Propia

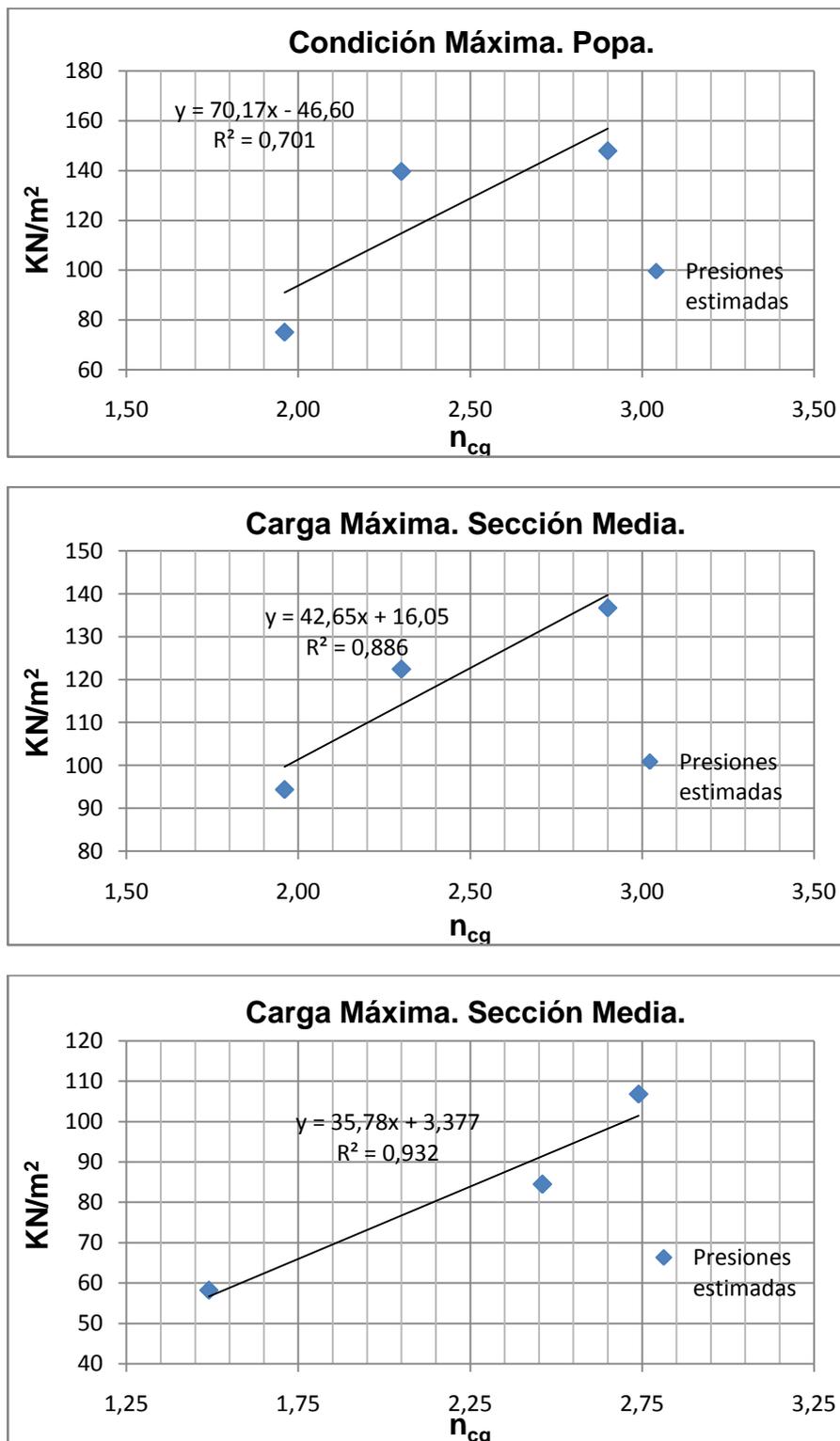


Figura 63. Presiones registradas Vs. aceleraciones verticales, Condición máxima. Fuente: Elaboración Propia

BIBLIOGRAFIA

- [1] Munro-Smith R., *"Notes and examples in Architecture"*. University of Liverpool, 1965.
- [2] Marín, José R., "Comparación de dos formulaciones para estimar la presión dinámica en el fondo de embarcaciones planeadoras", Segundas Jornadas Técnicas sobre Diseño y Producción, CINAVE, 2010.
- [3] Heller, S and Jasper, N, *"On the Structural Design of planning craft"*. Transacciones Royal Institution of Naval Architects, Vol. 103, 1960.
- [4] American Bureau of Shipping, "Guide for Building and Classing of high-speed Craft", Guidance Notes, ABS 2012.

- [5] Faltinsen, O. M., *"Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles"*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] Ochi, Margaret D. and Bonilla-Norat, Jose, *"Pressure-velocity relationship in impact of a ship model dropped onto water surface and in slamming waves"*. Naval Ship Research and Development Center, Washington D.C., 1970.
- [7] Lee, June and Wilson, Philip, "Experimental study of the hydro-impact of slamming in a modern racing sailboat", *Journal of Sailboat Technology*, SNAME, 2010.
- [8] Press, William, Flannery, Brian, Teukolsky, Saul, and Vetterling, William, *"Numerical Recipes"*. Cambridge University Press, 1989.
- [9] Streeter, Víctor, Wylie, B., and Bedford, W., *"Mecánicas de Fluídos"*. Santafé de Bogotá, 2000.