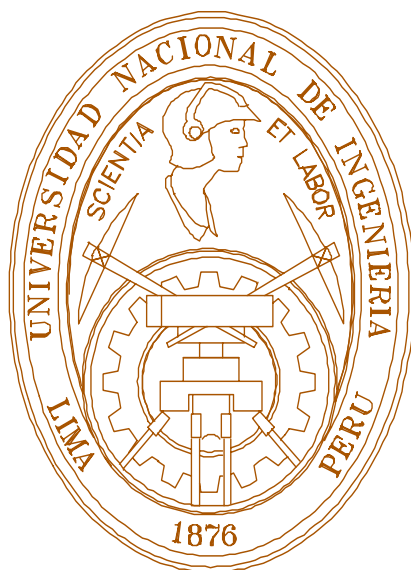


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS PANELES PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA RESISTENCIA AL AVANCE POR FORMACIÓN DE OLAS EN
EMBARCACIONES DE DESPLAZAMIENTO”**

TESIS

PARA OBTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO NAVAL

CESAR AUGUSTO SALHUA MORENO

PROMOCIÓN 2001-II

LIMA – PERU

2007

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida concedida.

A mis padres Rosa y Benigno, mis hermanos Rocio y Ricardo, mis abuelos Augusto y Raquel por todo su apoyo, comprensión, sacrificio y amor incondicional en todos los momentos de mi vida.

A mi esposa Sandra y a mi hijo Felipe Augusto por todo su amor, sin ellos no podría continuar avanzando.

Al profesor Ph.D Marcelo Neves por el apoyo brindado, de igual forma agradezco al profesor Ph.D. Carlos Levi por el apoyo durante todos los años de estudio en el Programa de Ingeniería Naval y Oceánica de la COPPE – UFRJ.

A mi grande amigo D.Sc. Lenin Valerio por su apoyo, consejos y amistad.

Al profesor Ingeniero Victor Acosta y a todos los profesores y amigos de la Escuela Profesional de Ingeniería Naval de la UNI - Perú, por el apoyo, confianza y amistad, agradecimientos especiales a los Ingenieros Jorge Ramírez y Wuilder Hernández.

A todos que directa e indirectamente contribuyeron para la realización de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Prólogo

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1	Generalidades	1
1.2	Resistencia al Avance	3
1.2.1	División de Fraude	4
1.2.1.1	Resistencia Friccional (R_{fo})	4
1.2.1.2	Resistencia Residual (R_r)	5
1.2.2	División de Hughes	5
1.2.2.1	Resistencia Viscosa (R_v)	5
1.2.2.2	Resistencia por formación de olas (R_w)	5
1.2.3	División adoptada en este trabajo de Tesis	6
1.2.3.1	Resistencia Viscosa (R_v)	7
1.2.3.2	Resistencia por Formación de Olas (R_w)	7
1.2.3.3	Resistencia adicional (R_A)	7
1.2.3.3.1	Resistencia de Apéndices (R_{ap})	7
1.2.3.3.2	Resistencia debido a la Rugosidad (R_{Rough})	8
1.2.3.3.3	Resistencia ofrecida por el aire (R_{Air})	8
1.3	Fenómeno de la formación de olas	8
1.3.1	Olas progresivas	10
1.3.2	Sistema de olas generado por el avance del navío	11

1.4	Revisión histórica de los métodos para determinar la Resistencia por Formación de Olas	16
-----	--	----

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1	Formulación del Problema	22
2.1.1	Sistema de Referencia	23
2.1.2	Condiciones de Contorno	24
2.1.2.1	Condición de impenetrabilidad	24
2.1.2.2	Condiciones de contorno de la superficie libre	25
2.1.2.2.1	Condición de Contorno Cinemática	25
2.1.2.2.2	Condición de Contorno Dinámica	25
2.1.2.3	Condición de Radiación	26
2.2	Método de los Paneles aplicado para la representación de flujos alrededor de cascos de embarcaciones	26
2.3	Linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre	28
2.3.1	Linealización de Neumann-Kelvin	31
2.3.1.1	Condición de Contorno Cinemática	31
2.3.1.2	Condición de Contorno Dinámica	31
2.3.1.3	Condición de contorno combinada de la superficie libre	31
2.3.2	Linealización de la superficie libre del Casco Doble	32
2.3.2.1	Potencial de Velocidades del Casco Doble (ϕ_0)	32
2.3.2.2	Potencial de Velocidades de Perturbación (ϕ_1)	33
2.3.2.2.1	Condición de Contorno Cinemática	34
2.3.2.2.2	Condición de Contorno Dinámica	34

2.3.2.2.3	Condición combinada de la superficie libre	34
2.4	Linealización de la condición de Contorno de Radiación	35
2.4.1	Elevación de la superficie libre	35
2.4.2	Primera derivada de la elevación de la superficie libre	35
2.5	Calculo de la Resistencia por Formación de Olas	36

CAPITULO 3

IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

3.1	Discretización de las superficies del dominio fluido	37
3.2	Discretización de la Tercera Identidad de Green	40
3.3	Representación del potencial de velocidades	40
3.4	Evaluación de los coeficientes de influencia	44
3.4.1	Coficiente de influencia Dipolo de Rankine	44
3.4.2	Coficiente de influencia Fuente de Rankine	45
3.5	Determinación de las velocidades	47
3.6	Contornos de las mallas de paneles	50
3.6.1	Condición de no curvatura o curvatura cero	51
3.7	Solución del problema linealizado	52
3.7.1	Solución utilizando a linealización de la superficie libre de Neumann-Kelvin	52
3.7.2	Solución utilizando a linealización de la superficie libre del Casco Doble	54
3.7.2.1	Potencial de velocidades base (φ_0)	54
3.7.2.2	Potencial de velocidades de perturbación (φ_1)	56

3.8	Determinación de la Resistencia por Formación de Olas	58
-----	---	----

CAPITULO 4

DISCRETIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DEL DOMINIO FLUIDO

4.1	Generalidades	61
4.2	Curvas B-Spline	62
4.2.1	Curvas B-splines cúbicas	64
4.2.1.1	Longitud de la curva B-spline cúbica	69
4.3	Discretización de cascos utilizando curvas B-spline cúbicas	70
4.3.1	Cascos discretizados	73
4.3.1.1	Casco Wigley	74
4.3.1.2	Casco Serie 60 $C_b = 0.6$	75
4.3.1.3	Casco catamarán de semi-desplazamiento	77
4.4	Discretización de la superficie libre alrededor del casco	79

CAPITULO 5

RESULTADOS NUMERICOS

5.1	Generalidades	83
5.2	Resultados para el flujo base	84
5.2.1	Esfera sumergida en presencia de flujo incidente	84
5.2.1.1	Potencial de velocidades (φ_0)	86
5.2.1.2	Distribución de presiones (C_p)	86
5.2.1.3	Elevación base (ζ_0)	87

5.2.2	Casco Wigley en presencia de flujo incidente	89
5.2.2.1	Distribución de presiones (C_p)	90
5.2.2.2	Elevación base (ζ_0)	91
5.3	Resultados para el flujo en presencia de superficie libre	91
5.3.1	Ensayo de Convergencia de las Mallas Utilizadas	91
5.3.1.1	Convergencia con la linealización de la superficie libre de Neuman-Kelvin	92
5.3.1.2	Convergencia con la linealización de la superficie libre del Casco Doble	93
5.3.2	Linealización de la superficie libre de Neuman-Kelvin	92
5.3.2.1	Esfera sumergida avanzando con velocidad de avance constante	93
5.3.2.2	Casco Wigley con velocidad de avance constante	96
5.3.2.3	Catamarán Wigley con velocidad de avance constante	99
5.3.3	Linealización de la superficie libre del Casco Doble	101
5.3.3.1	Casco Wigley con velocidad de avance constante	102
5.3.3.2	Casco Serie 60 $C_b = 0.6$ con velocidad de avance constante	104

CAPITULO 6

APLICACIÓN PRÁCTICA: MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN CATAMARÁN DE PASAJEROS

6.1	Generalidades	106
6.2	Descripción del problema	108
6.2.1	Alternativa 1	109
6.2.2	Alternativa 2	109

6.3	Características Generales de la embarcación	109
6.4	Características del Sistema de Propulsión Original	110
6.5	Determinación de la Resistencia al Avance	110
6.5.1	Resistencia Viscosa (R_v) y Adicional (R_a)	110
6.5.2	Resistencia por Formación de Olas (R_w)	110
6.5.3	Resistencia al Avance Total (R_T) y Potencia Efectiva (EHP)	112
6.6	Determinación del sistema de propulsión	113
6.6.1	Características de los nuevos motores a ser instalados	113
6.6.2	Alternativas del sistema de propulsión	114
6.6.6.1	Alternativa 1	114
6.6.6.2	Alternativa 2	116
	CONCLUSIONES	117
	BIBLIOGRAFIA	119
	APENDICE I	122
	LINEALIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DE LA SUPERFICIE LIBRE	
	APENDICE II	125
	APLICACIÓN DE LA SIMETRÍA GEOMÉTRICA Y DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CUERPO	
	APENDICE III	
	CURVAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR YANMAR 4LHA-DTP	131

APENDICE IV

GLOSARIO TÉCNICO DE LOS TÉRMINOS NAVALES RELACIONADOS CON ESTA TESIS	133
--	-----

PLANOS

Catamarán de Pasajeros “Amazonia”

MEMÓRIA DESCRIPTIVA	P06-003-CTAL-T/22-01
DISPOSICIÓN GENERAL	P06-003-CTAL-T/22-02
LÍNEAS DE FORMA	P06-003-CTAL-T/22-03
CURVAS HIDROSTÁTICAS	P06-003-CTAL-T/22-04
CURVAS CRUZADAS	P06-003-CTAL-T/22-05
ACTA DE ESTABILIDAD Y TRIMADO	P06-003-CTAL-T/22-06
ESTRUCTURA GENERAL	P06-003-CTAL-T/22-07
DISPOSICIÓN SALA DE MAQUINAS	P06-003-CTAL-T/22-08
SISTEMA DE GOBIERNO	P06-003-CTAL-T/22-09
SISTEMA DE PROPULSIÓN	P06-003-CTAL-T/22-10
PLANO DE LA HELICE	P06-003-CTAL-T/22-11
CURVA DE POTENCIA	P06-003-CTAL-T/22-12

PROLOGO

El objetivo de esta tesis es desarrollar e implementar un programa computacional capaz de obtener la Resistencia por Formación de Olas de navíos de desplazamiento a través del método de los paneles, de forma que sirva al proyectista naval como una herramienta de diseño.

Esta tesis se centra en la obtención de la componente de la Resistencia al Avance por Formación de Olas utilizando la teoría potencial. Como esta componente es predominante en navíos de desplazamiento y semi-desplazamiento y porque su magnitud es muy sensible a pequeñas variaciones geométricas del casco sumergido, el proceso de optimización de las formas de cascos de desplazamiento, desde el punto de vista de la disminución de la Resistencia al Avance Total, tiene por objetivo la reducción de esta componente y desde el punto de vista del proyecto se requiere una forma de poder cuantificarla adecuadamente.

La organización de la tesis por capítulo es mostrada a continuación:

Capítulo 1.- Introducción

Capítulo 2.- Son mostrados los fundamentos teóricos utilizados para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas mediante la representación del flujo de agua alrededor de navíos de desplazamiento con velocidad de avance constante en presencia de superficie libre. Es mostrada la ecuación de la Tercera Identidad de Green, la cual es la ecuación fundamental del Método de los Paneles. Es mostrada también la linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre a través de la linealización de Neumann-Kelvin y del Casco Doble.

Capítulo 3.- es mostrada la implementación numérica del programa para el calculo de la Resistencia por Formación de Olas denominado **SHIPWAVE**, basado en los conceptos teóricos descritos en el capítulo 2.

Capítulo 4.- es mostrada la teoría que describe el comportamiento de las curvas B-Spline cúbicas y su aplicación para la discretización de cascos, se muestra también los conceptos para el dimensionamiento de la superficie libre alrededor del casco.

Capítulo 5.- son mostrados los resultados numéricos para la Resistencia por Formación de Olas de una esfera sumergida, el casco Wigley, catamarán Wigley y Serie 60 $C_b = 0.6$ avanzando con velocidad constante en un amplio rango de numero de Froude obtenidos con el programa **SHIPWAVE** utilizando las dos linealizaciones de la superficie libre estudiadas en esta tesis. Los resultados numéricos obtenidos son comparados con resultados experimentales y teóricos obtenidos en la literatura especializada. Para poder evaluar la efectividad del método implementado, son mostrados los resultados obtenidos para el potencial base de una esfera y es realizada su comparación con resultados analíticos disponibles en la literatura especializada.

Capítulo 6.- es mostrada una aplicación del programa **SHIPWAVE** en la determinación de la Resistencia por Formación de Olas de un catamarán de pasajeros para poder realizar la modificación del sistema de propulsión de la embarcación.

CONCLUSIONES.- Son mostradas las conclusiones obtenidas con la realización de este trabajo.

APENDICE I .- Describe el proceso de linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre.

APENDICE II.- Describe la metodología utilizada para la disminución del número de incógnitas en la resolución de la Tercera Identidad de Green basado en la aplicación de la simetría geométrica y de flujo de agua alrededor de un cuerpo.

APENDICE III.- Son mostradas la curvas de desempeño del motor YANMAR 4LHA-DTP utilizadas en el capítulo 6.

APENDICE IV.- Es mostrado un glosario técnico de los términos navales en portugués e inglés.

PLANOS .- Son mostrados diversos planos de la embarcación utilizada en el capítulo 6.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La Resistencia al Avance permite obtener la velocidad de servicio y la potencia del motor a ser instalada en un navío y por tanto el consumo de combustible de este. La correcta evaluación de la Resistencia al Avance se traduce en un consumo de combustible competitivo y por tanto un control efectivo sobre los costos de operación del navío.

Tradicionalmente la determinación de la Resistencia al Avance se realiza considerando el navío avanzando en aguas tranquilas y el efecto de las olas del mar es colocado posteriormente como un margen de servicio.

La determinación de la Resistencia al Avance en aguas tranquilas requiere conocer la naturaleza de esta, existen varias componentes que la forman y varias formas de clasificar estas componentes, en este trabajo se adoptaron dos componentes principales que actúan sobre cascos de desplazamiento: la Resistencia Viscosa y la Resistencia por Formación de Olas. La primera componente contiene todos los efectos viscosos del fluido, lo cuales provocan fricción en el casco y desprendimiento de flujo debido a la forma de este, la segunda componente contiene la variación de presión provocada por el tren de olas formado por el avance del navío.

De entre las dos componentes mencionadas anteriormente, la mas sensible a variaciones debido a modificaciones de la forma del casco en embarcaciones de desplazamiento es la resistencia por formación de olas, podemos citar como ejemplo la

aplicación de bulbos de proa que puede reducir considerablemente la Resistencia por Formación de Olas, siendo que el bulbo equivale a menos del 1% el volumen del navío.

Entonces todo proceso de optimización de la Resistencia al Avance de embarcaciones de desplazamiento se concentra en la disminución de la componente de la Resistencia por Formación de Olas, pero para esto es necesario cuantificarla de forma adecuada.

Tradicionalmente pueden ser utilizados ensayos de remolque para determinar la Resistencia al Avance, pero esto es un proceso costoso y poco factible de ser aplicado en las primeras fases del proyecto. Pero con el avance de la capacidad de procesamiento de los computadores personales, fueron desarrollados herramientas basadas en la teoría potencial (esta describe adecuadamente el fenómeno de la formación de olas) para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas. Estas herramientas son ampliamente utilizadas actualmente, para la determinación de esta resistencia y la influencia del casco sobre esta, por muchos Ingenieros Navales de todo el mundo con singular éxito. Estas herramientas son aplicadas también para el diseño de bulbos, interferencia entre las olas de cascos, análisis del efecto de las olas formadas por el tren de olas sobre estructuras costeras o ribereñas, entre otras aplicaciones relacionadas con las olas formadas por el avance del navío.

En conclusión, es importante que el ingeniero naval cuente con una herramienta capaz de determinar la Resistencia por Formación de Olas. Fue esta necesidad que motivo este trabajo de tesis, donde se describe la teoría que gobierna esta resistencia, así como el uso del Método de los Paneles utilizado en la implementación de un programa computacional, la discretización de cascos a través de curvas B-Splines cúbicas y la

validación de los resultados al comparar los resultados obtenidos con “benchmarks” de la literatura especializada.

La metodología desarrollada en esta tesis es aplicada a casco de desplazamiento con relaciones de L/B altas, así como en catamaranes y cuerpos sumergidos como submarinos próximos de la superficie libre. No se considera el efecto de trimado generado por el avance sobre la superficie mojada de la embarcación, esta es considerada como constante.

A continuación, se presenta una descripción formal de las diversas componentes de la Resistencia al Avance, algunas definiciones básicas sobre el fenómeno de la formación de olas y las contribuciones realizadas por varios ingenieros y científicos navales para su estudio y determinación.

1.2 Resistencia al Avance

Antes de continuar directamente con el foco de este trabajo de tesis, es importante conocer las componentes principales de la Resistencia al Avance y sus diferentes clasificaciones, las cuales fueron elaboradas en base a observaciones y mediante la experimentación de modelos en escala reducida.

1.2.1 División de Froude

En 1864, William Froude propuso que la Resistencia al Avance de los navíos se constituía de dos partes aisladas e independientes: Esta división fue utilizada por Froude para poder extrapolar los resultados de los ensayos de remolque en modelos de escala reducida a los navíos prototipos. Para poder sistematizar los resultados obtenidos de los ensayos, Froude adimensionalizo la resistencia y la velocidad a

través del coeficiente de resistencia al avance (C_T) y el número de Froude ($F_n = U/\sqrt{gL}$).

$$R_t = R_{fo} + R_r \quad 1.1$$

$$C_t = C R_{fo} + R_r \quad 1.2$$

1.2.1.1 Resistencia Friccional (Rfo)

Asociada a la resistencia de una placa plana equivalente, de la misma longitud o eslora e superficie mojada del navío. Esta componente puede ser obtenida a través de la formulación para la resistencia friccional de la ITTC de 1957 mostrada a continuación:

$$C_{fo} = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad 1.3$$

$$R_{fo} = \left(\frac{1}{2} \rho S U^2 \right) C_{fo} \quad 1.4$$

Donde:

S es el área del casco sumergido.

Rn es el número de Reynolds.

1.2.1.2 Resistencia Residual (Rr)

Es la diferencia entre la Resistencia Total y la Resistencia Friccional, a la cual Froude atribuyo contener los efectos asociados a la formación de olas.

1.2.2 División de Hughes

En 1954 Hughes propuso la división de la resistencia al avance como mostrado en la siguiente ecuación:

$$R_t = R_v + R_w = R_{fo}(1+k) + R_w \quad 1.5$$

1.2.2.1 Resistencia Viscosa (Rv)

Contiene los efectos viscosos asociados a la fricción de una placa plana (R_{fo}) y a la formación / desprendimiento de la capa límite debido a la forma del casco sumergido ($k R_{fo}$). La fórmula propuesta para la obtención de la resistencia friccional de una placa es la siguiente:

$$C_{fo} = \frac{0.066}{(\log_{10} R_n - 2.03)^2} \quad 1.6$$

$$R_{fo} = \left(\frac{1}{2} \rho S U^2 \right) C_{fo} \quad 1.7$$

1.2.2.2 Resistencia por Formación de Olas (Rw)

Es la componente asociada a la variación de presiones provocada por la formación del tren de olas en la superficie libre por el avance del navío.

1.2.3 División adoptada en este trabajo de Tesis

Existen otras divisiones de la Resistencia al Avance, estas pueden ser encontradas en el libro de Harvald (1983), básicamente las diversas divisiones de la resistencia al avance clasifican las partes de la resistencia al avance del casco sumergido en dos, las componentes de origen viscoso y las componentes

relacionadas a formación de olas. Pero existen otros tipos de resistencias que deben ser incluidas en el cálculo de la Resistencia al Avance, como el efecto de los apéndices, el viento, las olas del mar y la rugosidad del casco del navío. En este tema de tesis, la división adoptada para representar las diversas componentes de la Resistencia al Avance Total es similar a la división de Hughes, pero con la diferencia que se usa la curva de la resistencia friccional de la ITTC 1957.

La división de la Resistencia al Avance Total es mostrada en la siguiente ecuación:

$$R_T = R_V + R_W + R_A \quad 1.8$$

Donde:

R_V es la Resistencia Viscosa.

R_W es la Resistencia por Formación de Olas.

R_A es la Resistencia Adicional.

La descripción de las componentes mostradas en la ecuación (1.8) es mostrada a continuación:

1.2.3.1 Resistencia Viscosa (R_V)

Lleva en cuenta los efectos viscosos provocados por el rozamiento, desprendimiento y formación de vórtices del flujo de agua cuando pasa alrededor del navío. Estos efectos se concentran en una región junto al casco conocida como capa límite. En el caso de catamaranes pueden considerarse que no existe interferencia viscosa entre las capas límites de los cascos.

Para su determinación es considerado el coeficiente $k = 0$ debido a la esbeltez del casco y la Resistencia Friccional es obtenida con la formula de la ITTC 1957, ecuación (1.3) y (1.4).

1.2.3.2 Resistencia por Formación de Olas (R_w)

La metodología desarrollada en esta tesis e implementada en el programa computacional **SHIPWAVE** es utilizada para determinar esta componente.

$$R_w = \left(\frac{1}{2} \rho S U^2 \right) C_w \quad 1.9$$

1.2.3.3 Resistencia adicional (R_A)

1.2.3.3.1 Resistencia de Apéndices (R_{ap})

Es utilizada la siguiente formulación para determinar la resistencia friccional debido a los apéndices.

$$R_A = \left(\frac{1}{2} \rho S_{ap} U^2 \right) C_{fo} \quad 1.10$$

1.2.3.3.2 Resistencia debido a la Rugosidad (R_{Rough})

Para considerar la rugosidad de los cascos la siguiente formulación es utilizada:

$$R_{Rough} = \left(105 \left(\frac{ks}{L_{wl}} \right)^{1/3} - 0.64 \right) \times 10^{-3} * \left(\frac{1}{2} \rho S_T U^2 \right) \quad 1.11$$

Donde:

k_s es igual a $150e-6m$

L_{wl} es la eslora de flotación

1.2.3.3 Resistencia ofrecida por el aire (R_{Air})

Para considerar la resistencia que ofrece el viento al avance del navío la siguiente formula mostrada en Harvald (1983) es utilizada.

$$R_{Air} = \left(\frac{1}{2} \rho S U^2 \right) 0.001 \left(\frac{A_{VT}}{S} \right) \quad 1.12$$

Donde:

A_{VT} es el área transversal proyectada de la obra muerta.

1.3 Fenómeno de la formación de olas

Las olas son el movimiento ondulatorio de las partículas del medio fluido. Este movimiento es el resultado de la perturbación del equilibrio de fuerzas en el líquido causado por el cambio de presión debido a fuerzas externas. Se debe enfatizar que las olas no son una transferencia de masa del fluido, estas son una propagación del movimiento, es decir solo transmiten energía a través del agua. En este sentido las olas son semejantes a las ondas sísmicas, donde también se traslada la energía, pero no el suelo mismo. Existen diversos tipos de olas, una clasificación para los principales tipos de olas bastante utilizada es la siguiente:

- a) **Olas submarinas.-** son las olas provocadas por la variación de presión causada por algún sismo submarino, erupción volcánica submarina, etc. Su

existencia se manifiesta únicamente en la profundidad donde son formadas como un cambio de presión.

b) Olas capilares.- son las olas más pequeñas que aparecen en la superficie del agua como un disturbio de la tensión superficial. Una de las principales características de estas olas es que su velocidad disminuye con el aumento de su longitud, que es lo contrario en el caso de las olas de traslación o progresivas. Estas olas no influyen en la resistencia al avance de los navíos, pero pueden ser de gran influencia en el caso de los modelos en escala reducida.

c) Olas progresivas o de traslación.- estas olas aparecen en la superficie del agua como consecuencia de la diferencia de la presión local originada por diversas causas externas, como por ejemplo: el viento, la caída de un cuerpo, el avance de un navío, etc. Las fuerzas de gravedad rigen este tipo de olas, estas son periódicas en el tiempo y espacio; las partículas en la superficie experimentan una oscilación en torno del nivel que representa la superficie tranquila del agua.

El tipo de olas que interesan a los ingenieros navales en la práctica son las olas progresivas, por que estas influyen de manera significativa sobre las condiciones marineras de cualquier navío de superficie, ya sea en sus movimientos, maniobrabilidad o resistencia al avance. Las olas formadas por el avance del navío requieren que este suministre energía al medio fluido, esta energía gasta en la formación de olas se traduce en Resistencia al Avance. La disminución del gasto de energía en la formación de olas requiere conocer la

naturaleza de estas y medios para poder representarla. A continuación se describe la teoría más utilizada en el estudio de la formación de olas de progresivas.

1.3.1 Olas progresivas

La poca influencia de la viscosidad en la formación de este tipo de olas, viabiliza el uso de la teoría potencial. La descripción de este fenómeno necesita definir el comportamiento de las olas en pocos parámetros, de esta forma la elevación de la superficie libre es representada por la ecuación (1.13).

$$\zeta = \zeta_0 \cos(kx - \omega t) \quad 1.13$$

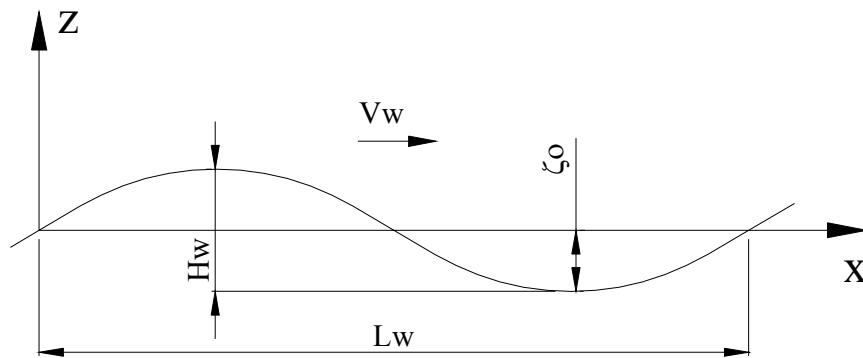


Figura 1.2 – Ola progresiva avanzando

Donde:

L_w es la longitud de la ola.

T es el periodo de la ola.

V_w es la velocidad de la ola.

H_w es la altura de ola.

ζ_w es la amplitud de la ola.

f es la frecuencia de ola.

k es el numero de ola ($k = 2\pi/L_w$)

Considerando que la ola se desplaza en regiones lo suficientemente profundas de forma que los efectos del fondo marino sobre su comportamiento son despreciables, entonces la longitud de estas olas es determinada a través de la siguiente ecuación:

$$L_w = \frac{gT^2}{2\pi} \quad 1.14$$

1.3.2 Sistema de olas generado por el avance del navío

Cuando un navío avanza, perturba la superficie libre y genera un tren de olas que avanza a igual velocidad. Este tren de olas provoca una variación de presiones sobre el casco que origina la Resistencia por Formación de Olas. En 1887, Lord Kelvin estudio teóricamente las características de la formación del tren de olas a través de un modelo matemático simplificado, él consideró una fuente sumergida avanzando con velocidad constante. El avance de esta fuente genera un tren de olas formado por un sistema de olas divergentes y un sistema de olas transversales. A través de observaciones experimentales y después confirmado teóricamente, Kelvin determino que el tren de olas presenta un padrón regular, este se encuentra contenido dentro de la región limitada por el rayo con semi-ángulo de $19^\circ 28'$ formado por la intersección de las amplitudes máximas de las olas divergentes y el punto de presión provocado por la fuente avanzando y por el ángulo 37.5° que gobierna el comportamiento de las olas transversales, ver figura (1.3).

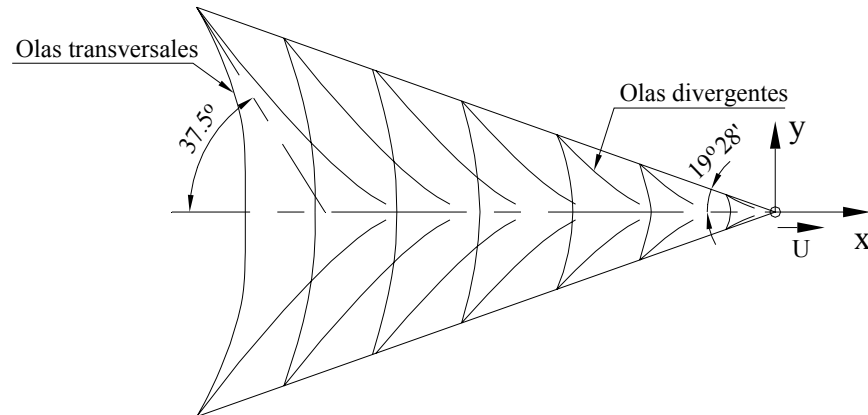


Figura 1.3 – Sistema de olas generado por el avance de una fuente sumergida

La región delimitada por el avance de la fuente es la misma que se presenta en el casco de un navío avanzando, teóricamente el navío puede ser considerado como compuesto por varias fuentes y sumideros de presión colocados en toda la superficie del casco. La amplitud y longitud de las olas transversales y divergentes aumentan con la velocidad de avance, el número de Froude es utilizado para representar la velocidad del navío.

$$Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad 1.15$$

Donde:

U velocidad de avance del navío.

g aceleración de la gravedad.

L es la eslora de flotación del navío.

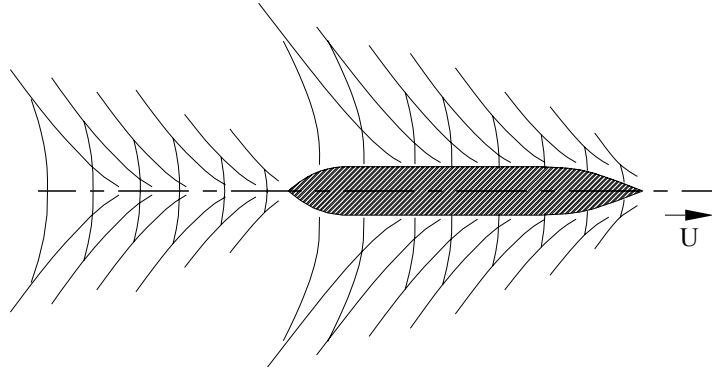


Figura 1.4 – Sistema de olas generado por el avance de un navío

De la figura (1.4) puede observarse que el sistema de olas generado por el avance de un navío es el resultante entre el sistema de olas de proa y popa:

- **Sistema de olas de proa.-** este se caracteriza por presentar siempre una cresta en la región de la proa.
- **Sistema de olas de popa.-** este se caracteriza por presentar siempre un valle en la región de aplicación de la popa.

La interferencia entre ambos sistemas de olas puede ser de dos tipos:

- **Interferencia positiva.-** es cuando dos o más olas que avanzan en la misma dirección se encuentran y sus amplitudes se suman, la amplitud de la ola resultante es esta suma.

- **Interferencia negativa.**- es cuando dos o más olas que avanzan en la misma dirección se encuentran y sus amplitudes se restan, la amplitud de la ola resultante es esta diferencia.

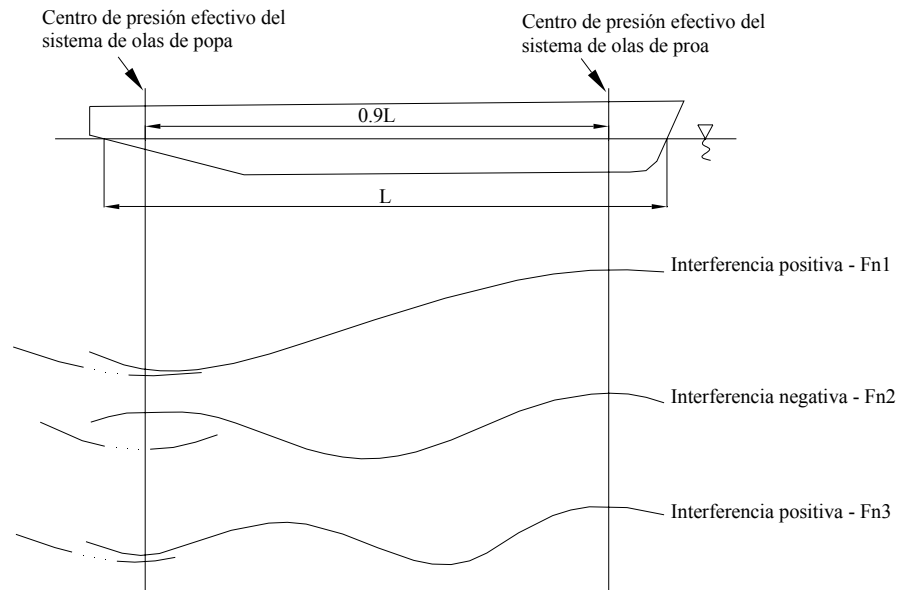


Figura 1.5 – Interferencia de los sistemas de olas de proa y

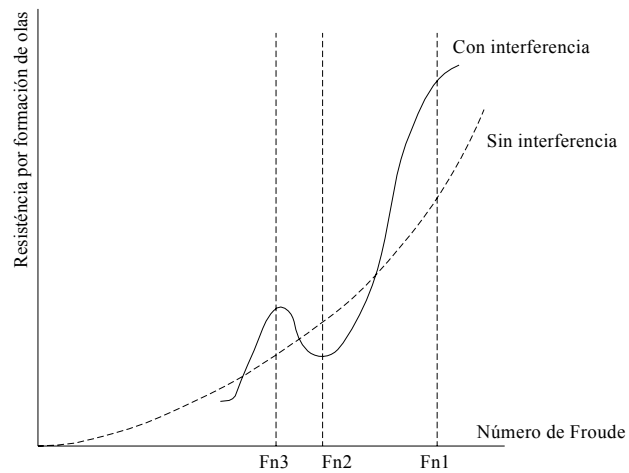


Figura 1.6 – Crestas y valles en la Resistencia por Formación de Olas

Las fi

producirse, estos son:

- **Número de Froude F_n3 .**- a esta velocidad el sistema de olas de proa presenta un valle en la región de la popa, el cual interfiere positivamente con el valle del sistema de olas de popa, provocando una resultante con un valle igual a la suma de los valles de ambos sistemas. Esto provoca un aumento en la caída de presión, provocando que la diferencia de presiones en el casco aumente y por tanto provoca un aumento en la curva de la resistencia por formación de olas, figura (1.5) y (1.6).
- **Número de Froude F_n2 .**- a esta velocidad el sistema de olas de proa presenta una cresta en la región de la popa, la cual interfiere negativamente con el valle del sistema de olas de popa, provocando una resultante con un valle igual a la diferencia del valle y cresta de ambos sistemas. Esto disminuye la caída de presión, provocando que la diferencia de presiones en el casco disminuya y causando una disminución en la curva de resistencia por formación de olas, figura (1.5) y (1.6).

Para el caso presentado en la figura (1.5) y (1.6), se puede observar que la longitud de la ola de proa es igual a la eslora del navío. Esto representa un caso crítico en los navíos de desplazamiento, porque para mayores velocidades el sistema de olas de proa presentara siempre un valle en la región de la popa, provocando así un aumento en la Resistencia por Formación de Olas. Utilizando las ecuaciones (1.15) y (1.16), puede obtenerse el número de Froude crítico:

$$Fn = \frac{V_w}{\sqrt{gL_w}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = 0.398 \quad 1.16$$

Donde:

V_w es la velocidad de la ola.

L_w es la longitud de la ola.

- **Número de Froude Fn_1 .**- esta velocidad es superior a la velocidad crítica, por tanto el sistema de olas de proa presenta una eslora mayor a la eslora del navío, figura (1.5), por lo cual puede observarse que en la región de la popa se presenta un valle que interfiere positivamente en la caída de presión de la popa y por tanto provoca un aumento significativo en la diferencia de presiones del casco y un aumento en la curva de resistencia al avance, figura (1.5) y (1.6).

1.4 Revisión histórica de los métodos para determinar la resistencia por formación de olas

William Froude (1810-1879) fue el primero en realizar estudios sistemáticos de la Resistencia al Avance, el método propuesto por él es totalmente empírico, orientado para ensayos con modelos en escala reducida. Él considero que la Resistencia al Avance esta formada por una Resistencia Friccional equivalente al de una placa plana de la misma área y eslora del modelo a ensayar y otra resistencia conocida como residual de naturaleza desconocida para él, donde supuso se encontraba la Resistencia por Formación de Olas.

En 1887, Lord Kelvin dio el primer paso para el estudio teórico de las olas generadas por el navío, al establecer un procedimiento teórico para la generación del tren de olas producido por un punto de presión en presencia de superficie libre. Este estudio consistió en la derivación de la formulación del campo de velocidades del flujo de una singularidad tipo fuente avanzando en trayectoria rectilínea con velocidad constante, en presencia de superficie libre. Esta solución contiene términos que satisfacen las condiciones de contorno de la superficie libre y de radiación y genera un sistema de olas conocido como sistema de olas de Kelvin.

En 1898, Mitchell fue el primer investigador en establecer una relación analítica entre la Resistencia por Formación de Olas y la geometría de cascos finos. Mitchell desarrollo una teoría capaz de describir el flujo de agua alrededor de un casco fino en presencia de superficie libre y determinar su Resistencia por Formación de Olas.

Los estudios de Froude, Kelvin y Mitchell marcaron el inicio de la metodología experimental y teórica de la determinación de la Resistencia por Formación de Olas. Los conceptos básicos del trabajo de Froude son bastante utilizados actualmente en los ensayos de modelo en canal de remolque y los trabajos de Kelvin y Mitchell sirvieron de base para las formulaciones analíticas para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas. Este trabajo de tesis se desarrolla dentro de la metodología teórica, por lo tanto solamente se profundizara en la historia de esta metodología.

En 1925, Thomas Havelock desarrollo una expresión matemática más generalizada que la de Mitchell, con la intención de utilizarla en navíos llenos, esta es basada en el

método de la función de Green. Posteriormente, Havelock (1935 a–b) mostró que la Resistencia por Formación de Olas puede ser evaluada mediante el cálculo de la energía contenida en el sistema de olas de Kelvin a popa del navío como alternativa a la integración de presiones en el casco sumergido.

En 1926, Wigley validó la fórmula de Mitchell sistemáticamente a través de ensayos experimentales con un navío fino de forma parabólica, que es conocido actualmente como casco Wigley y es un “benchmark” internacional para la comparación de resultados teóricos o numéricos. Posteriormente en 1948 y 1949, Wigley ensayó navíos con formas finas y llenas con el objetivo de determinar las limitaciones y aplicabilidad del trabajo de Mitchell.

Una de las dificultades presentes en los métodos teóricos para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas son las no linealidades de las ecuaciones que describen el comportamiento de la superficie libre. En 1957, Peter e Stoker utilizaron el método de las perturbaciones para poder linealizar las ecuaciones de la superficie libre considerando la esbeltez de los navíos.

Hasta este punto, los métodos para la evaluación analítica adoptaban muchas simplificaciones con el objetivo de tornar el algoritmo numérico más tratable, pero para el caso de navíos llenos, no era posible aprovechar la linealización de la superficie libre debido a la esbeltez de los cuerpos. En 1968, Ogilvie demostró que el problema puede ser adecuadamente linealizado cuando se analiza navíos llenos considerando que estos avanzan a bajos número de Froude, dando comienzo así a la “teoría del navío lento”.

El método de los elementos de contorno es la base para la mayoría de los algoritmos computacionales para la solución del problema de la Resistencia por Formación de Olas linealizado. Estos esquemas de solución pueden ser clasificados en dos categorías, basados en el tipo de singularidad a utilizar.

La primera categoría consiste en la utilización de la fuente de Kelvin como la singularidad a utilizar. La formulación original data de 1972, esta es debida a Brard y es construida utilizando la linealización de la superficie libre de Neumann-Kelvin. Estos esquemas discretizan únicamente la superficie del casco sumergido de la superficie libre y su formulación contiene términos que satisfacen automáticamente la condición de la superficie libre y de radiación. Estos esquemas presentan inconvenientes importantes como la dificultad de introducir términos que involucren la velocidad de avance y términos de orden superior. El éxito de estos esquemas numéricos depende de la evaluación correcta y eficiente del potencial de la fuente de Kelvin así como la solución apropiada de la llamada integral de línea, trabajos importantes en esta categoría fueron realizados en 1987 por Newman, Doctors y Beck, y en 1989 por Clarisse.

La segunda categoría de esquemas consiste en la utilización de la fuente de Rankine o fuente simple como singularidad a ser distribuida. Para utilizar estos esquemas, se necesita discretizar el casco sumergido y la superficie libre alrededor, las condiciones de contorno de la superficie libre y radiación son colocadas explícitamente. Para poder obtener resultados adecuados con estos esquemas se requiere grandes recursos computacionales, debido a la gran cantidad de variables producto de las discretizaciones de la superficie del casco y superficie libre. Este método permite la inclusión de los términos que involucran el

avance del navío y términos de orden superior más fácilmente que los esquemas de la primera categoría. El éxito de la solución depende del número de paneles a ser utilizados en la discretización de las superficies. Gracias al avance de la capacidad de procesamiento de los computadores estos esquemas se volvieron ampliamente utilizados, esta tesis trata sobre el estudio e implementación de un método de los paneles basado en la fuente de Rankine, a continuación se describe los avances más representativos sobre estos esquemas en las últimas décadas.

Los investigadores Hess & Smith (1962), con el incremento de la capacidad de los computadores personales, desarrollaron un método para la determinación del flujo de agua alrededor de cuerpos sumergidos con velocidad de avance. Este método se basa en la discretización de la geometría del casco utilizando paneles planos, con la colocación de singularidades tipo fuente de Rankine en el centroide de cada panel y el uso de la Tercera Identidad de Green para obtener la intensidad de cada singularidad.

El trabajo pionero de Dawson (1977) aplicó la “teoría del navío lento” para poder analizar navíos llenos, para esto utilizó la fuente de Rankine como función de Green en la definición de la Tercera Identidad de Green y las distribuyó en la superficie del casco y también en la superficie libre considerada. En su estrategia de solución separó el potencial de velocidades en dos partes: potencial de base y potencial de perturbación. Dawson utilizó la solución del casco doble como potencial base para linealizar las condiciones de contorno de la superficie libre e impuso las condiciones de radiación a través de diferencias finitas. Un trabajo con características similares fue propuesto por Gadd (1976).

Los trabajos de Jensen (1990) y Raven (1996) extendieron el método de Dawson para resolver la Resistencia por Formación de Olas en la forma exacta, es decir sin linealizaciones de la superficie libre.

El método de Dawson presenta un excesivo amortiguamiento numérico, reportado por muchos investigadores, que hace que las olas generadas sean más cortas de lo que deberían ser, debido a la utilización de diferencias finitas del tipo “up wind” para representar los términos de la superficie libre y la condición de radiación.

Un método libre de amortiguamiento numérico fue propuesto por Sclavounos & Nakos (1998) para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas, para esto, utilizaron superficies B-Splines bi-cuadráticas para la representación de los términos de la superficie libre y las ecuaciones de la superficie libre fueron linealizadas utilizando el flujo alrededor del casco doble. La condición de radiación es colocada en la parte más a proa de la superficie libre y no con diferencias finitas, con lo que consiguieron padrones de olas más realistas. El tema de esta tesis se desarrolla utilizando una metodología similar a la desarrollada por Sclavounos & Nakos (1998).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 **Formulación del Problema**

Debido a que los efectos viscosos del agua de mar influyen poco en el comportamiento de las olas marinas, puede asumirse que el agua es un fluido ideal e incompresible, entonces se puede considerar al flujo de agua como irrotacional. De esta forma la teoría potencial puede ser utilizada para estudiar el comportamiento de las olas marinas, es decir el flujo de agua puede ser representado a través de una función matemática conocida como potencial de velocidades.

Matemáticamente, la ecuación que gobierna el comportamiento de los flujos irrotacionales es la ecuación de la continuidad expresada a través de la ecuación de Laplace, como mostrado a seguir:

$$\nabla^2\Phi = 0 \qquad 2.1$$

Donde :

Φ es el potencial de velocidades total que representa el comportamiento del flujo de agua alrededor del navío.

∇^2 es el operador Laplaciano.

El potencial de velocidades total Φ representa la formación del tren de olas mientras el navío avanza. Para tratar el problema matemáticamente de una forma simplificada, puede asumirse que el navío está en reposo y sobre él incide un flujo de agua, teóricamente esto produce los mismos efectos que si el navío estuviera avanzando.

Entonces el potencial total puede ser dividido en un potencial incidente ($-Ux$) y un potencial que representa solamente el tren de olas originado por el navío, este potencial es conocido como potencial permanente (ϕ_s), porque para una determinada velocidad el tren de olas permanece constante o permanente.

$$\Phi = -Ux + \phi_s \quad 2.2$$

Se puede aplicar la ecuación de Laplace o continuidad a la separación del potencial de velocidades, ecuación (2.2). De esta forma puede establecerse una ecuación que gobierna únicamente el fenómeno de la formación de olas, ver la ecuación a seguir:

$$\nabla^2 \phi_s = 0 \quad 2.3$$

La ecuación de Laplace, ecuación (2.3), es aplicada sobre todo el dominio fluido considerado, el cual es formado por la superficie del casco sumergido y la superficie libre alrededor del casco, ver figura 2.1.

2.1.1 Sistema de referencia

Como el navío es considerado en reposo, el origen del sistema de referencia será colocado en la intersección de la línea centro del navío con el plano $z = 0$. Sobre este sistema de referencia la ecuación de la continuidad, ecuación 2.3, es expresada.

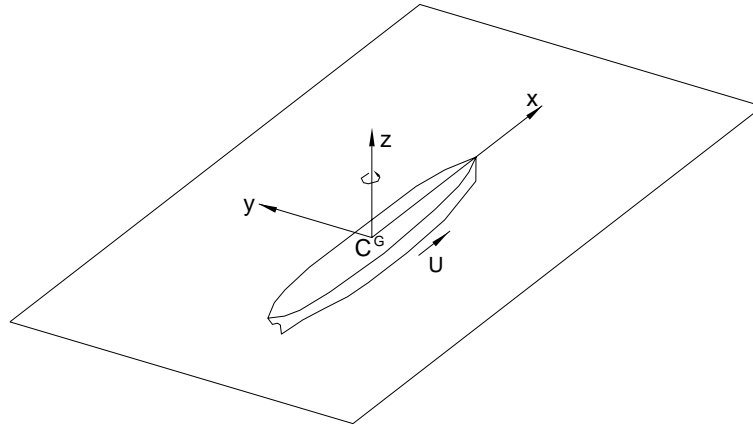


Fig. 2.1 .- Sistema de referencia fijo en el navío, $C_{x,y,z}$

2.1.2 Condiciones de contorno

La ecuación que gobierna el fenómeno de la formación de olas en la superficie libre debido al avance del navío es una ecuación diferencial, para poder ser resuelta necesita de condiciones de contorno. En este caso las condiciones de contorno representan diversos aspectos que gobiernan el fenómeno de la formación de olas, estos son mostrados a seguir:

2.1.2.1 Condición de impenetrabilidad

Esta condición de contorno es aplicada para garantizar que el flujo de agua incidente no penetre la superficie del casco.

$$\nabla\phi_S \cdot \vec{n} = \vec{U} \cdot \vec{n} \quad , \text{ en } S_B \quad 2.4$$

Donde :

\vec{U} es el vector de la velocidad del flujo incidente

S_B es la superficie mojada del casco.

\vec{n} es el vector normal a la superficie del navío

$\nabla\phi_S$ es el vector de velocidad del flujo permanente

2.1.2.2 Condiciones de contorno de la superficie libre

La superficie libre esta formada por la interfase entre los medios fluidos agua y aire, cualquier movimiento de la superficie libre afecta ambos medios. La igualdad de velocidades en la superficie libre debe ser garantizada en ambos fluidos, así como la presión atmosférica que actúa sobre esta. Las condiciones que se aplican sobre la superficie libre son las siguientes:

2.1.2.2.1 Condición de Contorno Cinemática

Esta condición garantiza la igualdad de las velocidades de los medios fluidos en la interfase o superficie libre.

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\phi_S) \cdot \nabla \right] \zeta = \frac{\partial\phi_S}{\partial z} \quad \text{en } z = \zeta \quad 2.5$$

2.1.2.2.2 Condición de Contorno Dinámica

Aplicando la ecuación de Bernoulli se garante que la presión en la superficie libre sea igual a la presión atmosférica

$$(P_{\text{Superficie Libre}} = P_{\text{atm}}).$$

$$P_{\text{atm}} + \rho g z + \rho \frac{|\nabla\Phi|^2}{2} + \rho \frac{\partial\Phi}{\partial t} = P_{\text{atm}}, \text{ en } z = \zeta \quad 2.6$$

Expresando la ecuación 2.6 en función del potencial permanente:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] \phi_s + \frac{|\nabla\phi_s|^2}{2} + g\zeta = 0 \text{ en } z = \zeta \quad 2.7$$

2.1.2.3 Condición de radiación

El tren de olas formado por el avance del navío se concentra en una región determinada y no en la totalidad de la superficie libre, como visto en el capítulo 1, este efecto es impuesto a través de la condición de radiación. Matemáticamente esta condición puede ser expresada con la siguiente ecuación, Newman (1964).

$$\nabla\phi_s \rightarrow 0 \text{ en el infinito} \quad 2.8$$

2.2 Método de los Paneles aplicado para la representación de flujos alrededor de cascos de embarcaciones

La resolución del problema formulado anteriormente es gobernado por la ecuación de Laplace y sus condiciones de contorno, la solución de este problema se basa en la solución de una ecuación diferencial con sus condiciones de contorno. Para esto, el esquema de solución demandaría la discretización volumétrica del dominio fluido y el uso de un esquema de solución iterativo. Una forma de simplificar el problema consiste en la aplicación de las Identidades de Green, estas permiten transformar ecuaciones diferenciales en ecuaciones integrales, con lo cual se precisa discretizar solamente las superficie externas del dominio fluido y su solución se transforma en la solución de un sistema de ecuaciones lineares, Hess & Smith (1964), Sclavounos & Nakos (1988) y Salhua (2004).

La expresión de la Segunda Identidad de Green aplicada al volumen fluido es dada por la siguiente ecuación:

$$\iiint_V (\phi \nabla^2 G - G \nabla^2 \phi) dV = \iint_{St} \left(\phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right) ds \quad 2.9$$

Donde:

ϕ es el potencial de velocidades a evaluar.

G es el potencial de velocidades de la singularidad adoptada o función de Green.

St es la superficie del o dominio fluido.

V es el volumen del dominio fluido.

La segunda identidad de Green debe cumplir con la ecuación de la continuidad o Laplace, esta se impone de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \phi = \nabla^2 G = 0 \quad 2.10$$

La ecuación (2.10) es substituida en la ecuación (2.9) y así se obtiene la expresión de la Tercera Identidad de Green:

$$\phi_{(P)} + \iint_{St} \phi_{(Q)} \frac{\partial}{\partial n} G_{(P,Q)} ds - \iint_{St} G_{(P,Q)} \frac{\partial}{\partial n} \phi_{(Q)} ds = 0 \quad 2.11$$

Donde :

$$\phi_{(P)} = \begin{cases} 4\pi \phi_{(P)} & \text{Para P en el interior de St} \\ 2\pi \phi_{(P)} & \text{Para P sobre St} \\ 0 & \text{Para P en el exterior de St} \end{cases}$$

$P = (x_0, y_0, z_0)$ es el identificador del panel campo

$Q = (x, y, z)$ es el identificador del panel fuente

$G_{(P,Q)}$ es la función de Green o singularidad a ser distribuida.

$\partial G_{(P,Q)} / \partial n$ es la expresión de un dipolo.

St es la superficie total del dominio fluido.

La aplicación de la ecuación (2.11) para la representación de flujos es conocida como método directo porque permite obtener directamente el potencial de velocidades, además permite distribuir funciones de Green del tipo fuente-sumidero y dipolo.

Se define la función de Green (G) como el potencial de velocidades de una fuente de Rankine o fuente simple, ecuación (2.12), la cual tiene que ser distribuida en las superficies del casco y la superficie libre.

$$G_{(P,Q)} = \frac{1}{R_{(P,Q)}} \quad 2.12$$

$$R_{(P,Q)} = \sqrt{(x_p - x_Q)^2 + (y_p - y_Q)^2 + (z_p - z_Q)^2}$$

2.3 Linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre

Las ecuaciones de las condiciones de contorno que gobiernan el comportamiento de la superficie libre contienen términos no lineales y se encuentran definidas sobre la elevación provocada por el avance del navío, la cual es desconocida a priori. Con estas premisas, el tratamiento de estas ecuaciones presupone un procedimiento iterativo, pero para poder simplificar este problema se puede linealizar estas ecuaciones a través de un proceso de expansión en relación al plano medio $z = 0$ y después despreciar los términos de orden superior en relación a la elevación, $O(\epsilon)$. Según los trabajos de Gadd (1976), Dawson (1977), Nakos & Scлавounos (1990) entre otros investigadores, la linealización de las condiciones de la superficie libre permite obtener resultados de buena calidad para ser utilizados en el proyecto de navíos.

Expandiendo en serie de Taylor las ecuaciones de la condición de contorno de la superficie libre en torno de la superficie $z = 0$ y despreciando los términos de orden superior, se obtienen las siguientes ecuaciones:

a) Condición cinemática en $z = 0$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \phi_s) \cdot \nabla \right] \zeta = \frac{\partial \phi_s}{\partial z} + \zeta \frac{\partial^2 \phi_s}{\partial z^2}, \text{ en } z = 0 \quad 2.13$$

b) Condición dinámica en $z = 0$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] \phi_s + \frac{|\nabla \phi_s|^2}{2} + g\zeta = 0, \text{ en } z = 0 \quad 2.14$$

El proceso de linealización de las ecuaciones de la superficie libre comienza considerando que el potencial de velocidades es dividido en dos partes, un potencial base (ϕ_0) y un potencial de perturbación (ϕ_1) mostrados a seguir:

a) Potencial Base (ϕ_0).- es la solución base del problema, este potencial representa un flujo conocido sobre el cual son linealizadas las condiciones de contorno de la superficie libre.

b) Potencial de Perturbación (ϕ_1).- es la solución del problema linealizado.

Se considera que el potencial de velocidades permanente es dividido de la siguiente forma:

$$\phi_s = \phi_0 + \phi_1 \quad 2.15$$

Se considera que el valor absoluto del potencial base es mucho mayor que el del potencial de perturbación:

$$|\varphi_1| \ll |\varphi_0| \quad 2.16$$

Una descomposición similar es adoptada para la elevación de la superficie libre:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 \quad 2.17$$

$$|\zeta_1| \ll |\zeta_0| \quad 2.18$$

Existen varios esquemas de linealización disponibles en la literatura especializada, los mas utilizados por los investigadores son dos, los cuales tambien son estudiados en esta tesis, estos son: la linealización de Neumann-Kelvin que utiliza como potencial base el flujo incidente y la linealización del Casco Duplo que utiliza como potencial base el flujo en torno del casco doble.

2.3.1 Linealización de la superficie libre de Neuman-Kelvin

El potencial base es considerado como nulo, porque se asume que el flujo de agua incidente permanece casi inalterado debido a la presencia del navío, esto es valido para navíos finos o esbeltos. De esta forma el potencial y la elevación permanente quedan expresados a través de las siguientes expresiones:

$$\phi_s = \varphi_1 \quad 2.19$$

$$\zeta = \zeta_1 \quad 2.20$$

Substituyendo las ecuaciones (2.19) e (2.20) en las ecuaciones de las condiciones de contorno de la superficie libre se obtiene las siguientes expresiones:

2.3.1.1 Condición de Contorno Cinemática

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -U \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} \quad , \text{ en } z = 0 \quad 2.21$$

2.3.1.2 Condición de Contorno Dinámica

$$\zeta_1 = \frac{U}{g} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \quad , \text{ en } z = 0 \quad 2.22$$

2.3.1.3 Condición de contorno combinada de la superficie libre

Substituyendo la ecuación (2.22) en la ecuación (2.21) se obtiene la ecuación combinada de la superficie libre.

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -\frac{U^2}{g} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} \quad , \text{ en } z = 0 \quad 2.23$$

2.3.2 Linealización de la superficie libre del Casco Doble

Un casco doble esta formado por el casco original y su imagen sobre la línea de flotación y el flujo del casco doble es equivalente a la perturbación generada por el casco doble profundamente sumergido en presencia de un flujo incidente. La influencia de este casco doble sobre una superficie equivalente a la superficie libre

es calculada y esta es considerada como la elevación base. Como la perturbación del casco esta siendo considerada en el potencial base, entonces esta linealización puede ser utilizada en navíos llenos. La linealización del casco doble se divide en dos etapas:

2.3.2.1 Potencial de Velocidades del Casco Doble (\square_0)

El potencial de velocidades del casco doble es obtenido previamente antes de incluir el efecto de la superficie libre, en la figura (2.2) puede observarse un esquema del casco doble. Posteriormente, la deformación base es obtenida substituyendo el potencial base en las ecuaciones de la superficie libre (2.13) e (2.14) y se procede a la obtención de las ecuaciones de la superficie libre linealizadas.

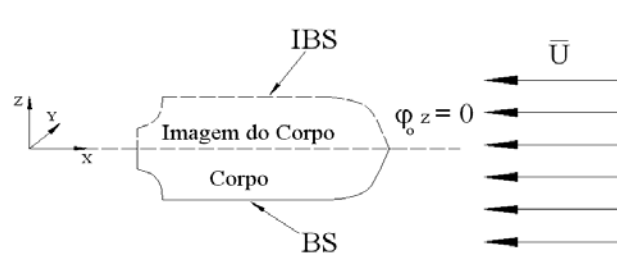


Fig. 2.2 .- Esquema del modelo del casco doble

Donde:

BS es la superficie del casco.

IBS es la superficie de la imagen del casco.

Debido a la simetría del flujo, se observa que la componente de la velocidad del flujo de agua en la dirección z en el plano $z = 0$ es nula.

Este efecto de simetría puede ser representado matemáticamente a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = 0 \quad 2.24$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli, ecuación (2.14), al potencial base, se puede obtener la elevación base, como mostrado a continuación:

$$\zeta_0 = \frac{U}{g} \frac{\partial \phi_0}{\partial x} - \frac{1}{2g} \nabla \phi_0 \cdot \nabla \phi_0 \quad \text{en } z = 0 \quad 2.25$$

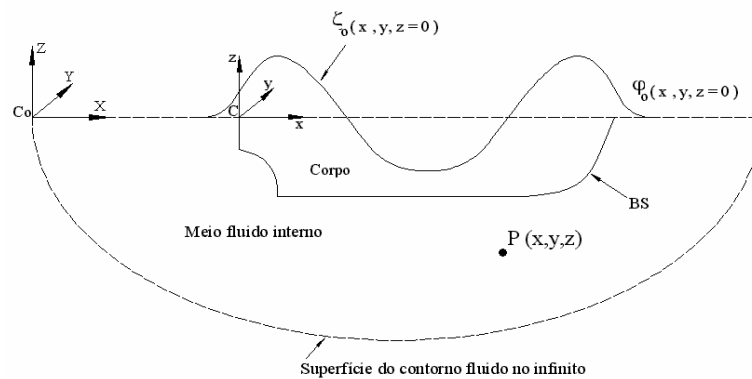


Fig. 2.3 - Elevación de la superficie libre debida al flujo del casco

2.3.2.2 Potencial de Velocidades de Perturbación (ϕ_1)

Este potencial incorpora el efecto de la perturbación de la superficie libre debido al avance del navío y es determinado considerando que el potencial base es conocido a priori. Las ecuaciones de la superficie libre linealizadas son mostradas a seguir:

2.3.2.2.1 Condición de Contorno Cinemática

Esta condición es obtenida sustituyendo las ecuaciones (2.15) y (2.17) en la ecuación (2.13).

$$\zeta_1 \left. \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \right|_{z=0} + \left. \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \right|_{z=0} = -(\bar{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \zeta_1, \text{ en } z = 0 \quad 2.26$$

2.3.2.2.2 Condición de Contorno Dinámica

Esta condición es obtenida sustituyendo las ecuaciones (2.15) y (2.17) en la ecuación (2.14).

$$-g\zeta_1 + g\zeta_0 = -(\bar{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \varphi_1 = 0, \text{ en } z = 0 \quad 2.27$$

2.3.2.2.3 Condición combinada de la superficie libre

Substituyendo la ecuación (2.27) en la ecuación (2.26), se obtiene la condición combinada de la superficie libre.

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -\left(U - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x}\right) \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \frac{\partial \zeta_1}{\partial y} - \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \zeta_1, \text{ en } z = 0 \quad 2.28$$

Donde:

$$\zeta_1 = \frac{1}{g} \left[\left(U - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} \right] + \zeta_0$$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial x} = -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x^2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \left(U - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial \zeta_0}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial y} = -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial y \partial x} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \left(U - \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right) \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial y^2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial \zeta_0}{\partial y}$$

2.4 Linealización de la Condición de Contorno de Radiación

Numéricamente esta condición es impuesta haciendo que la elevación de la superficie libre y su derivada con respecto a la dirección “x” sean nulas, esta condición es impuesta en la zona mas a proa de la superficie libre, Nakos (1990).

2.4.1 Elevación de la superficie libre

Esta condición es colocada en la parte mas a proa de la superficie libre, es garantizada por la primera derivada del potencial de perturbación en “x”, Nakos (1990)

$$\zeta=0 \rightarrow \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = 0 \quad 2.29$$

2.4.2 Primera derivada de la elevación de la superficie libre

Esta condición es colocada en la parte mas a proa de la superficie libre, es garantizada por la segunda derivada del potencial de perturbación en “x”, Nakos (1990).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} = 0 \quad 2.30$$

2.5 Calculo de la Resistencia por Formación de Olas

La diferencia de presiones en la superficie del casco sumergido debido al tren de olas generado por el avance del navío es calculado a través de la integración de presiones en la superficie del casco sumergido. Según Nakos & Sclavounos (1994), esta forma de calcular la Resistencia por Formación de Olas permite obtener resultados con suficiente precisión cuantitativa y cualitativa para ser utilizados en el proyecto de navíos.

$$R_w = \iint_{SB} -n_{x(Q)} p(Q) dS \quad 2.49$$

El coeficiente de resistencia por formación de olas es obtenido por la siguiente ecuación:

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_B} \quad 2.52$$

Donde:

$$p(Q) = \frac{\rho(U^2 - |\vec{V}_T|^2)}{2}$$

$$\vec{V}_T = -U\hat{i} + \nabla\phi_s$$

V_T es la velocidad total.

$\nabla\phi_s$ es la velocidad del potencial permanente.

$n_{x(Q)}$ es la componente x del vector normal del panel Q.

ρ es la densidad del agua (ton/m^3).

S_B es la superficie mojada del navío.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

3.1 Discretización de las superficies del dominio fluido

El dominio fluido está formado por las superficies del casco sumergido y la superficie libre alrededor, estas superficies son discretizadas utilizando paneles planos cuadrilaterales.

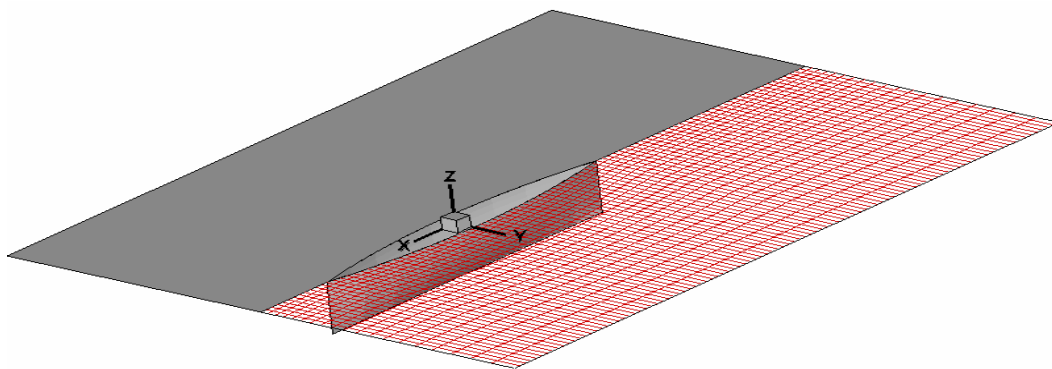


Fig. 3.1 .- Dominio fluido discretizado

Como los cuatros vértices de un panel cuadrilateral no necesariamente pertenecen al mismo plano, es necesario que se cree un panel co-planar conocido como panel medio, figura (3.2). La superficie formada por todos los paneles medios no necesariamente es una geometría cerrada, existen aberturas por donde pueden ocurrir infiltraciones de flujo. Para reducir este efecto es necesario el empleo de una cantidad muy grande de paneles para

poder representar la geometría de un casco, de esta forma las aberturas entre los paneles son despreciables.

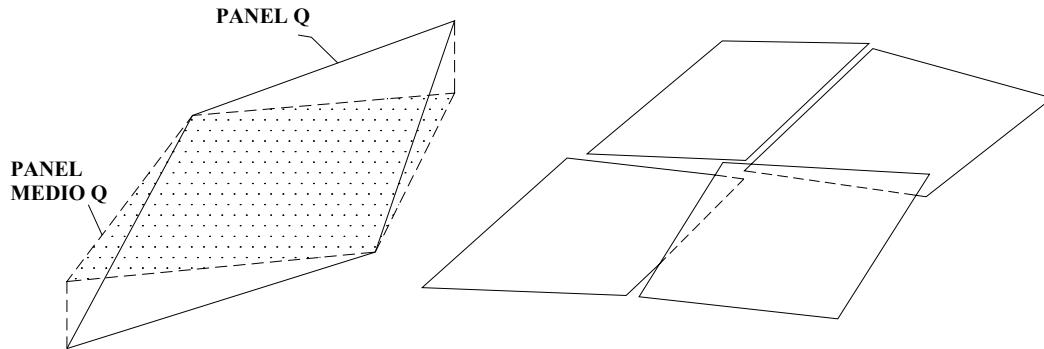


Fig. 3.2 .- Panel medio y unión de varios paneles medios

Es colocado un sistema de referencia local ($O \epsilon, \tau$) en el centroide de cada panel, el eje ϵ esta orientado en la dirección de los centroides de los paneles horizontales y el eje η esta orientado en la dirección de los centroides de los paneles transversales, estas dos direcciones no son siempre ortogonales entre si, el ángulo θ es formado por las direcciones del eje η y el eje del sistema de referencia local τ .

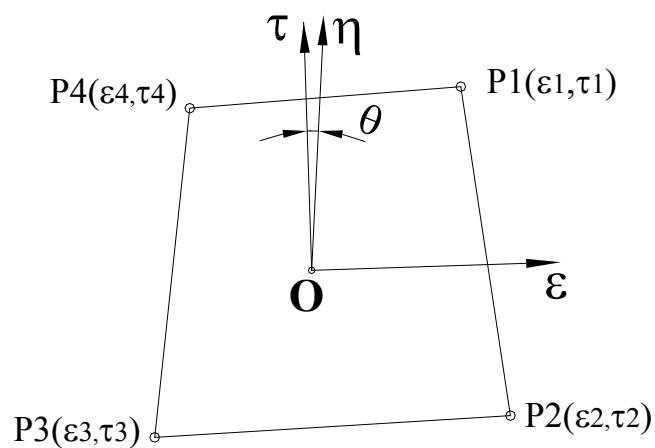


Fig. 3.3 .- Sistema de referencia local

Las coordenadas del panel en el sistema de referencia global son transformadas al sistema de referencia local, figura 3.3, a través de la transformación de coordenadas descritas a continuación:

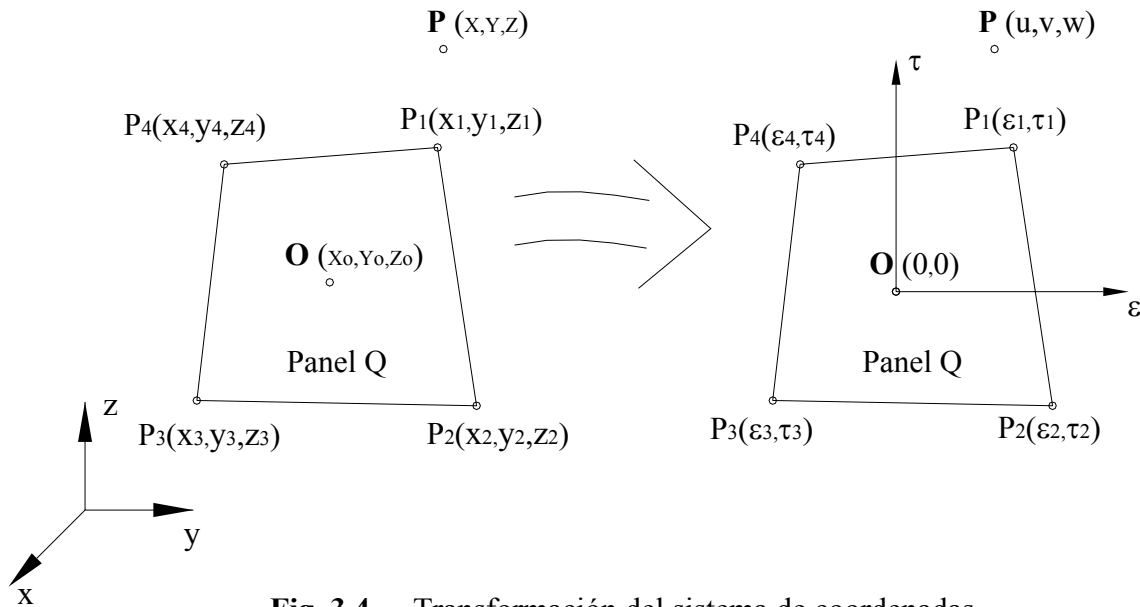


Fig. 3.4 .- Transformación del sistema de coordenadas

$$\begin{bmatrix} \epsilon_i \\ \tau_i \\ \zeta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nx_\epsilon & ny_\epsilon & nz_\epsilon \\ nx_\tau & ny_\tau & nz_\tau \\ nx_\zeta & ny_\zeta & nz_\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{bmatrix} \quad 3.1$$

Donde :

$\begin{bmatrix} nx_\epsilon & ny_\epsilon & nz_\epsilon \\ nx_\tau & ny_\tau & nz_\tau \\ nx_\zeta & ny_\zeta & nz_\zeta \end{bmatrix}$ es la matriz de transformación conteniendo los vectores unitarios de los ejes del sistema local (ϵ, τ, ζ)

(x_i, y_i, z_i) son las coordenadas del punto i del panel Q expresadas en el sistema de referencia fijo en el navío (global)

(x_0, y_0, z_0) son las coordenadas del centróide del panel Q expresadas en el sistema global.

$(\epsilon_i, \tau_i, \zeta_i)$ son las coordenadas del punto i del panel Q expresadas en el sistema de referencia local en el centróide del panel Q.

3.2 Discretización de la Tercera Identidad de Green

La versión discretizada de la Tercera Identidad de Green, ecuación (2.11), es mostrada a continuación:

$$2\pi\varphi_{P=Q} + \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{NST} \left[\iint_{SQ} \varphi(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} ds \right] - \sum_{Q=1}^{NST} \left[\iint_{SQ} \left(\frac{\partial \varphi(Q)}{\partial n} \right) G(P,Q) ds \right] = 0 \quad 3.2$$

/ P = 1 NST

Donde:

S_Q es el área del panel fuente (Q).

NST es el número total de paneles del dominio fluido.

φ es el potencial de velocidades a ser calculado.

3.3 Representación del potencial de velocidades

El potencial de velocidades es representado a través de superficies B-Splines “bi-cuadráticas”, debido a que su incorporación en la solución de problemas con superficie libre no incluye amortiguamiento numérico, Nakos (1990).

$$\varphi_{(Q)} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.3$$

Donde:

$b_m^{(2)}(\varepsilon)$ es la función B-spline cuadrática en la dirección ε .

$b_n^{(2)}(\eta)$ es la función B-spline cuadrática en la dirección η .

$a_Q(\varepsilon + m, \tau + n)$ es el punto de control de la superficie B-spline “bi-cuadrática”.

$$b_m^{(2)}(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{2h\varepsilon^2} \left(\varepsilon + \frac{3h\varepsilon}{2} \right)^2, & -\frac{3h\varepsilon}{2} < \varepsilon < -\frac{h\varepsilon}{2} \\ \frac{1}{h\varepsilon^2} \left(-\varepsilon^2 + \frac{3h\varepsilon^2}{4} \right), & -\frac{h\varepsilon}{2} < \varepsilon < \frac{h\varepsilon}{2} \\ \frac{1}{2h\varepsilon^2} \left(-\varepsilon + \frac{3h\varepsilon}{2} \right)^2, & \frac{h\varepsilon}{2} < \varepsilon < \frac{3h\varepsilon}{2} \end{cases}$$

$h\varepsilon$ es el valor del lado horizontal del panel matemático regular.

$h\eta$ es el valor del lado vertical del panel matemático regular.

La aplicación de la ecuación (3.3) requiere que se utilice el panel fuente juntamente con los ocho paneles a su alrededor, como indicado por los índices indicadores $m = -1-1$ y $n = -1-1$.

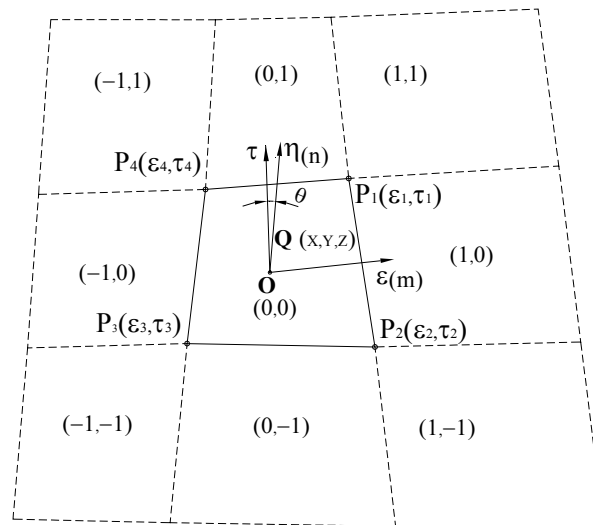


Fig. 3.5 .- Paneles para la aplicación de la superficie B-spline

La aplicación de las ecuaciones que representan las superficies B-Spline “bi-cuadráticas” requiere que las mallas de paneles sean transformadas en mallas computacionales de paneles regularmente espaciadas como mostrado a continuación:

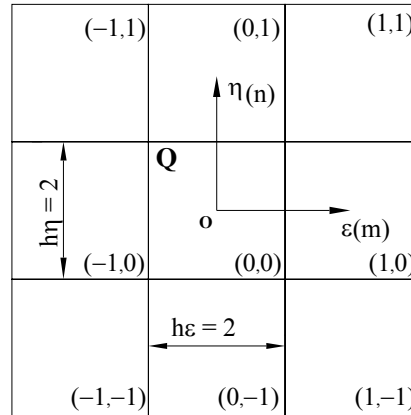


Fig. 3.6 .- Paneles fuente Q y sus vecinos igualmente espaciados

Esta transformación es realizada con la aplicación de elementos isoparamétricos cuadrilaterales, Brebbia (1982). Las ecuaciones utilizadas para esta transformación son mostradas a continuación:

$$x = f_1(\varepsilon, \eta)x_1 + f_2(\varepsilon, \eta)x_2 + f_3(\varepsilon, \eta)x_3 + f_4(\varepsilon, \eta)x_4 \quad 3.4$$

$$y = f_1(\varepsilon, \eta)y_1 + f_2(\varepsilon, \eta)y_2 + f_3(\varepsilon, \eta)y_3 + f_4(\varepsilon, \eta)y_4 \quad 3.5$$

$$z = f_1(\varepsilon, \eta)z_1 + f_2(\varepsilon, \eta)z_2 + f_3(\varepsilon, \eta)z_3 + f_4(\varepsilon, \eta)z_4 \quad 3.6$$

Donde:

$$f_1(\varepsilon, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \varepsilon)(1 + \eta)$$

$$f_2(\varepsilon, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \varepsilon)(1 - \eta)$$

$$f_3(\varepsilon, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \varepsilon)(1 - \eta)$$

$$f_4(\varepsilon, \eta) = \frac{1}{4}(1 - \varepsilon)(1 + \eta)$$

Como se impone que la dimensión de los paneles es igual a 2, las funciones B-splines cuadráticas quedan convertidas en las siguientes expresiones:

$$b_m^{(2)}(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{8}(\varepsilon+1)^2 & , \quad -3 < \varepsilon < -1 \\ \frac{1}{4}(-\varepsilon^2 + 3) & , \quad -1 < \varepsilon < 1 \\ \frac{1}{8}(-\varepsilon+1)^2 & , \quad 1 < \varepsilon < 3 \end{cases} \quad 3.7$$

La primera derivada de la función B-spline “cuadrática” es definida a continuación:

$$\frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \begin{cases} \frac{1}{4}(\varepsilon+1) & , \quad -3 < \varepsilon < -1 \\ -\frac{\varepsilon}{2} & , \quad -1 < \varepsilon < 1 \\ -\frac{1}{4}(-\varepsilon+1) & , \quad 1 < \varepsilon < 3 \end{cases} \quad 3.8$$

La segunda derivada de la función B-spline “cuadrática” es definida a continuación:

$$\frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} = \begin{cases} \frac{1}{4} & , \quad -3 < \varepsilon < -1 \\ -\frac{1}{2} & , \quad -1 < \varepsilon < 1 \\ \frac{1}{4} & , \quad 1 < \varepsilon < 3 \end{cases} \quad 3.9$$

3.4 Evaluación de los coeficientes de influencia

Substituyendo la ecuación (3.3) en la ecuación (3.2) se obtiene la ecuación de la Tercera Identidad de Green afectada por las superficies Bsplines “bi-cuadráticas”.

$$\begin{aligned}
 & 2\pi \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\tau) a_P(\varepsilon + m, \tau + n)_{P=Q} + & 3.10 \\
 & \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{NST} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \left(\iint_{SQ} b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\tau) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \right) a_Q(\varepsilon + m, \tau + n) \right] \\
 & = \sum_{Q=1}^{NST} \left[\iint_{SQ} \left(\frac{\partial \varphi(Q)}{\partial n} \right) G(P, Q) ds \right] \\
 & / P=1 \dots NST
 \end{aligned}$$

Las integrales de superficie de las fuentes y dipolos de Rankine contenidos en la ecuación (3.10) son conocidas como coeficientes de influencia, estas determinan la influencia de los paneles fuentes sobre los paneles campos, su evaluación es realizada considerando el sistema de referencia local y no la malla computacional regularmente espaciada para poder aprovechar las formulas analíticas disponibles en la literatura especializada.

3.4.1 Coefficiente de influencia Dipolo de Rankine

Este coeficiente esta determinado por la siguiente ecuación:

$$A_{ij}(P, Q) = \iint_{SQ} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad 3.11$$

La ecuación (3.11) es evaluada numéricamente a través de una formula analítica desarrollada en el trabajo de Hess & Smith (1962), que utiliza como dominio de integración el panel con sistema de referencia local mostrado en la figura (3.3) y (3.4).

$$\iint_{SQ} \left(\frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \right) ds = a \tan \left\{ \frac{(m_{12} e_1 - g_2)}{w r_2} \right\} - a \tan \left\{ \frac{(m_{12} e_1 - g_1)}{w r_1} \right\} \quad 3.12$$

$$+ a \tan \left\{ \frac{(m_{23} e_3 - g_3)}{w r_3} \right\} - a \tan \left\{ \frac{(m_{23} e_2 - g_2)}{w r_2} \right\}$$

$$+ a \tan \left\{ \frac{(m_{34} e_4 - g_4)}{w r_4} \right\} - a \tan \left\{ \frac{(m_{34} e_3 - g_3)}{w r_3} \right\}$$

$$+ a \tan \left\{ \frac{(m_{41} e_1 - g_1)}{w r_1} \right\} - a \tan \left\{ \frac{(m_{41} e_4 - g_4)}{w r_4} \right\}$$

Donde:

$$h_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \ln \left(\frac{r_i + r_j - d_{ij}}{r_i + r_j + d_{ij}} \right)$$

$$m_{ij} = \frac{\eta_i - \eta_j}{\varepsilon_i - \varepsilon_j}$$

$$d_{ij} = \left\{ (\varepsilon_i - \varepsilon_j)^2 + (\eta_i - \eta_j)^2 \right\}^{1/2}$$

$$e_i = w^2 + (u - \varepsilon_i)^2$$

$$r_i = \left\{ (u - \varepsilon_i)^2 + (v - \eta_i)^2 + w^2 \right\}^{1/2}$$

$$g_i = (v - \eta_i)(u - \varepsilon_i)$$

3.4.2 Coefficiente de influencia Fuente de Rankine

Este coeficiente es determinado por la siguiente ecuación:

$$B_{ij}(P, Q)_{(m,n)} = \iint_{SQ} G(P, Q) ds \quad 3.13$$

La ecuación (3.13) es evaluada numéricamente a través de una formula analítica desarrollada en el trabajo de Newman (1974), que utiliza como dominio de integración el panel con sistema de referencia local mostrado en la figura (3.3) e (3.4).

$$\begin{aligned} \iint_{SQ} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds = & [(x - \varepsilon_1) \text{sen} \lambda_1 - (y - \eta_1) \text{cos} \lambda_1] \log \left[\frac{R_1 + R_2 + s_1}{R_1 + R_2 - s_1} \right] \quad 3.14 \\ & + [(x - \varepsilon_2) \text{sen} \lambda_2 - (y - \eta_2) \text{cos} \lambda_2] \log \left[\frac{R_2 + R_3 + s_2}{R_2 + R_3 - s_2} \right] \\ & + [(x - \varepsilon_3) \text{sen} \lambda_3 - (y - \eta_3) \text{cos} \lambda_3] \log \left[\frac{R_3 + R_4 + s_3}{R_3 + R_4 - s_3} \right] \\ & + [(x - \varepsilon_4) \text{sen} \lambda_4 - (y - \eta_4) \text{cos} \lambda_4] \log \left[\frac{R_4 + R_1 + s_4}{R_4 + R_1 - s_4} \right] \\ & - z A_{ij}(P, Q) \end{aligned}$$

Donde:

$$\tan \lambda_i = \left(\frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \right)$$

$$s_i = \left\{ (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i)^2 + (\eta_{i+1} - \eta_i)^2 \right\}^{1/2}$$

3.5 Determinación de las velocidades

La determinación de las velocidades es realizada utilizando la transformación de la malla real a la malla computacional igualmente espaciada. La solución del sistema de ecuaciones (3.2) permite obtener el valor del potencial de velocidades y las velocidades en el sistema $O(\varepsilon, \eta)$ de los paneles de la malla computacional, estas son obtenidas a través de las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.15$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \eta}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.16$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varepsilon \partial \eta}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.17$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varepsilon^2}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.18$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \eta^2}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a_Q(\varepsilon + m, \eta + n) \quad 3.19$$

Para la obtención de las velocidades en el sistema de referencia global se utiliza el jacobiano de transformación producto de las ecuaciones de transformación de los elementos isoparamétricos, ecuaciones (3.4) a (3.6). Las ecuaciones a continuación describen el procedimiento para la obtención del jacobiano de transformación.

Los vectores direccionales del eje ε son las siguientes:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4} [(1 + \eta)x_1 + (1 - \eta)x_2 - (1 - \eta)x_3 - (1 + \eta)x_4] \quad 3.20$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4} [(1 + \eta)y_1 + (1 - \eta)y_2 - (1 - \eta)y_3 - (1 + \eta)y_4] \quad 3.21$$

$$\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \varepsilon} = \frac{1}{4} [(1 + \eta)z_1 + (1 - \eta)z_2 - (1 - \eta)z_3 - (1 + \eta)z_4] \quad 3.22$$

Los vectores direccionales del eje η son las siguientes:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \eta} = \frac{1}{4} [(1 + \varepsilon)x_1 - (1 + \varepsilon)x_2 - (1 - \varepsilon)y_3 + (1 - \varepsilon)x_4] \quad 3.23$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \eta} = \frac{1}{4} [(1 + \varepsilon)y_1 - (1 + \varepsilon)y_2 - (1 - \varepsilon)y_3 + (1 - \varepsilon)y_4] \quad 3.24$$

$$\frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \eta} = \frac{1}{4} [(1 + \varepsilon)z_1 - (1 + \varepsilon)z_2 - (1 - \varepsilon)z_3 + (1 - \varepsilon)z_4] \quad 3.25$$

Los vectores direccionales del eje ζ , el cual es perpendicular a la superficie formada por los ejes ε y η , es obtenido a través de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{G}(\varepsilon, \eta) = \left(\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \varepsilon}, \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon}, \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \varepsilon} \right) \times \left(\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \eta}, \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \eta}, \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \eta} \right) \quad 3.26$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \zeta}, \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \zeta}, \frac{\partial \mathbf{z}}{\partial \zeta} \right) = \frac{\mathbf{G}(\varepsilon, \eta)}{|\mathbf{G}(\varepsilon, \eta)|} \quad 3.27$$

El jacobiano de transformación es obtenido a través del montaje de la

siguiente matriz:

$$J(\varepsilon, \eta, \zeta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial z}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} & \frac{\partial \eta}{\partial z} & \frac{\partial \zeta}{\partial z} \end{bmatrix} = J(\varepsilon, \eta, \zeta)^{-1} \quad 3.28$$

Las velocidades en el sistema de referencia global pueden ser obtenidas con el uso de la regla de cadena, como mostrado a continuación:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad 3.29$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad 3.30$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial z} \quad 3.31$$

El procedimiento anteriormente descrito es general, es aplicado a la superficie del casco sumergido. Pero para el caso de la superficie libre discretizada, las velocidades son calculadas sobre un plano, con esto las ecuaciones para la obtención de la velocidad pueden ser simplificadas considerando únicamente dos dimensiones, estas son mostradas a seguir:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad 3.32$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad 3.33$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)^2 + 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon \partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 \quad 3.34$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)^2 + 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon \partial \eta} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2 \quad 3.35$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon^2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varepsilon \partial \eta} \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right) \right] + \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right) \quad 3.36$$

3.6 Contornos de las mallas de paneles

La definición de las superficies B-splines “bi-cuadráticas” requieren que el panel fuente sea calculado considerando los ocho vecinos alrededor, esto es posible en el interior de las mallas, pero en los contornos de la malla no se cuenta con todos los paneles vecinos necesarios. Por esta razón es colocado un contorno de paneles ficticios alrededor de las mallas y de esta forma se puede completar los ocho vecinos necesarios para definir la superficie B-splines “bi-cuadráticas”.

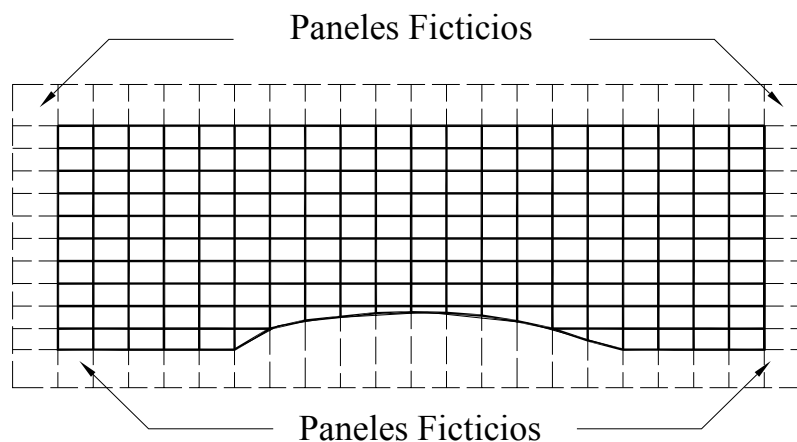


Fig. 3.7 .- Malla de la superficie libre con los paneles ficticios

La inclusión de los paneles ficticios introduce incógnitas adicionales al problema, estas son eliminadas con la colocación de la condición de curvatura cero sobre estos paneles.

3.6.1 Condición de no curvatura o curvatura cero

Esta condición garante que la tendencia de la curvatura de la curva o superficie B-spline se conserva constante cuando esta alcanza los extremos del dominio geométrico. Matemáticamente esta condición se expresa a imponiendo que la segunda derivada de la función spline es igual a cero.

$$\frac{\partial^2 f(\xi)}{\partial \xi^2} = 0 \quad 3.37$$

Donde:

$f(\xi)$ es la función spline definida en $\tilde{\Omega}$

En el problema, la condición de curvatura cero es aplicada imponiendo la segunda derivada de la función de interpolación B-spline “bi-cuadrática” en la dirección predominante en las extremidades de la malla es nula, como mostrado en la siguiente figura:

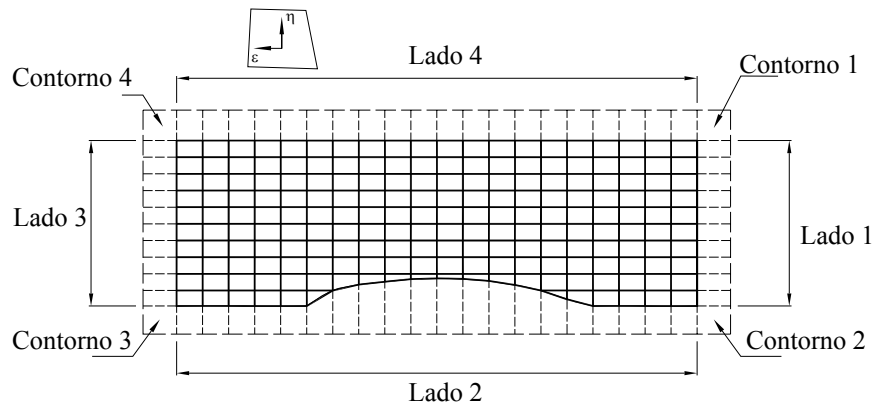


Fig. 3.8 .- Contornos de la mallas de paneles

Paneles ficticios	Condición de curvatura cero	
Lado 1 Lado 3	$\frac{\partial^2 \phi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\xi)}{\partial \xi^2} b_n^{(2)}(\eta) a(\xi + m, \eta + n) = 0$	3.38
Lado 2 Lado 4	$\frac{\partial^2 \phi(\xi, \eta)}{\partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\xi) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\xi + m, \eta + n) = 0$	3.39
Contorno 1 Contorno 2 Contorno 3	$\frac{\partial^4 \phi(\xi, \eta)}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\xi)}{\partial \xi^2} \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\xi + m, \eta + n) = 0$	3.40

3.7 Solución del problema linealizado

La ecuación de la Tercera Identidad de Green utilizada para la determinación del potencial de velocidades permanente que representa el flujo responsable por la formación del tren de olas cuando un navío avanza y por tanto responsable de la Resistencia por Formación de Olas es mostrado a continuación. Esta parte es dividida en dos, la primera parte esta relacionada con las ecuaciones necesarias para la utilización de la linealización de Neumann-Kelvin y la segunda esta relacionada con las ecuaciones necesarias para la utilización del Casco Doble.

3.7.1 Solución utilizando a linealización de la superficie libre de Neumann-Kelvin

3.41

$$\begin{aligned}
& 2\pi \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) a_{P(\varepsilon+m, \eta+n)} + \\
& \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{NST} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \left(\iint_{SQ} b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] \\
& - \sum_{Q=1}^{NSL} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{U^2}{g} \left(\iint_{SQ} f_{N-K}(\varepsilon, \eta) G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] = \\
& \sum_{Q=1}^{NSB} \left[\iint_{SQ} \left(\frac{\partial \phi_1(Q)}{\partial n} \right) G(P, Q) ds \right]
\end{aligned}$$

/ P=1.... NST – NSContorno

Donde:

NSContorno son los paneles ficticios.

$f_{N-K}(\varepsilon, \eta)$ es la función que contiene los términos B-spline de la condición de contorno de la superficie libre.

$$\begin{aligned}
f_{N-K}(\varepsilon, \eta) = & \left[\frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \right. \\
& \left. b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right]
\end{aligned}$$

Las condiciones de curvatura cero son colocadas en los paneles pertenecientes a NSContorno como indicado a continuación:

$$\frac{\partial^2 \phi(\varepsilon, \eta)}{\partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\varepsilon+m, \eta+n) = 0$$

Lado 2

Lad

o 4

$$\frac{\partial^4 \phi(\varepsilon, \eta)}{\partial \varepsilon^2 \partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0$$

Contorno 1
Contorno 2
Contorno 3
Con
torno 4

Las ecuaciones que representan la condición de radiación son colocadas en la fila de paneles ficticios más a proa de la superficie libre:

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \varepsilon} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0$$

Lad
o 1

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial \varepsilon^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0$$

Lad
o 1

3.7.2 Solución utilizando a linealización de la superficie libre del Casco Doble

Como visto en el capítulo 2, las condiciones de contorno de la superficie libre fueron linealizadas tomando como potencial base el flujo alrededor del casco doble. Por esta razón, esta sección se divide en dos, la primera relacionada con la obtención del potencial de velocidades del base (casco doble) y la segunda relacionada con el potencial de velocidades de perturbación.

3.7.2.1 Potencial de velocidades base (ϕ_0)

Este potencial representa la solución base para la linealización de la superficie del casco doble, su obtención es realizada a través de la solución

de la ecuación de la Tercera Identidad de Green. Para la obtención de este potencial, la Tercera Identidad de Green es aplicada juntamente con la condición de contorno de impenetrabilidad sobre la superficie del cuerpo y su imagen con respecto al plano de flotación.

$$2\pi\varphi_o(p) + \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{\text{NSB}+} \left[\iint_{\text{SQ}} \varphi_o(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} ds \right] = \sum_{Q=1}^{\text{NSB}+} \left[U_{nx(Q)} \iint_{\text{SQ}} G(P,Q) ds \right] \quad 3.42$$

/ P=1.... NSB + INSB

La obtención del potencial de velocidades base sobre la región perteneciente a la superficie libre es obtenida a través de la Tercera Identidad de Green definida para superficies internas, ecuación (2.11).

$$\varphi_o(p) = \frac{\sum_{Q=1}^{\text{NSB}+} \left[U_{nx(Q)} \iint_{\text{SQ}} G(P,Q) ds \right] - \sum_{Q=1}^{\text{NSB}+} \left[\iint_{\text{SQ}} \varphi_o(Q) \frac{\partial}{\partial n} G(P,Q) ds \right]}{4\pi} \quad 3.43$$

/ P=1.... NSL

Donde:

INSB es el número de paneles de la imagen del casco

3.7.2.2 Potencial de velocidades de perturbación (φ_1)

$$\begin{aligned}
& 2\pi \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) a_{\substack{P(\varepsilon+m, \eta+n) \\ P=Q}} + & 3.44 \\
& \sum_{\substack{Q=1 \\ Q \neq P}}^{NST} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \left(\iint_{SQ} b_m^{(2)}(\varepsilon) b_n^{(2)}(\eta) \frac{\partial}{\partial n} G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] \\
& - \sum_{Q=1}^{NSL} \left[\sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{U^2}{g} \left(\iint_{SQ} f_{D-B}(\varepsilon, \eta) G(P, Q) ds \right) a_{Q(\varepsilon+m, \eta+n)} \right] = \\
& \sum_{Q=1}^{NSL} \left[f_{\text{base}(Q)} \iint_{SQ} G(P, Q) ds \right]
\end{aligned}$$

/ P=1....NST – NSContorno

Donde:

$f_{N-K}(\varepsilon, \eta)$ es la función que contiene los terminos B-spline de la condición de contorno de la superficie libre.

$$\begin{aligned}
f_{D-B}(\varepsilon, \eta) = & \left[- \left(1 - \frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial x} \right) f_x(\varepsilon, \eta) - \left(\frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial y} \right) f_y(\varepsilon, \eta) \right. \\
& \left. - \left(\frac{\partial^2 \varphi_o(Q)}{\partial z^2} \right) f(\varepsilon, \eta) \right]
\end{aligned}$$

$$f_{(\varepsilon, \eta)} = \left(1 - \frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial x} \right) g_x(\varepsilon, \eta) - \left(\frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial y} \right) g_y(\varepsilon, \eta) \mathbf{g}$$

$$f_y(\varepsilon, \eta) = - \left[\left(\frac{\partial^2 \varphi_o(Q)}{\partial x \partial y} \right) g_x(\varepsilon, \eta) - \left(1 - \frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial x} \right) g_{xy}(\varepsilon, \eta) \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial^2 \varphi_o(Q)}{\partial y^2} \right) g_y(\varepsilon, \eta) + \left(\frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial y} \right) g_{yy}(\varepsilon, \eta) \right]$$

$$f_{\text{Base}(Q)} = \left[- \left(1 - \frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial x} \right) \frac{\partial \zeta_o(Q)}{\partial y} - \left(\frac{\partial \varphi_o(Q)}{\partial y} \right) \frac{\partial \zeta_o(Q)}{\partial y} \right. \\ \left. - \left(\frac{\partial^2 \varphi_o(Q)}{\partial z^2} \right) \zeta_o(Q) \right]$$

$$g_x(\varepsilon, \eta) = \left[\frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right]$$

$$g_y(\varepsilon, \eta) = \left[\frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right]$$

$$g_{xx}(\varepsilon, \eta) = \left[\frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \right. \\ \left. b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$g_{yy}(\varepsilon, \eta) = \left[\frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \right. \\ \left. b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$g_{xy}(\varepsilon, \eta) = \left[\frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right]$$

Las condiciones de curvatura cero son colocadas en los paneles pertenecientes a NSContorno como indicado a continuación:

$$\frac{\partial^2 \phi(\varepsilon, \eta)}{\partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Lado 2} \\ \text{La} \\ \text{do 4} \end{array}$$

$$\frac{\partial^4 \phi(\varepsilon, \eta)}{\partial \varepsilon^2 \partial \eta^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} \frac{\partial^2 b_n^{(2)}(\eta)}{\partial \eta^2} a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{Contorno} \\ 1 \\ \text{Contorno} \\ 2 \\ \text{Contorno} \\ 3 \\ \text{C} \\ \text{ontorno 4} \end{array}$$

Las ecuaciones que representan la condición de radiación son colocadas en la fila de paneles ficticios más a proa de la superficie libre:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \varepsilon} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{La} \\ \text{do 1} \end{array}$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \varepsilon^2} = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial^2 b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon^2} b_n^{(2)}(\eta) a(\varepsilon + m, \eta + n) = 0 \quad \begin{array}{l} \text{La} \\ \text{do 1} \end{array}$$

3.8 Determinación de la Resistencia por Formación de Olas

El potencial de velocidades utilizado para o calculo de la Resistencia por Formación de Olas en ambas linealizaciones de la superficie libre utilizadas es el potencial de perturbación. En el caso da linealización del casco doble la inclusión del potencial de

velocidades base en el calculo de la Resistencia por Formación de Olas genera errores numéricos, Raven(1996).

Utilizando las ecuaciones (3.15) e (3.16) para el cálculo de las velocidades en las direcciones ε y η , como mostradas a continuación:

$$\frac{\partial\phi_1}{\partial\varepsilon}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \frac{\partial b_m^{(2)}(\varepsilon)}{\partial\varepsilon} b_n^{(2)}(\eta) a_Q(\varepsilon+m, \eta+n) \quad 3.45$$

$$\frac{\partial\phi_1}{\partial\eta}(Q) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 b_m^{(2)}(\varepsilon) \frac{\partial b_n^{(2)}(\eta)}{\partial\eta} a_Q(\varepsilon+m, \eta+n) \quad 3.46$$

$$\frac{\partial\phi_1}{\partial\zeta}(Q) = U n_x(Q) \quad 3.47$$

Las velocidades sobre la superficie del casco son calculadas utilizando las ecuaciones (3.29) a (3.31), adicionando la velocidad total en la componente de la velocidad en el eje “x”, estas expresiones son mostradas a continuación:

$$V_x(Q) = \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial x} = -U + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\eta} \frac{\partial\eta}{\partial x} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\zeta} \frac{\partial\zeta}{\partial x} \quad 3.48$$

$$V_y(Q) = \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial y} = \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\eta} \frac{\partial\eta}{\partial y} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\zeta} \frac{\partial\zeta}{\partial y} \quad 3.49$$

$$V_z(Q) = \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial z} = \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial z} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\eta} \frac{\partial\eta}{\partial z} + \frac{\partial\phi_1(Q)}{\partial\zeta} \frac{\partial\zeta}{\partial z} \quad 3.50$$

La velocidad total sobre la superficie del casco del navío es determinada a través de la siguiente ecuación:

$$\vec{V}_{(Q)} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k} \quad 3.51$$

$$p(Q) = \frac{\rho \left(U^2 - |\vec{V}_{T(Q)}|^2 \right)}{2} \quad 3.52$$

La Resistencia por Formación de Olas es calculada utilizando la ecuación (2.49), a continuación se muestra la versión discretizada de esta ecuación:

$$R_w = \sum_{Q=1}^{NSB} \iint_{S_Q} -n_x(Q) P(Q) dS \quad 3.53$$

El coeficiente de resistencia por formación de olas es calculado utilizando la ecuación (2.52), la cual es mostrada a continuación:

$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} \rho S_B U^2} \quad 3.54$$

CAPÍTULO 4

DISCRETIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES DEL DOMINIO FLUIDO

La aplicación de la metodología descrita en esta tesis para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas requiere que la superficie mojada del casco a ser estudiado sea discretizada en paneles cuadrilaterales. Esta discretización es realizada utilizando curvas B-splines cúbicas, las cuales son definidas sobre los puntos de las cuadernas del casco y a través de estas curvas se interpolan nuevos puntos y cuadernas para así poder obtener la discretización del casco.

4.1 Generalidades

La representación de las formas del casco de una embarcación de suma importancia en la ingeniería naval, porque a través de las formas es posible calcular las propiedades hidrostáticas. Las cuales son fundamentales para la evaluar la estabilidad, capacidad de carga, resistencia al avance, comportamiento en el mar, maniobrabilidad, etc.

En los comienzos del siglo XX, el dibujo de las líneas de forma de los barcos fue realizado con la ayuda de pequeñas vigas de madera conocidas como “baretas”, debido a que estas tienen la flexibilidad adecuada para representar las curvas de los cascos, estas eran apoyadas sobre pesos de plomo para mantener una forma específica y después era pasado el lápiz sobre esta forma.

En 1940, Schoenberg desarrollo una función matemática para representar la flexibilidad de las vigas de madera, esta función es conocida como “spline” y fue utilizada inicialmente para el ajuste de datos estadísticos.

Con el incremento de la capacidad de los computadores, el uso de funciones “spline” se ha incrementado substancialmente, se desarrollaron diversos tipos, y surgieron aplicaciones principalmente para el diseño grafico y CAD/CAM.

Actualmente varios tipos de curvas “spline” que pueden ser encontrados en la literatura, incluyendo las “spline” del tipo natural (standard), Overhauser, Bezier y B-splines.

En este tema de tesis se utiliza la curva spline del tipo B-spline, debido a su versatilidad para ser implementada en programas computacionales y porque es ampliamente utilizada en aplicaciones de ingeniería relacionadas con la representación de geometrías, curvas de tendencia estadísticas, etc.

4.2 Curvas B-spline

Estas curvas están formadas por funciones matemáticas polinomiales por partes. Este tipo de curvas son utilizadas para describir el comportamiento o forma de la unión de varios puntos. La forma de estas curvas es controlada por puntos que no pertenecen a la geometría representada, estos puntos son conocidos como puntos de control. Las funciones matemáticas que forman parte de la B-spline son del mismo orden y son conocidas como funciones base.

Según Gordon y Reisenfeld, una curva B-spline es una función polinómica de grado $M-1$ (orden M) si satisface las siguientes condiciones:

- a) La curva B-spline es un polinomio de grado $M-1$ en cada sub-intervalo del dominio de nodos donde esta definida.
- b) La curva B-spline y sus derivadas de orden $1, 2, \dots, M-2$ son continuas en todo su dominio, matemáticamente esto puede ser expresado como C^{M-2} .

Existen varios tipos de curvas B-spline, las más utilizadas son las del tipo uniforme y no racionales, las no uniformes y no racionales y las no uniformes y racionales. Este último tipo es popularmente conocido como NURBS.

La expresión uniforme significa que la variación del parámetro de las funciones de aproximación es uniforme, siendo las de variación unitaria la más utilizada. Por otro lado, la expresión racional se refiere a la presentación de las funciones base, descritas en este caso en la forma de la división entre dos polinomios en el grado escogido. El tipo uniforme y no racional es suficientemente versátil y simple de representar e implementar numéricamente, por esta razón este tipo de curvas es utilizado en este trabajo. La letra B que precede a la designación de la B-spline fue adicionada para hacer referencia a las funciones base.

Las curvas B-splines son definidas en forma paramétrica sobre cada coordenada, como mostrado a seguir:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} \quad 4.1$$

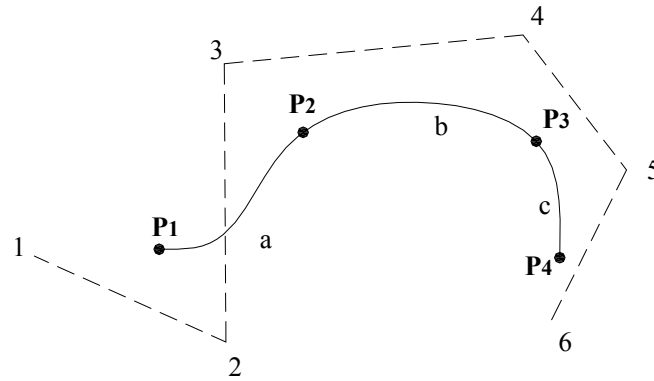
En el sistema paramétrico, “t” es el espaciamiento entre los nodos, este es adoptado como igual y la ubicación entre un nodo y el siguiente en función del parámetro “t” equivale a la ubicación de 0 a 1.

4.2.1 Curvas B-splines cúbicas

Estas curvas están representadas por funciones cúbicas por partes que cumplen con las siguientes condiciones:

- La curva B-spline cúbica es de orden 3.
- La curva B-spline cúbica es de grado 2.
- La curva B-spline cúbica presenta continuidad hasta la tercera derivada.

Son utilizados cuatro puntos de control en cada segmento de la función B-spline y estos son multiplicados por una función base que define la curva B-spline, como mostrada en la siguiente figura.



Segmentos	Nodos	Puntos de control
a	P1-P2	1,2,3,4
b	P2-P3	2,3,4,5
c	P3-P4	3,4,5,6

Figura 4.1 – Curva B-spline cúbica

Los puntos en el espacio que representan a una curva B-spline cúbica son mostrados a seguir:

$$\vec{P}_{i(t)} = E_{0(t)}\vec{V}_{i-1} + E_{1(t)}\vec{V}_i + E_{2(t)}\vec{V}_{i+1} + E_{3(t)}\vec{V}_{i+2} \quad 4.2$$

Donde:

$\vec{P}_{i(t)}$ es el vector que contiene las coordenadas (x,y,z) de cualquier punto dentro del dominio da curva B-spline.

$\vec{V}_{i-1}, \vec{V}_i, \vec{V}_{i+1}, \vec{V}_{i+2}$ son los vectores que contienen las coordenadas de los puntos de control (X, Y, Z) de la curva $\vec{P}_{i(t)}$.

$E_k(t)$ son las funciones que definen la curva B-spline cúbica. Estas son mostradas a seguir:

$$E_0(t) = -\frac{t^3}{6} + \frac{t^2}{2} - \frac{t}{2} + \frac{1}{6} \quad 4.3$$

$$E_1(t) = \frac{t^3}{2} - t^2 + \frac{2}{3} \quad 4.4$$

$$E_2(t) = -\frac{t^3}{6} + \frac{t^2}{2} + \frac{t}{2} + \frac{1}{6} \quad 4.5$$

$$E_3(t) = \frac{t^3}{6} \quad 4.6$$

Cada segmento es definido por cuatro puntos de control, dos segmentos vecinos comparten tres puntos de control y tienen uno diferente, entonces para “m” segmentos son necesarios “m+1” nodos y “m+3” puntos de control. Los tres puntos de control compartidos entre los segmentos adyacentes son responsables por la continuidad de las curvas B-splines cúbicas.

El número de puntos de control excede el número de nodos en dos, Yamaguchi sugirió el uso de condiciones de contorno para poder completar el número de ecuaciones, estas condiciones de contorno están basadas en los tipos de casos que pueden presentarse en las curvas B-spline cúbicas, estos pueden ser curvas B-spline abiertas o cerradas, como mostrado en la figura (4.2) y en las ecuaciones (4.7) a (4.10).

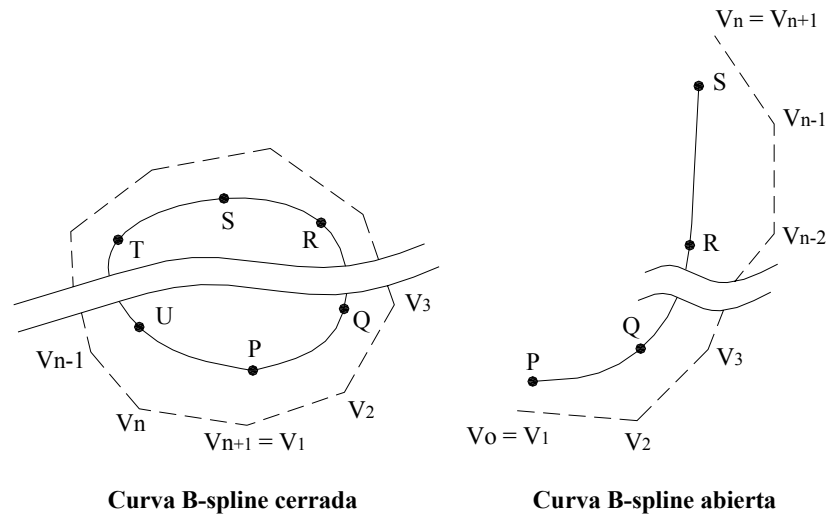


Figura 4.2 – Tipos de Curvas B-spline cúbicas

- **B-spline abierta:**

$$V_0 = V_1 \quad 4.7$$

$$V_{n+1} = V_n \quad 4.8$$

- **B-spline cerrada:**

$$V_0 = V_1 \quad 4.9$$

$$V_{n+1} = V_1 \quad 4.10$$

La representación matemática de la curva B-spline cúbica de la figura (4.1) es obtenida considerando que cada punto o nodo de curva comienza cuando el parámetro “t” es igual a cero, entonces las funciones base quedan expresadas de la como mostrado a continuación:

$$E_0(0) = \frac{1}{6} \quad 4.11$$

$$E_1(0) = \frac{2}{3} \quad 4.12$$

$$E_2(0) = \frac{1}{6} \quad 4.13$$

$$E_3(0) = 0 \quad 4.14$$

Como la última función base $E_3(0)$ es igual a cero cuando $t = 0$, la función matemática que representa la curva B-spline cúbica puede utilizar únicamente tres funciones base, como mostrado a continuación:

$$\bar{P}_{i(0)} = E_{0(0)}\bar{V}_{i-1} + E_{1(0)}\bar{V}_i + E_{2(0)}\bar{V}_{i+1} \quad 4.15$$

La aplicación de la ecuación (4.2) para la representación de la curva B-spline de la figura (4.1) es mostrada en las ecuaciones (4.16) y (4.17).

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \bar{P}_3 \\ \bar{P}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_0(0) + E_1(0) & E_2(0) & 0 & 0 \\ E_0(0) & E_1(0) & E_2(0) & 0 \\ 0 & E_0(0) & E_1(0) & E_2(0) \\ 0 & 0 & E_0(0) & E_1(0) + E_2(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_0 + \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \bar{V}_4 + \bar{V}_5 \end{bmatrix} \quad 4.16$$

Substituyendo las funciones base, ecuaciones en (4.3) a (4.6), en la ecuación (4.16), se tiene la ecuación mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \bar{P}_3 \\ \bar{P}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} + \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} \\ 0 & 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} + \frac{1}{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2\bar{V}_0 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ 2\bar{V}_4 \end{bmatrix} \quad 4.17$$

El procedimiento descrito para la obtención de los puntos de control, puede ser extendido para la representación de curvas de “n” nodos.

4.2.1.1 Longitud de la curva B-spline cúbica

La longitud de cada segmento de la curva B-spline es obtenida a través de la siguiente expresión:

$$Stotal(t) = \sum_{i=1}^N \int_{t_0=0}^{t_f=1} \sqrt{\left(\frac{dx_i(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_i(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_i(t)}{dt}\right)^2} dt \quad 4.18$$

Donde:

N es el número de segmentos que forman la curva B-spline cúbica.

Las derivadas de primer orden de las funciones B-splines que representan las coordenadas de la curva son mostradas a continuación:

$$\frac{dx_i}{dt}(t) = \frac{dE_0}{dt} X_{i-1} + \frac{dE_1}{dt} X_i + \frac{dE_2}{dt} X_{i+1} + \frac{dE_3}{dt} X_{i+2} \quad 4.19$$

$$\frac{dy_i}{dt}(t) = \frac{dE_0}{dt} Y_{i-1} + \frac{dE_1}{dt} Y_i + \frac{dE_2}{dt} Y_{i+1} + \frac{dE_3}{dt} Y_{i+2} \quad 4.20$$

$$\frac{dz_i}{dt}(t) = \frac{dE_0}{dt} Z_{i-1} + \frac{dE_1}{dt} Z_i + \frac{dE_2}{dt} Z_{i+1} + \frac{dE_3}{dt} Z_{i+2} \quad 4.21$$

Las derivadas de primer orden de las funciones base de las funciones

B-spline cúbicas son mostradas a continuación:

$$\frac{dE_0}{dt} = -\frac{t^2}{2} + t - \frac{1}{2} \quad 4.22$$

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{3t^2}{2} - 2t \quad 4.23$$

$$\frac{dE_2}{dt} = -\frac{3t^2}{2} + t + \frac{1}{2} \quad 4.24$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{t^2}{2} \quad 4.25$$

4.3 Discretización de cascos utilizando curvas B-spline cúbicas

Para comenzar la discretización, se necesita pasar curvas B-spline cúbicas por las cuadernas de las líneas de forma del navío a ser analizado. Esto es realizado dividiendo el casco en tres regiones, como mostrado en la figura (4.3). y referenciado a continuación:

- **Región de la proa.-** son capturados los nodos del contorno de la proa del casco sumergido y sobre este contorno es colocada una curva B-spline cúbica.
- **Región media.-** son capturadas todas las cuadernas de la parte media de la superficie sumergida del casco y sobre cada una de estas cuadernas es colocada una curva B-spline cúbica.

- **Región de la popa.-** son capturados los nodos del contorno de la popa del casco sumergido y sobre este contorno es colocado una curva B-spline cúbica.

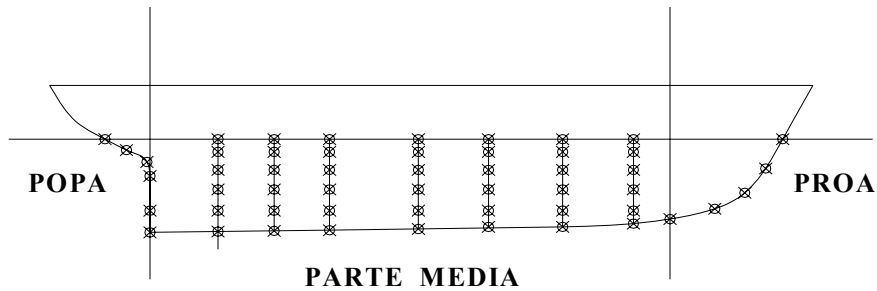


Figura 4.3 – Regiones del casco a ser discretizado

Tomando como ejemplo una cuaderna de la región media como la mostrada en la figura (4.4), el proceso comienza con aproximación de los nodos de la cuaderna con una curva B-spline cúbica.

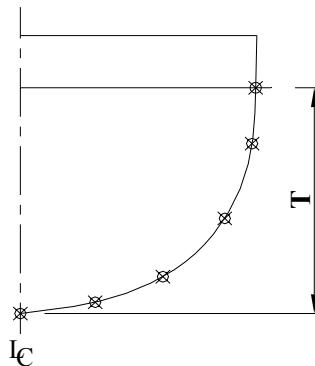


Figura 4.4 – Cuaderna de la región media

Después, es calculada la longitud total de la cuaderna utilizando la ecuación (4.18), esta longitud es dividida entre el número de segmentos transversales (NTran) que se desea tener en la discretización, como mostrado a seguir:

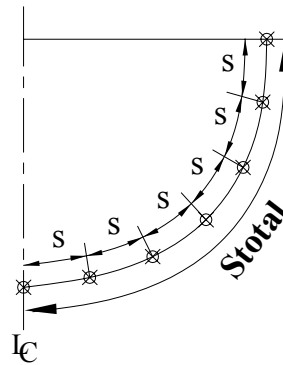


Figura 4.5 – División de una cuaderna de la sección media

$$s = \frac{Stotal}{Ntran} \quad 4.26$$

La ecuación (4.26) fornece la longitud de cada segmento pero no fornece la ubicación del parámetro “t” que define las coordenadas (x,y,z) donde debe terminar un segmento. Para la determinación del parámetro “t”, es necesario utilizar un esquema de iteración basado en el método de la secante, la cual realiza iteraciones sucesivas hasta alcanzar los índices t_j sobre la curva donde la longitud del segmento sea igual a la establecida.

$$f_s(t) = s_n - \int_{t_0}^t \sqrt{\left(\frac{dx_i(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_i(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_i(t)}{dt}\right)^2} dt, \quad n = 1, 2 \dots Ntran \quad 4.27$$

$$t_j = t_{j-1} - f_s(t_{j-1}) \frac{t_{j-1} - t_{j-2}}{f_s(t_{j-1}) - f_s(t_{j-2})}, \quad j = 2, 3 \dots \quad 4.28$$

Donde:

n es el subíndice que indica uno de los segmentos de la división transversal Ntran.

$$s_n = s * n \quad n = 1, 2 \dots Ntran$$

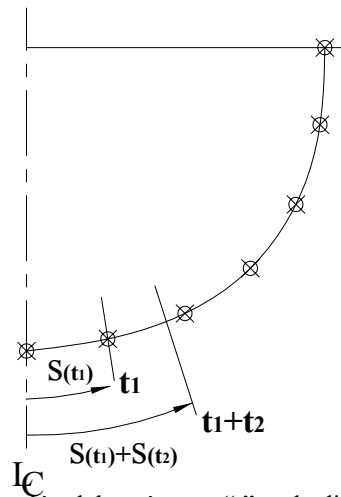


Figura 4.6 – Ubicación del parámetro “ t ” en la división transversal de una sección media

Procedimiento similar es seguido para división de los contorno de proa y popa, estos son aproximados con curvas B-splines cúbicas, después divididos en segmentos de igual longitud y las coordenadas de estos segmentos son obtenidos de igual forma a la descrita anteriormente.

Como paso final son aproximadas curvas B-splines cúbicas longitudinales por los nodos obtenidos con la nueva división de las cuadernas de la región media y los contorno de proa y popa. Nuevas cuadernas son interpoladas siguiendo el mismo proceso para la división transversal, de esta forma puede obtenerse la discretización de la parte sumergida del casco en estudio.

4.3.1 Cascos discretizados

A continuación son mostrados algunos cascos discretizados utilizando la metodología anteriormente descrita, como estos son simétricos en babor y estribor, solamente es necesario discretizar una de las bandas.

4.3.1.1 Casco Wigley

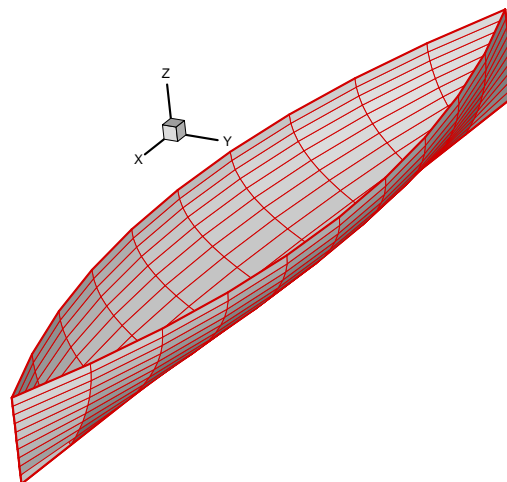
Este es un casco matemático utilizado por Wigley para verificar a aplicabilidad de la teoría del navío fino de Mitchell, este casco es ampliamente utilizado como “benchmark” de diversas aplicaciones tanto numéricas como experimentales, por contar con diversos resultados experimentales realizados por diversos investigadores en laboratorios de todo el mundo en resistencia al avance, dinámica de navíos, etc.

Lwl	1	m
B	0.10	m
T	0.0625	m
Cb	0.4624	
∇	0.00289	m ³

Tabla 4.1 – Características modelo Wigley

a) Discretización 1

Número de segmentos transversales en una banda	:	10
Número de segmentos longitudinales en una banda	:	10
Número de paneles en una banda	:	100



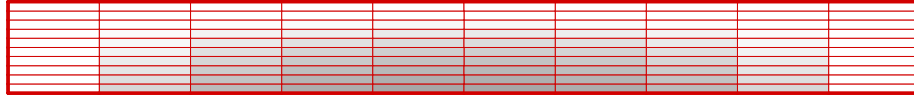


Figura 4.7 – Modelo Wigley – Discretización 1

b)Discretización 2

Número de segmentos transversales en una banda	:	10
Número de segmentos longitudinales en una banda	:	60
Número de paneles en una banda	:	600

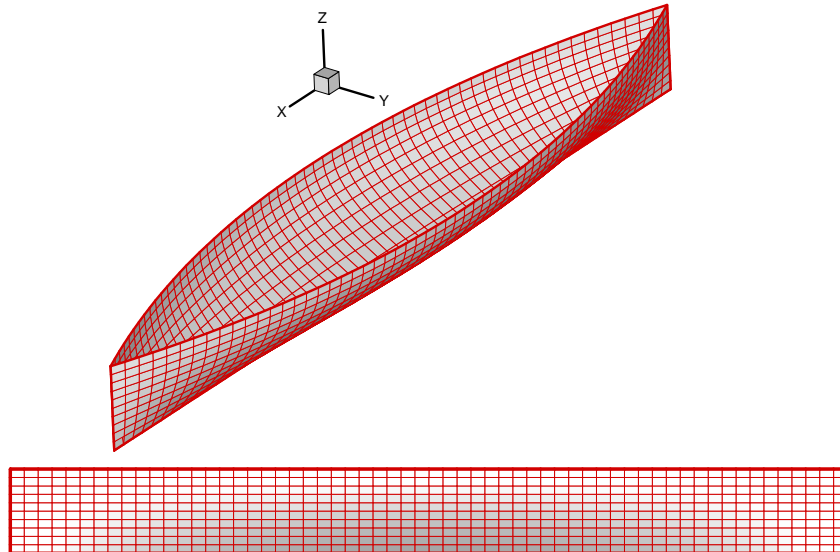


Figura 4.8 – Modelo Wigley – Discretización 2

4.3.1.2 Casco Serie 60 Cb = 0.6

Este es un casco de navíos mercantes, ampliamente utilizado en la literatura especializada como “benchmark” de diversas aplicaciones tanto numéricas como experimentales, por contar con abundantes resultados

experimentales realizados por diversos investigadores en laboratorios de todo el mundo en resistencia al avance, dinámica de navíos, etc.

A continuación se muestra diversas discretizaciones realizadas en un casco de las Serie 60 con $C_b = 0.6$, las características de la superficie mojada de un modelo de este casco son mostradas en la tabla (4.1).

Lwl	1	m
B	0.1428	m
T	0.05715	m
C_b	0.7	
∇	0.00571	m^3

Tabla 4.2 – Características modelo Serie 60 $C_b = 0.6$

a) Discretización 1

Número de segmentos transversales en una banda	:	7
Número de segmentos longitudinales en una banda	:	30
Número de paneles en una banda	:	210

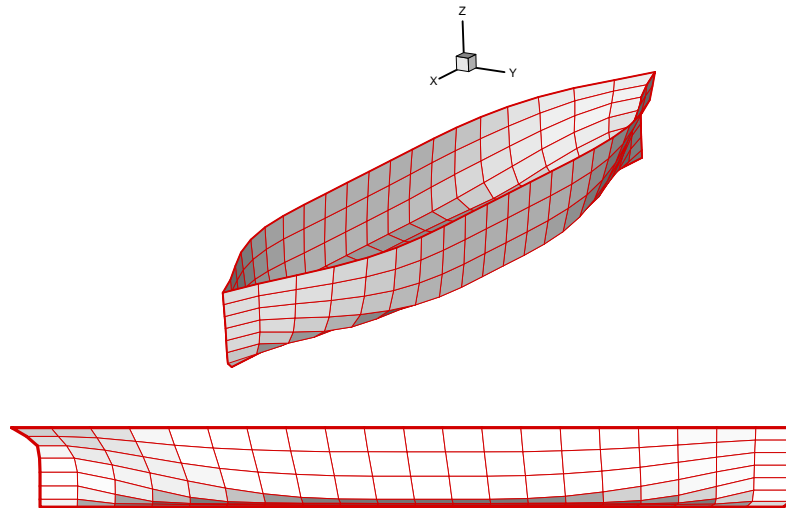


Figura 4.9 – Modelo Serie 60 $C_b = 0.6$ - Discretización 1

b) Discretización 2

Número de segmentos transversales en una banda	:	10
Número de segmentos longitudinales en una banda	:	60

Número de paneles en una banda : 600

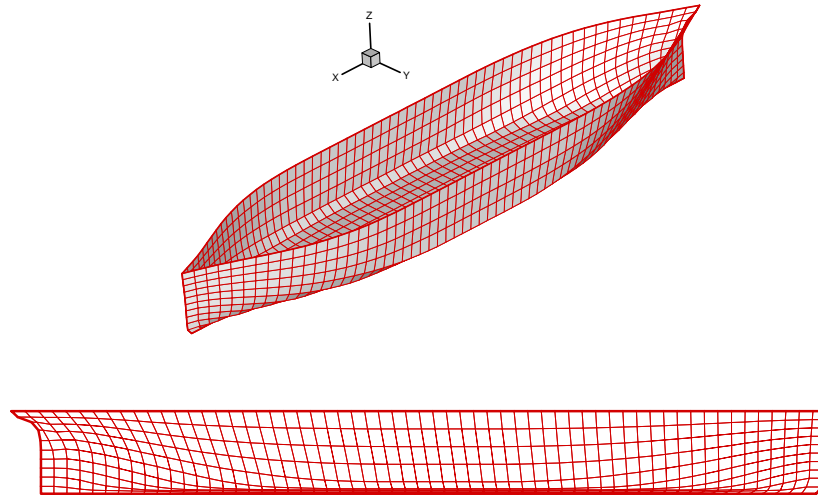


Figura 4.10 – Modelo Serie 60 $C_b = 0.6$ – Discretización 2

4.3.1.3 Casco catamarán de semi-desplazamiento

Los cascos de un catamarán de pasajeros de semi-desplazamiento son discretizados, a continuación se muestra varias discretizaciones realizadas con la metodología descrita en esta capítulo.

Lwl	1	m
Bcasco	0.118	m
Btotal	0.512	m
T	0.0492	m
C_b	0.305	
∇	0.00571	m^3

Tabla 4.3 – Características del modelo del catamarán de semi-desplazamiento

a) Discretización 1

Número de segmentos transversales en una banda de : 8
unos de los cascos

Número de segmentos longitudinales en una banda de : 50
unos de los cascos

Número de paneles en un de los cascos en una banda de : 400
unos de los cascos

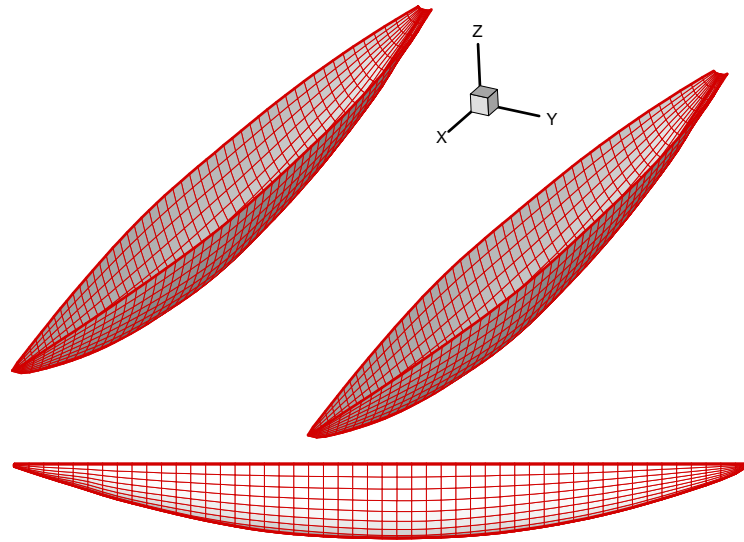


Figura 4.11 – Modelo Catamarán semi-desplazamiento Discretización 1

b)Discretización 2

Número de segmentos transversales en una banda de : 10
unos de los cascos

Número de segmentos longitudinales en una banda de : 100
unos de los cascos

Número de paneles en un de los cascos en una banda de : 1000
unos de los cascos

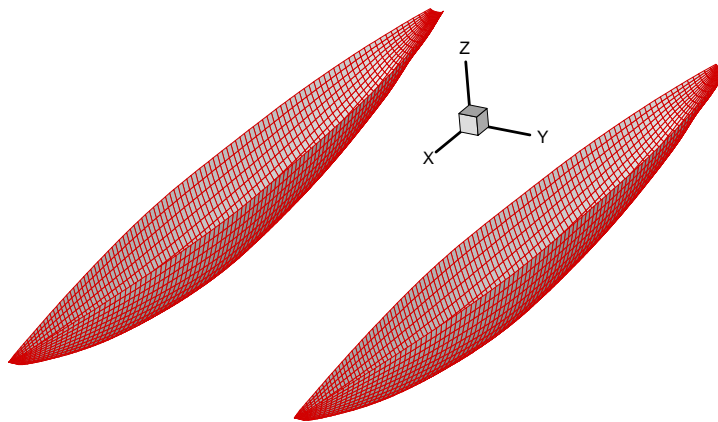
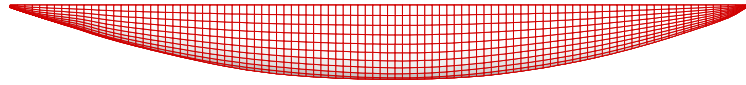


Figura 4.12 – Modelo Catamarán semi-desplazamiento Discretización 2

4.4 Discretización de la superficie libre alrededor del casco

La malla alrededor de la superficie libre necesita ser discretizada para la aplicación del método de los paneles descrito en esta tesis. El criterio para la discretización de la superficie libre, define una malla con dimensiones que garanticen una adecuada representación de las olas generadas tanto en el sentido transversal como en el sentido longitudinal. Los paneles de la superficie libre son caracterizados por su razón de aspecto y por el número de Froude de la malla.

La razón de aspecto es la relación entre la distancia longitudinal (h_x) y la distancia transversal (h_y) del panel, como mostrado a continuación:

$$\alpha = \frac{h_x}{h_y} \quad 4.29$$

El número de Froude de la malla es descrito por la siguiente ecuación:

$$F_h = \frac{U}{\sqrt{g h_x}} \quad 4.30$$

Estos dos parámetros fueron utilizados por Nakos y Sclavounos (1988), para realizar un estudio de estabilidad del esquema de las superficies “spline” bi-cuadráticas utilizadas para representar el potencial de velocidades sobre las superficies discretizadas de la superficie libre y casco sumergido. Estos resultados definen las relaciones entre α e F_h que conducen a la estabilidad del proceso numérico, Fig. 4.20.

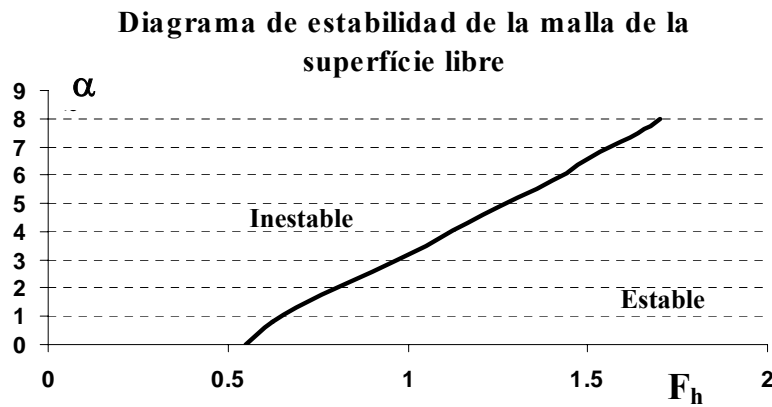


Fig. 4.20 - Diagrama de estabilidad da malla de la superficie libre

La dimensión longitudinal de los paneles de la superficie libre a ser utilizada (h_x) es determinada, en principio por el teorema de Nyquist:

$$N_{Nyq} = \frac{2\pi}{2h_x} \quad 4.31$$

Donde:

N_{Nyq} es el valor máximo número de onda que puede ser representado para un panel de dimensión horizontal h_x .

El número de onda cuando el navío avanza con velocidad constante U es descrito por la siguiente ecuación:

$$N_{Onda} = \frac{g}{U^2} = \frac{2\pi}{\lambda_{Onda}} \quad 4.32$$

Igualando las ecuaciones (4.31) y (4.32), se tiene un valor mínimo de la dimensión longitudinal de los paneles de la superficie libre (h_x) para una determinada velocidad de avance:

$$h_x = \frac{\pi U^2}{g} = \frac{\lambda_{\text{Onda}}}{2} \quad 4.33$$

Los límites de la malla en el sentido transversal y longitudinal influyen sobre manera en la calidad de los resultados numéricos, según el trabajo desarrollado por Nakos (1990) y como comprobado por Domiciano (2002) y Salhua (2004). Las dimensiones de los límites de la malla que ofrecen resultados con buena calidad numérica en una malla como la mostrada en la figura (4.13) son mostradas en la tabla (4.4):

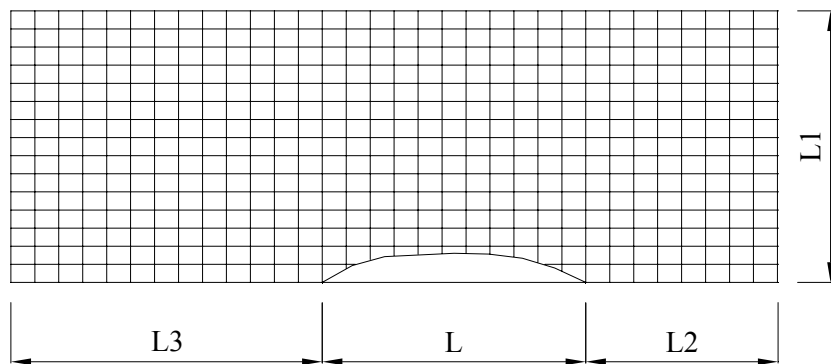


Figura 4.13 – Dimensiones de la malla de la superficie libre

L1	0.80L
L2	0.35L
L3	0.75L

Tabla 4.4 – Dimensiones de la malla de la superficie libre recomendadas

El número de divisiones en la dirección de la proa y popa es obtenido dividiendo la longitud de estos segmentos entre el espaciamiento longitudinal de la discretización de la superficie del casco sumergido.

La división transversal puede ser obtenida utilizando un espaciado regido por una expansión geométrica, esto es realizado para poder disminuir el número de paneles en la dirección transversal en las regiones cercanas al límite transversal de la malla sin afectar la calidad de los resultados, pero en el caso de esta tesis es utilizado un espaciado constante en el sentido transversal de la malla.

Un ejemplo de la malla de la superficie libre con espaciado longitudinal y transversal constante es mostrado a continuación:

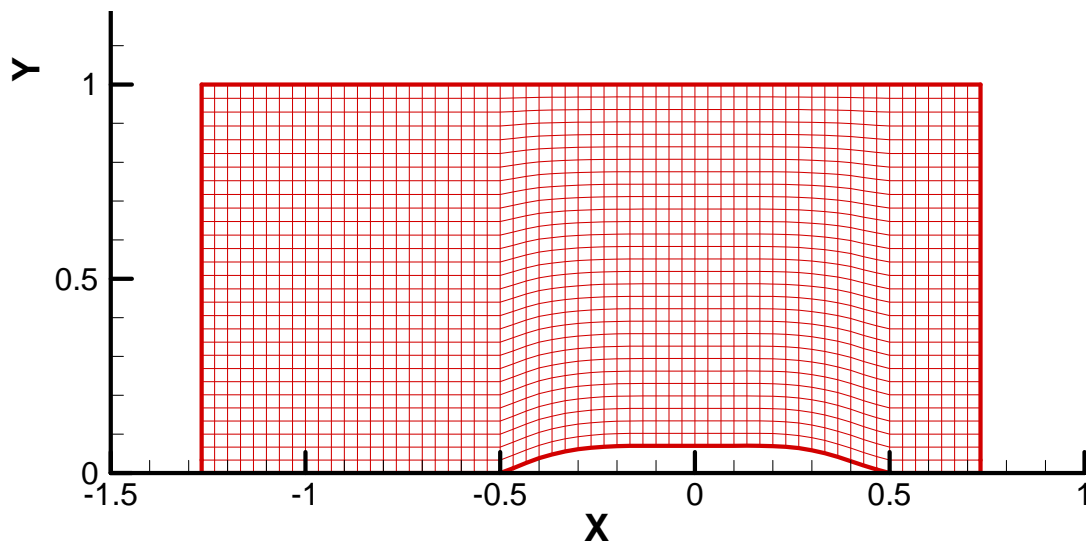


Figura 4.14 – Malla superficie libre modelo de casco Serie 60

CAPÍTULO 5

RESULTADOS NUMERICOS

5.1 Generalidades

La metodología propuesta en los capítulos anteriores fue implementada en un programa en lenguaje Visual Fortran 90 denominado **SHIPWAVE**, este programa está dividido en dos módulos, el primer módulo permite discretizar la geometría de casco de desplazamiento y el segundo módulo permite evaluar la Resistencia por Formación de Olas de los navíos discretizados, además de calcular la elevación de la superficie libre.

La validación del programa **SHIPWAVE** es realizada comparando los resultados obtenidos utilizando las dos linealizaciones de la superficie libre estudiadas en los capítulos 2-3 con resultados experimentales disponibles en la literatura especializada.

Se comienza con la validación del potencial base, el cual es equivalente al potencial de velocidades que representa el flujo alrededor de cuerpos completamente sumergidos, después es realizada la validación de los flujos utilizando superficie libre alrededor de los cascos de desplazamiento avanzando con velocidad de avance constante.

5.2 Resultados para el flujo base

Este flujo es equivalente al flujo alrededor de cuerpos completamente sumergidos, es utilizado el método desarrollado por Hess & Smith (1964) para su determinación. Este flujo es utilizado para linealizar las condiciones de contorno de la superficie libre.

5.2.1 Esfera sumergida en presencia de flujo incidente

La solución analítica del potencial de velocidades del flujo alrededor de una esfera sumergida en presencia de un flujo incidente con velocidad uniforme U es dada por la siguiente ecuación:

$$\phi_o = -\frac{UR^3}{2} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1.5}} \quad \mathbf{5.1}$$

Donde :

(x,y,z) son las coordenadas de la superficie de la esfera.

U es la velocidad del flujo incidente sobre la esfera.

R es el radio de la esfera.

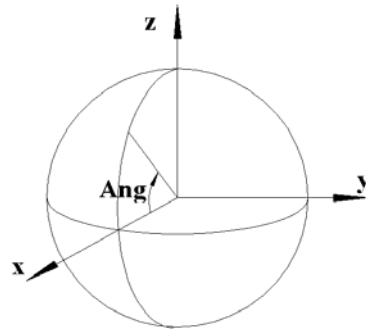


Fig. 5.1 - Esfera con ángulo meridional (Ang)

A continuación son mostrados resultados para el potencial de velocidades, distribución de presiones sobre un ángulo meridional cualquiera, así como la elevación base que una esfera de radio unitario provoca sobre la discretización de la malla de la superficie libre. Debido a la simetría transversal de la geometría de la esfera (igual que los navíos) y la simetría del flujo, se discretiza únicamente la mitad de la superficie del cuerpo como mostrado en la figura (5.2).

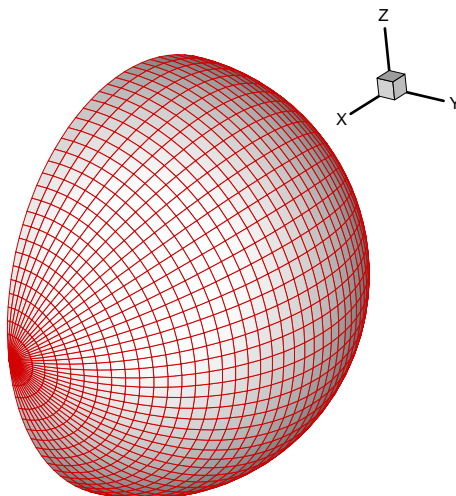


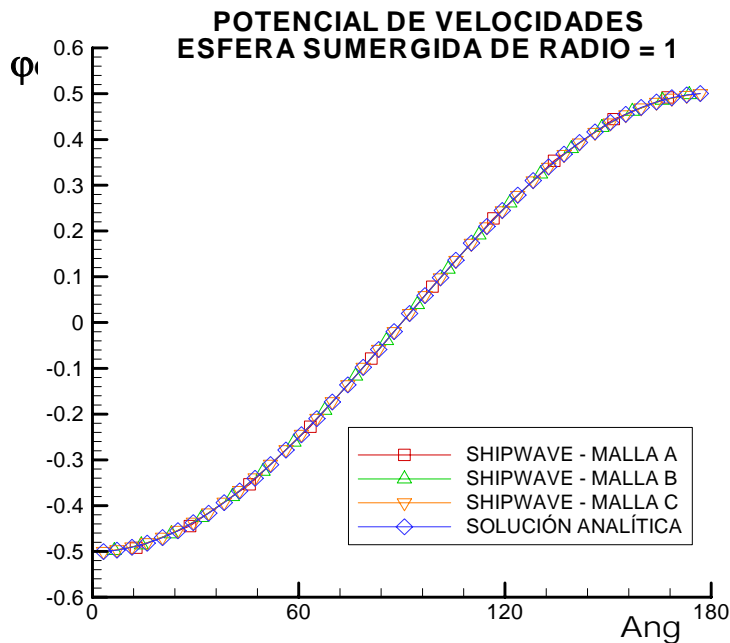
Fig. 5.2 – Discretización de una esfera de radio unitario discretizada

Las características de las mallas utilizadas para representar la superficie de la esfera son mostradas en la tabla (5.1).

Malla	Paneles en el cuerpo	Paneles Totales
A	10 x 10	100
B	20 x 20	400
C	50 x 20	1000

Tabela 5.1 – Mallas utilizadas en la esfera de radio unitario

5.2.1.1 Potencial de velocidades (ϕ_0)



5.2.1.2 Distribución de presiones (C_p)

Las presiones en la superficie del cuerpo son presentadas en la forma del coeficiente de presión C_p , cuya formulación es presentada en la siguiente ecuación:

$$C_{p(i,j)} = 1 - \left(\frac{V_{T(i,j)}}{U} \right)^2 \quad 5.2$$

Donde :

$C_{p(i,j)}$ es el coeficiente de presión en el punto (i,j).

$V_{T(i,j)}$ es la velocidad total en la superficie del casco en el punto (i,j).

U es la velocidad del flujo incidente.

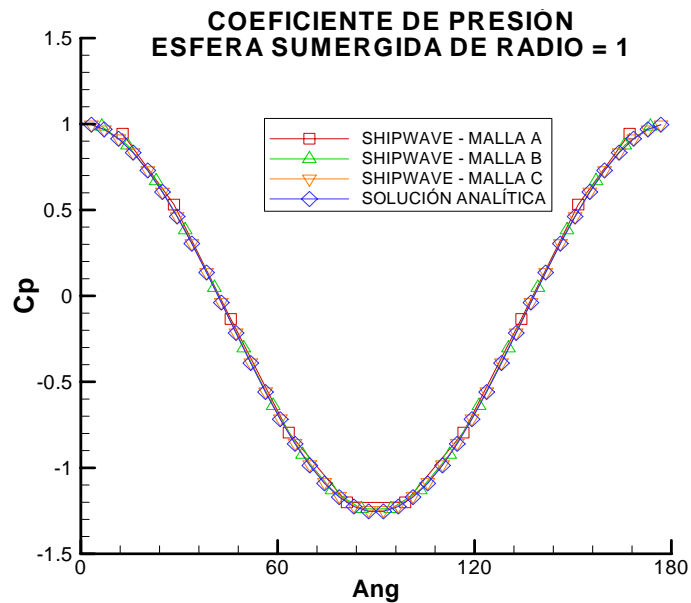


Fig. 5.4 – Coeficiente de presión de una esfera de radio unitario

De la figura (5.4) se comprueba que no existe diferencia de presiones entre la proa y popa, lo cual era esperado debido a la paradoja de D’Alambert.

5.2.3.3 Elevación base (ζ_0)

Para determinar la deformación base generada por una esfera en la malla de la superficie libre se utiliza una malla del tipo polar, debido a que se ajusta mejor a la curvatura de la forma de la esfera.

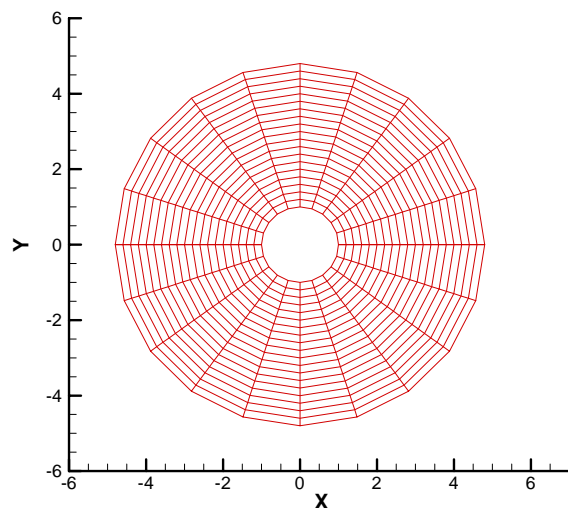


Fig. 5.5 – Malla polar para la esfera

Las siguientes mallas de paneles son utilizadas para determinar la elevación base:

Caso	Paneles Cuerpo	Paneles Superficie Libre	Paneles Totales
Esfera 1	100	190	290
Esfera 2	400	380	780
Esfera 3	800	950	1750
Esfera 4	1000	760	1760

Tabla 5.2 – Casos utilizados para la elevación base

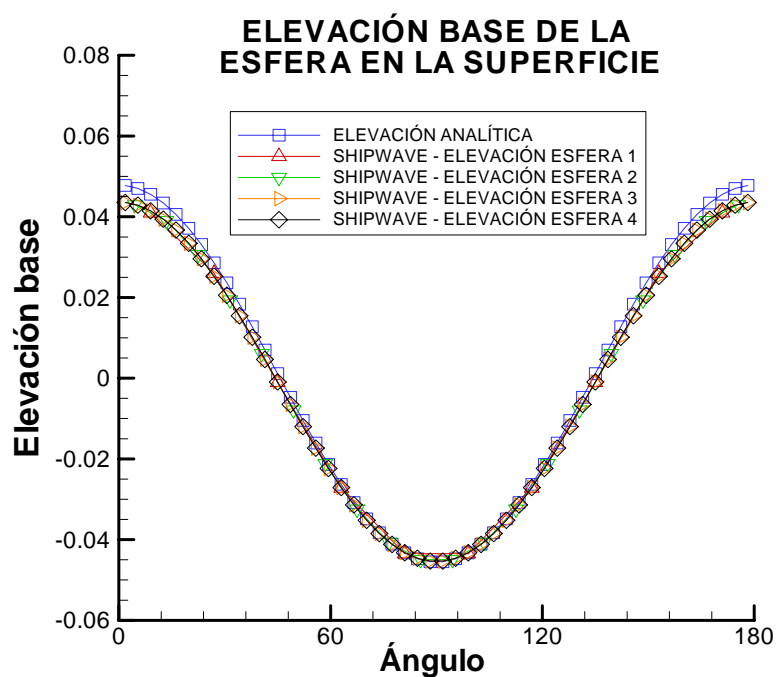


Fig. 5.6 – Elevación base de la superficie libre

La figura (5.6) muestra la elevación base obtenida con la ecuación (2.25) en la primera fila de paneles contigua a la esfera. Puede observarse que la diferencia de presiones en proa y popa de esta elevación base también es nula, cumpliendo las hipótesis de los flujos ideales sin superficie libre y velocidad constante.

A continuación se muestra las elevaciones base y las líneas de corriente alrededor de una esfera.

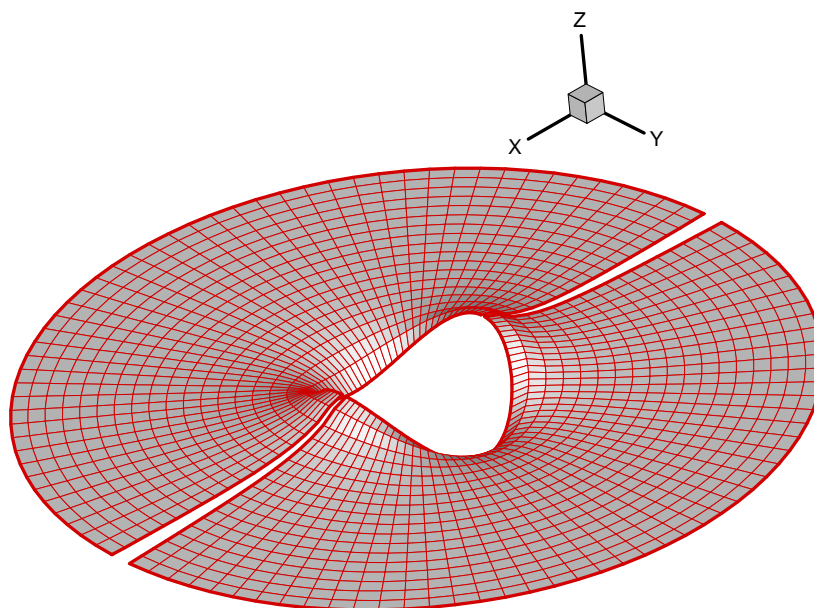


Fig. 5.7 – Elevación base de la esfera

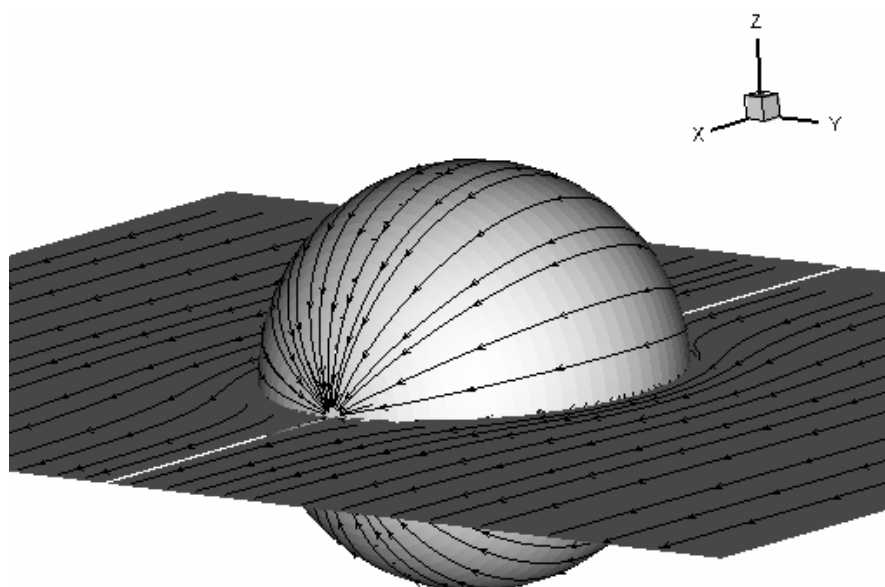


Fig. 5.6 – Líneas de corriente alrededor de la esfera

5.2.2 Casco Wigley en presencia de flujo incidente

Los resultados presentados a continuación muestran el potencial base alrededor de la geometría del casco Wigley, las formas de este casco tienen una definición

matemática mostrada a continuación:

$$y(x, z) = \frac{B}{2} \left[1 - \left(\frac{z}{T} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{2(x - L/2)}{L} \right)^2 \right] \quad 5.3$$

Donde:

L es la eslora total del navío (Loa).

B es la manga del navío.

T es el calado del navío.

$y(x, z)$ es la semi-manga del navío en las coordenadas x e z.

5.2.2.1 Distribución de presiones (C_p)

La distribución de presiones a un determinado calado del casco Wigley es mostrada en la figura 5.7, se observa que no existe diferencia de presiones entra la proa e popa, por lo que no existe ningún tipo de resistencia al avance, cumpliendo la paradoja de D'Alambert.

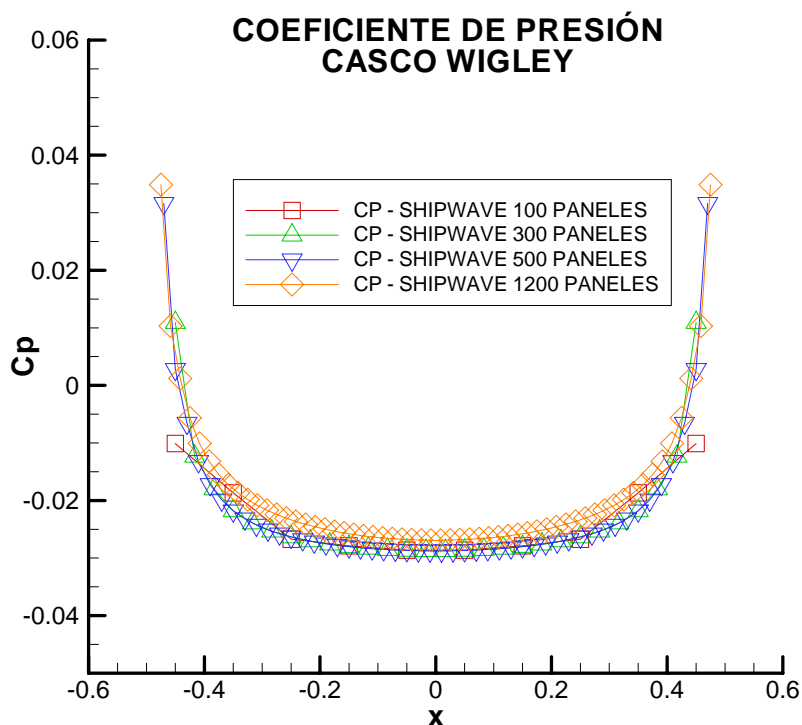


Fig. 5.7 – Coeficiente de presión del casco Wigley a una distancia $z = 0.009375$ debajo de la línea de agua

5.2.2.2 Elevación base (ζ_0)

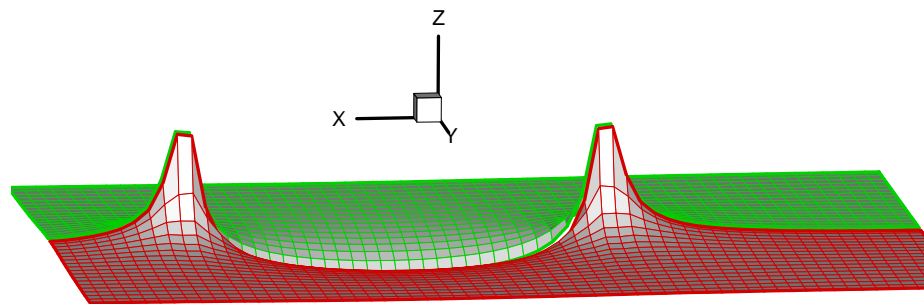


Fig. 5.8 – Deformación base de la superficie libre

5.3 Flujos en presencia de superficie libre

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con las dos linealizaciones de la superficie libre utilizadas, primero es realizado un ensayo de convergencia de la malla de la superficie libre utilizando diversas discretizaciones del casco Wigley y superficie libre. Después son realizadas comparaciones de los resultados obtenidos numéricamente con resultados experimentales de los cascos pertenecientes a una esfera sumergida, Wigley, Serie 60 $C_b = 0.6$ y catamarán Wigley.

5.3.1 Ensayo de Convergencia de las Mallas Utilizadas

Este ensayo es realizado para determinar el comportamiento de la Resistencia por Formación de Olas con el número de paneles a ser utilizado en la solución. Las dimensiones de la malla de la superficie libre adoptadas para este ensayo son las mostradas en la tabla (4.4) del capítulo 4. El número de paneles del cuerpo y la superficie libre es variado para la realización de este ensayo, las mallas utilizadas son mostradas en la siguiente tabla:

Malla	Paneles en el casco	Paneles en la superficie libre	hx	F_h ($F_n = 0.2/0.4$)	α	Estabilidad (Figura 4.20)	Paneles Totales
A	20 x 8	574	4.99e-2	0.894/1.788	1	Estable	734
B	30 x 8	1323	3.33e-2	1.095/2.191	1	Estable	1563
C	40 x 8	2436	2.49e-2	1.265/2.529	1	Estable	2756

Tabla 5.3 – Mallas utilizadas para el ensayo de convergencia

5.3.1.1 Convergencia con la linealización de la superficie libre de Neuman-Kelvin

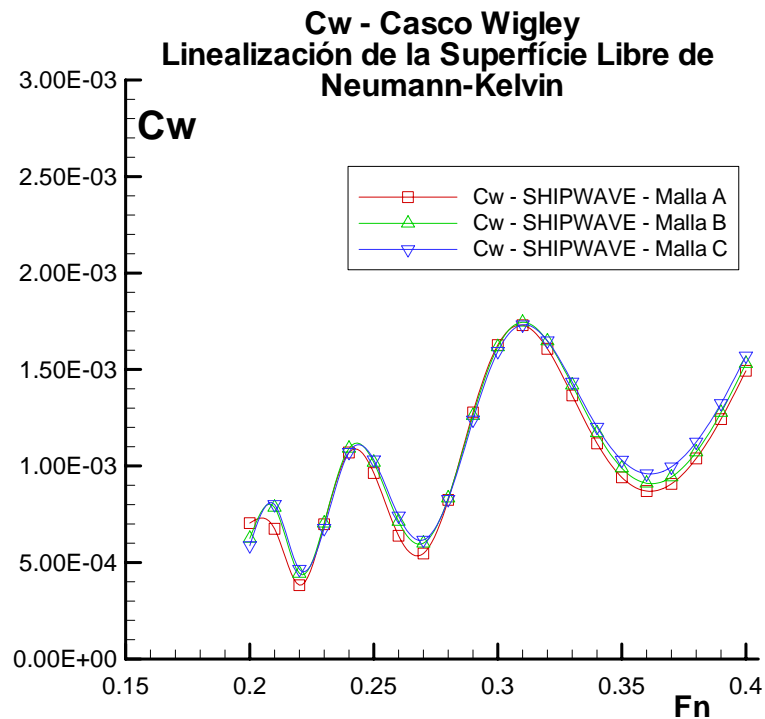


Fig. 5.9 – Convergencia de la linealización de Neuman-Kelvin

De la figura (5.9) se puede observar una tendencia de convergencia conforme aumenta el número de paneles, la diferencia cuantitativa entre todas las curvas no es muy significativa. Puede observarse las crestas y

valles de la curva debido a la interferencia positiva e negativa de las olas del tren de olas formado.

5.3.1.2 Convergencia con la linealización de la superficie libre del Casco Doble

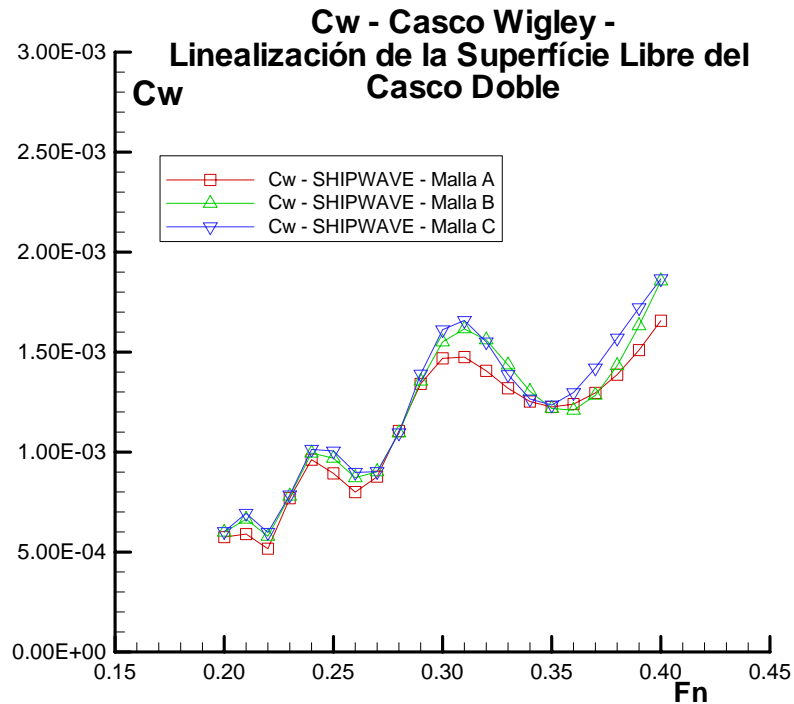


Fig. 5.10 – Convergencia de la linealización del Casco Doble

De la figura (5.10) se puede observar que la convergencia de la curva de Resistencia por Formación de Olas es mayor a bajos número de Froude (0.20-0.35), lo cual es coherente con la linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre del Casco Duplo, basada en la “teoría del navío lento”.

5.3.2 Linealización de la superficie libre de Neuman-Kelvin

5.3.2.1 Esfera sumergida avanzando con velocidad de avance constante

Resultados obtenidos con el método numérico implementado son mostrados para una esfera sumergida de radio unitario,

desplazándose con velocidad constante U , a una profundidad h (centro), e estos resultados son comparados con resultados analíticos del Coeficiente de la Resistencia por Formación de Olas para una esfera sumergida, Salhua (2004) e Dominicano (2002).

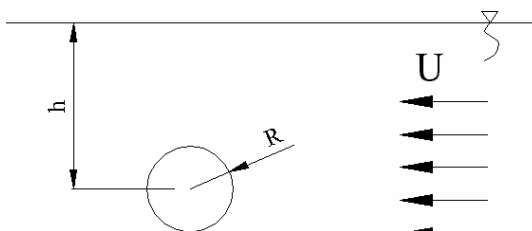


Fig. 5.11 - Esfera totalmente sumergida en presencia de superficie libre

Las dimensiones de la malla de la superficie libre tienen que ser lo suficientemente grandes para evitar que los contornos de la malla interfieran sobre los resultados obtenidos, en este trabajo de tesis se adopta las dimensiones utilizadas por Domiciano (2002) y Salhua (2004), las cuales son mostradas en la tabla (5.4).

Nro. Paneles Dirección x	Nro. Paneles Dirección y	Nro. Total de Paneles	X_{\min} (m)	X_{\max} (m)	Y_{\max} (m)	h_x (m)	h_{y0} (m)	r_{geo_y}
89	19	1691	15	-38.4	20	0.6	0.6	1.242

Tabla 5.4 – Características de la malla de la superficie libre para una esfera sumergida avanzando

Los resultados numéricos obtenidos con el programa **SHIPWAVE** son comparados con resultados teóricos encontrados en los trabajos de Salhua (2004) y Domiciano (2002), esta comparación es reproducida en la

figura (5.10). Son mostrados también el tren de olas generado por el avance de la esfera sumergida.

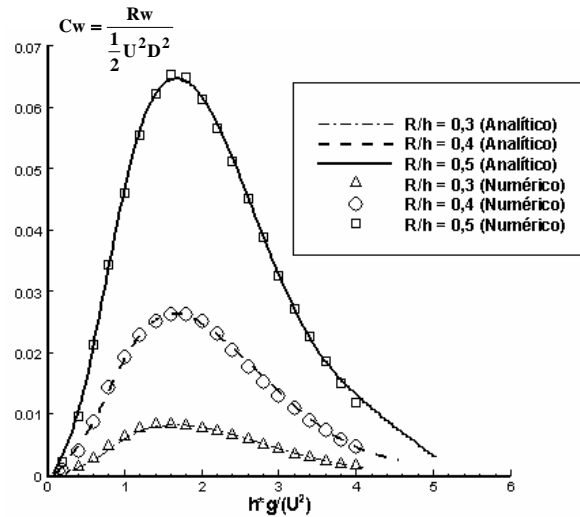


Fig. 5.12 - Esfera totalmente sumergida en presencia de superficie libre

De la figura (5.12) puede observarse que los resultados numéricos obtenidos con el programa **SHIPWAVE** presentan buena calidad cualitativa y cuantitativa para todo el rango de velocidades y profundidades consideradas cuando comparados con los resultados analíticos.

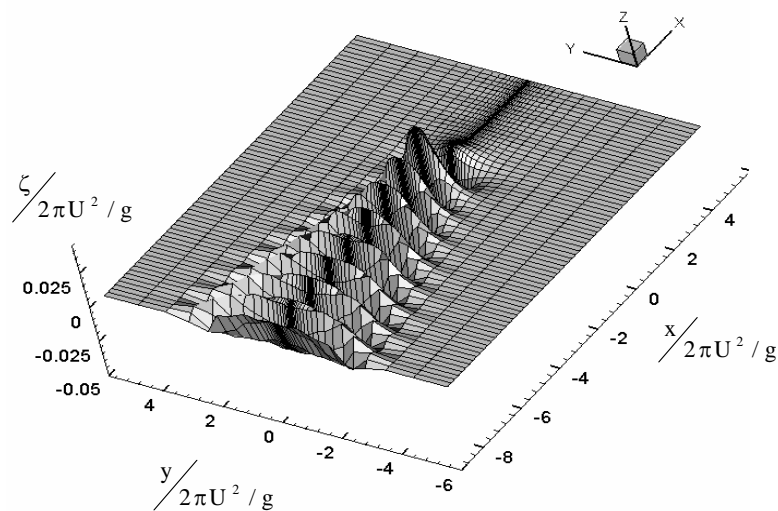


Fig. 5.13 - Elevación de la superficie libre para la esfera totalmente sumergida con $R/h = 0.5$ $g \cdot h/U^2 = 4.0$

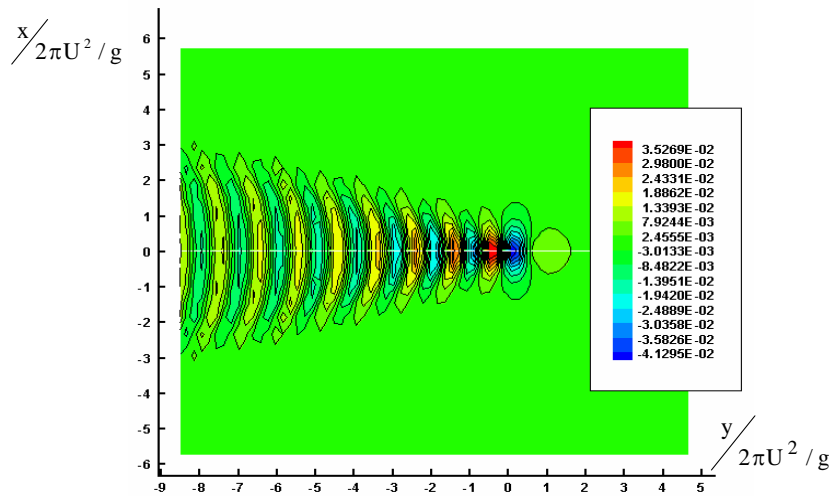


Fig. 5.14 - Curvas de nivel da superficie libre para a esfera totalmente sumergida con $R/h= 0.5$ - $gh/U^2 = 4.0$

Las figuras (5.13) y (5.14) representan las elevaciones de la superficie libre en la vista tridimensional y curvas de nivel, respectivamente. Se puede observar que la perturbación de la superficie libre es concentrada en una región específica y no en toda la superficie libre, como ocurre en el caso real.

5.3.2.2 Casco Wigley con velocidad de avance constante

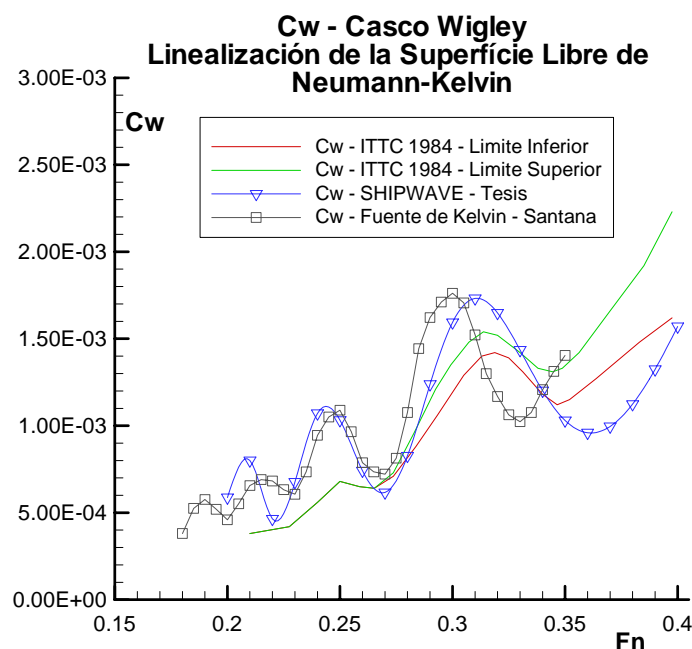


Fig. 5.15 Curva de resultados experimentales de la ITTC 1984 vs. Presente Método

De la figura (5.15), se observa buena adherencia cualitativa entre los resultados numéricos obtenidos con el presente método y los resultados experimentales, los dos representan adecuadamente las crestas y valles de la curva de C_w vs. Froude hasta el número de Froude igual a 0.34. Después de este número de Froude los resultados numéricos presentan un desfaseamiento en relación al resultado experimental. Se observa también una adherencia cuantitativa satisfactoria para esa faja del número de Froude. Los resultados numéricos obtenidos utilizando un esquema de solución basado en la fuente de Kelvin, Santana (1992), fueron comparados con los resultados obtenidos con el presente método. Puede observarse que cuantitativamente ambos resultados son parecidos, los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** presentan mejor comportamiento a partir del número de Froude 0.3.

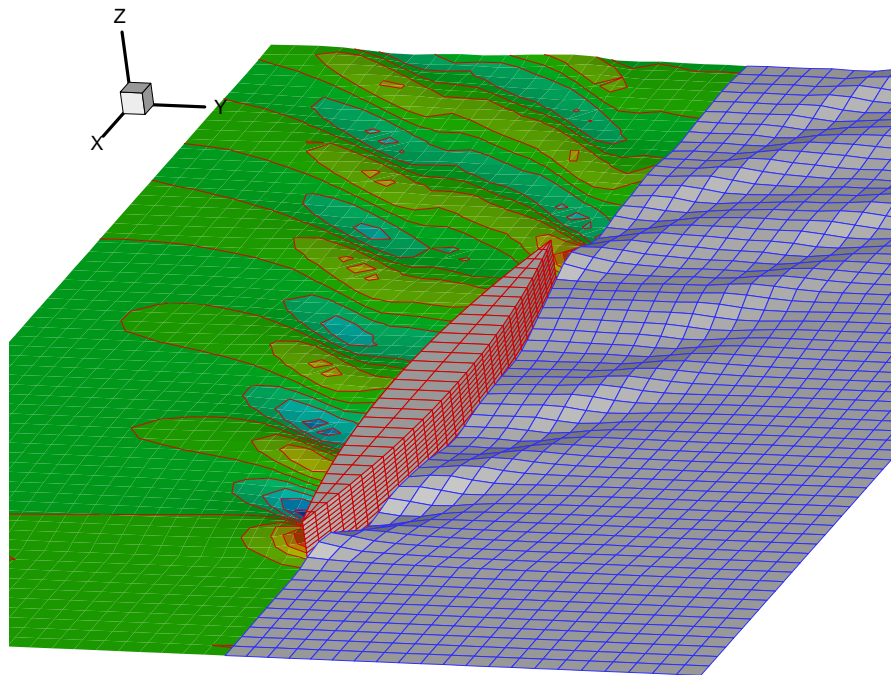


Fig. 5.16 – Elevación de la superficie libre casco Wigley
 $F_n = 0.23$

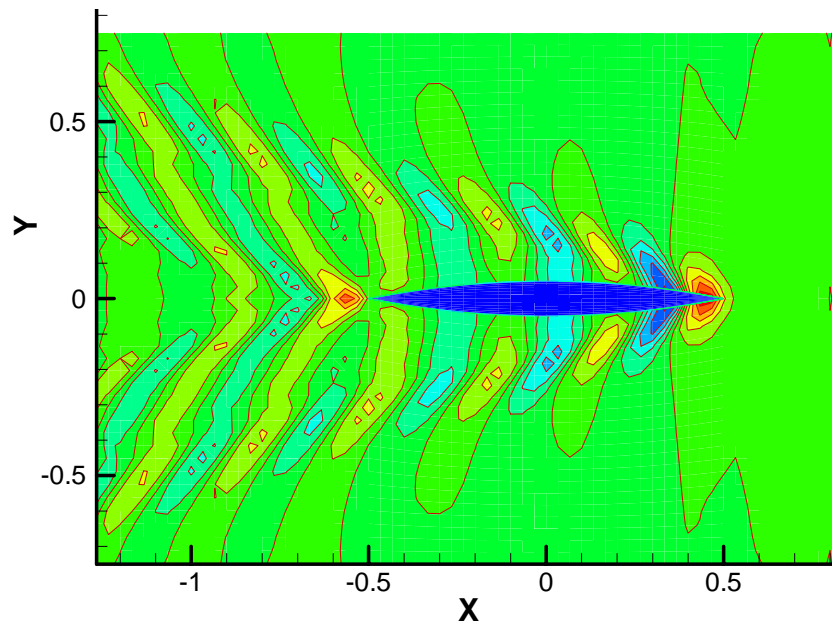


Fig. 5.17 – Curvas de Nivel – Elevación de la superficie libre –
Wigley $F_n = 0.23$

Las figuras (5.16) y (5.17) muestran las elevaciones de la superficie libre vista desde una perspectiva tridimensional y de curvas de nivel, este tipo de gráficos es importante para analizar el efecto de las olas generadas sobre las instalaciones costeras o ribereñas y verificar que la ola generada en la proa no sobrepase el franco bordo.

5.3.2.3 Catamarán Wigley con velocidad de avance constante

Los resultados obtenidos con este programa fueron comparados con los resultados experimentales de Inui y los resultados numéricos de Yang, referenciados en Yang (2004), para un modelo de catamarán hecho con cascos Wigley. Las características del modelo ensayado y los cascos del catamarán Wigley son mostrados a continuación:

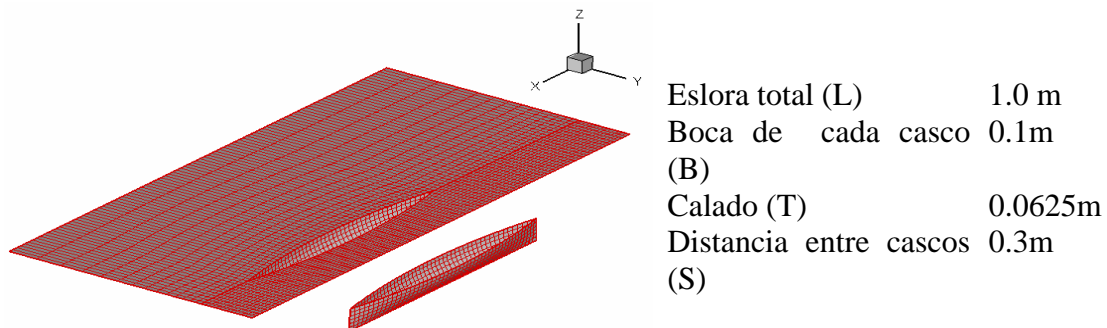


Fig. 5.18 - **Discretización e dimensiones de los cascos del catamarán Wigley**

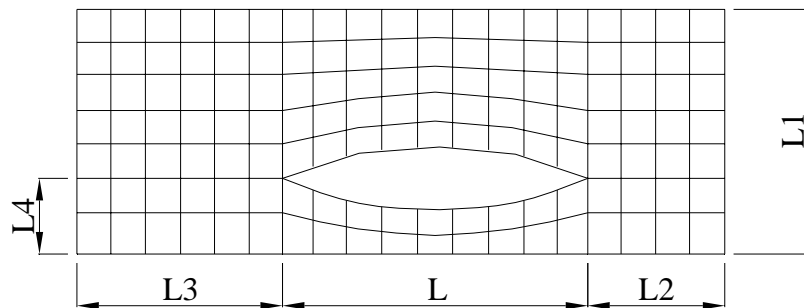
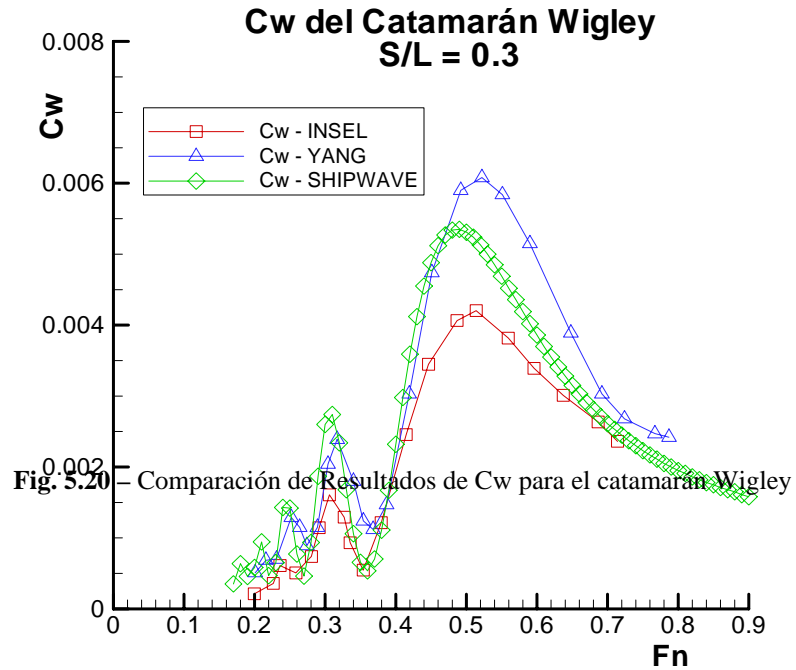


Figura 5.19 – Dimensiones de la malla utilizada en el catamarán Wigley

Item	Nro. de paneles	L1	0.90L
Cada casco	640	L2	0.25L
Superficie libre	2128	L3	0.80L
		L4	0.15L

Tabla 5.5 – Características de la malla utilizada en el catamarán Wigley



De la Figura (5.20) se observa que los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** presentan buena adherencia a los resultados experimentales en todo el intervalo de números de Froude considerados. Los resultados numéricos obtenidos por Yang (2004) y el presente trabajo, presentan similar comportamiento cuantitativo y cualitativo.

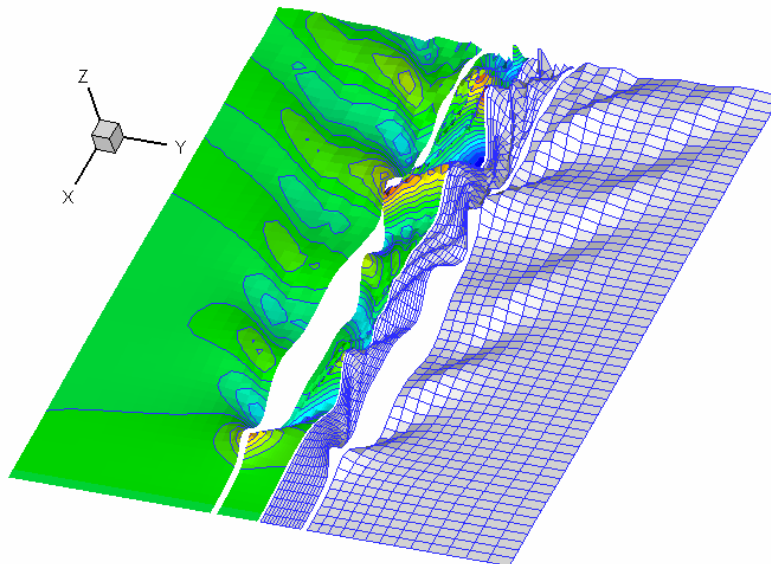


Fig. 5.21 – Elevación de la superficie libre del catamarán Wigley
Fn = 0.25

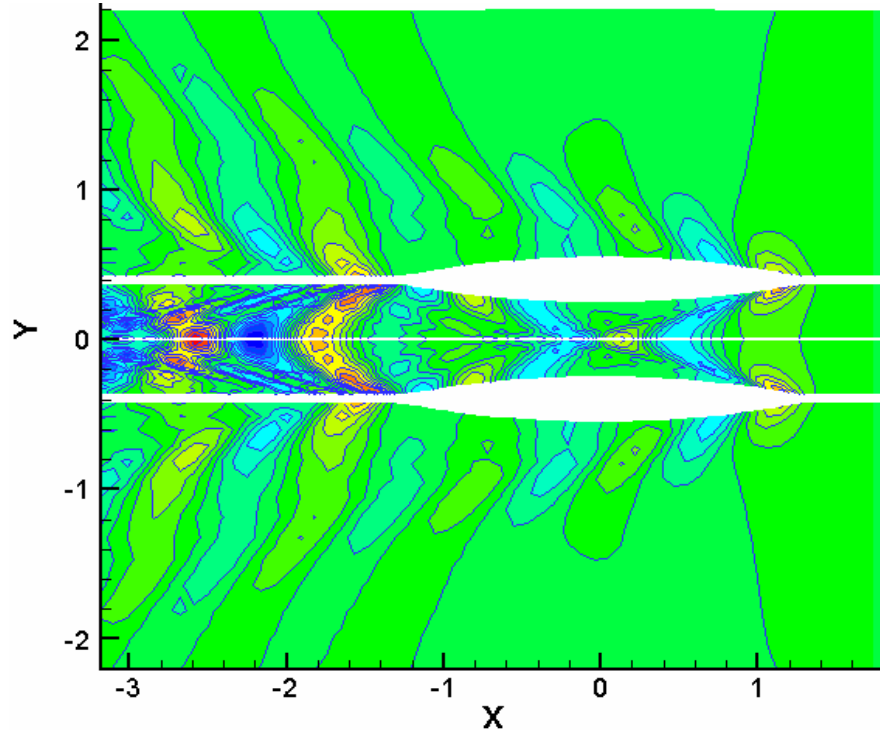


Fig. 5.22 – Curvas de nivel de la superficie libre del catamarán Wigley - $F_n = 0.25$

5.3.3 Linealización de la superficie libre del Casco Doble

La aplicación del flujo alrededor del Casco Doble para la linealización de las condiciones de contorno de la superficie libre es utilizada para la representación de flujos alrededor de navíos llenos. Porque el flujo del casco doble se asemeja al flujo de agua real alrededor del casco a bajas velocidades. Por esta razón la aplicación de esta linealización también es conocida como la “teoría del navío lento”.

5.3.3.1 Casco Wigley con velocidad de avance constante

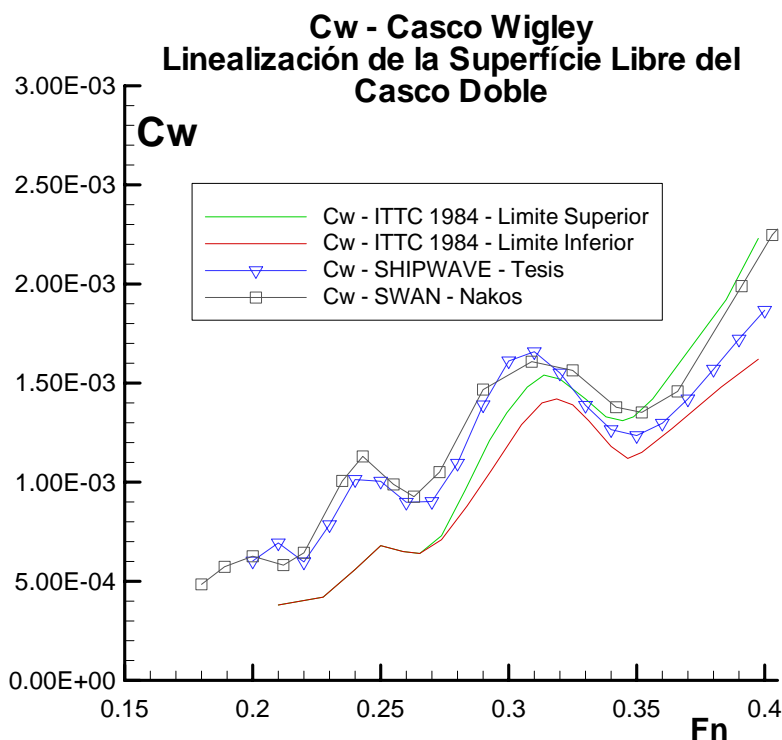


Fig. 5.23 – Comparación de los resultados de Cw para el casco Wigley - linealización del Casco Doble

De la figura (5.19) puede observarse que los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** consiguen representar satisfactoriamente las crestas y valles de la curva de Resistencia por Formación de Olas. El comportamiento cuantitativo al comparar los resultados numéricos y experimentales mejora a partir del número de Froude 0.26. El comportamiento cualitativo para números de Froude inferiores a 0.26 entre las curvas numéricas y experimentales es bastante adecuado. La diferencia cuantitativa entre los resultados numéricos y experimentales es similar a la obtenida por otros métodos, como los resultados del programa SWAN desarrollado por Nakos (1990) y mostrado en la figura (5.19).

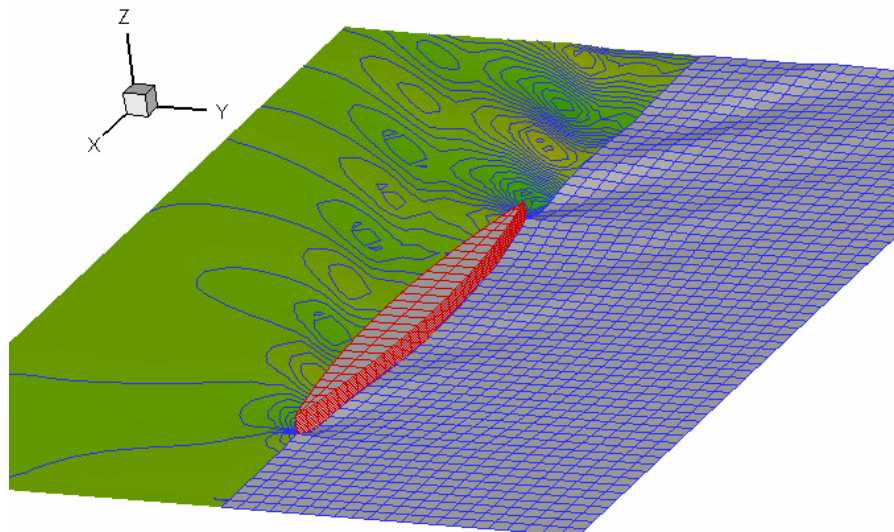


Fig. 5.24 – Elevación de la superficie libre del casco Wigley
Linealización del Casco Doble - $F_n = 0.25$

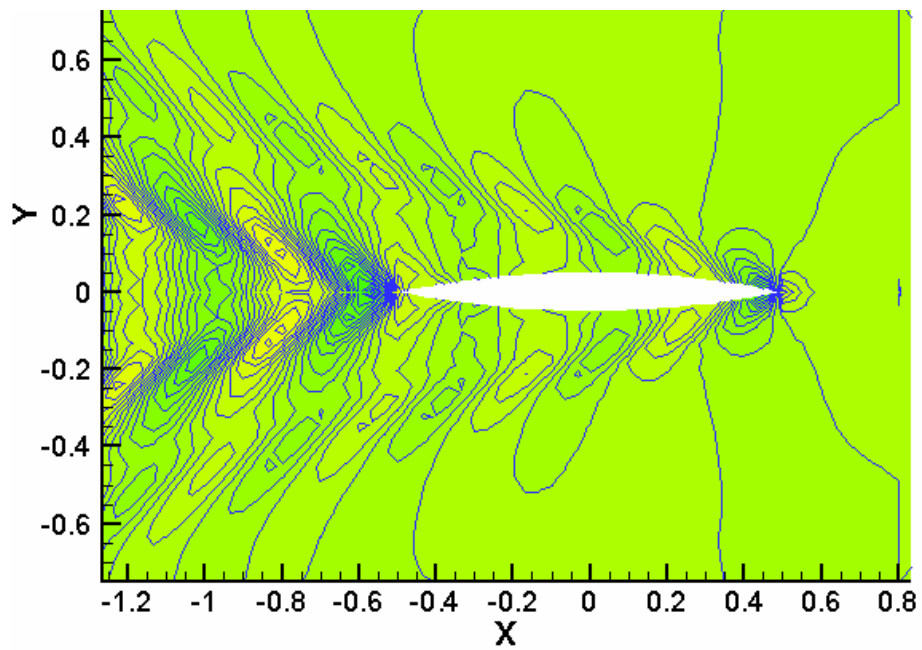


Fig. 5.25 – Curvas de nivel de la superficie libre del casco Wigley
Linealización del Casco Doble - $F_n = 0.25$

5.3.3.2 Casco Serie 60 $C_b = 0.6$ con velocidad de avance constante

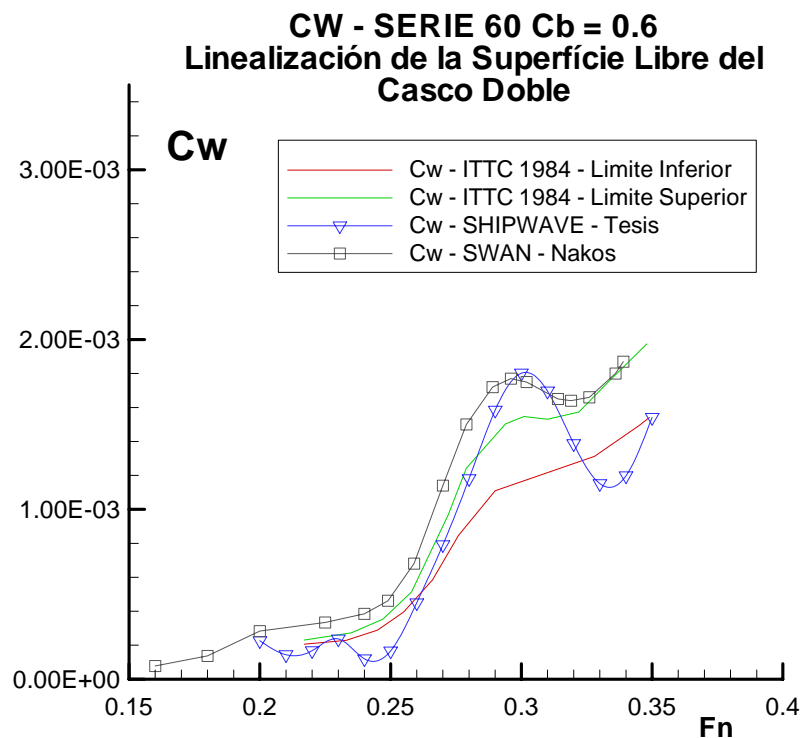


Fig. 5.26 – Comparación de los resultados de C_w para el casco Serie 60 $C_b = 0.6$ - Linealización del Casco Doble

De la figura (5.20) puede observarse que los resultados obtenidos utilizando el programa **SHIPWAVE** presentan buena adherencia cuantitativa con los resultados experimentales en casi todo el rango de números de Froude considerados.

A partir del número de Froude 0.35, existe un valle en la curva de resistencia, obtenida por el presente método, mayor al presentado por los resultados experimentales, pero la diferencia cuantitativa no es muy significativa. La diferencia presente entre los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** y **SWAN** se debe posiblemente al número de paneles utilizados en el cálculo, siendo que la cantidad de paneles utilizados

en el programa SWAN fue mucho mayor al utilizado por el presente método, debido a la capacidad del computador personal utilizado para realizar los cálculos.

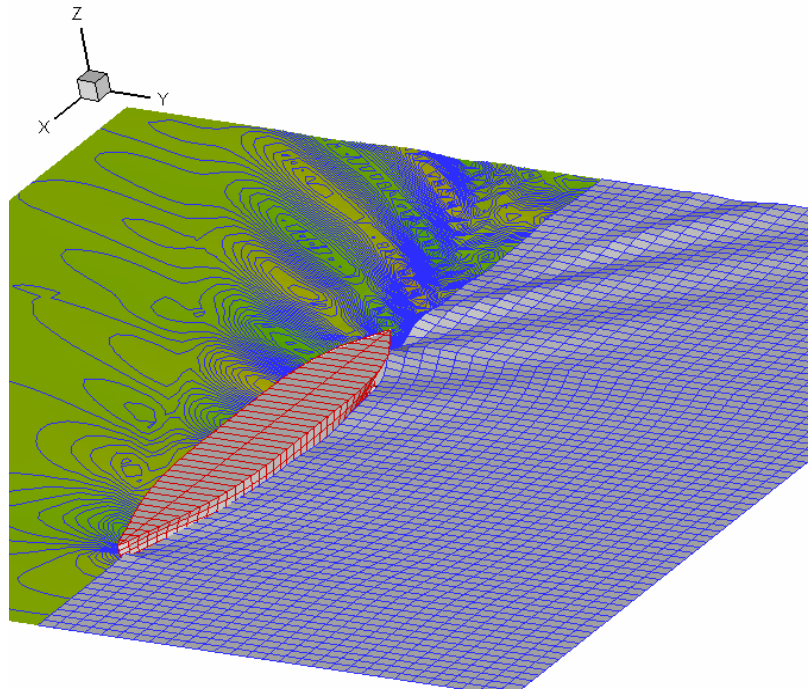


Fig. 5.27 – Elevación de la superficie libre del casco Serie 60 – $C_b=0.6$ Linealización del Casco Doble - $F_n = 0.25$

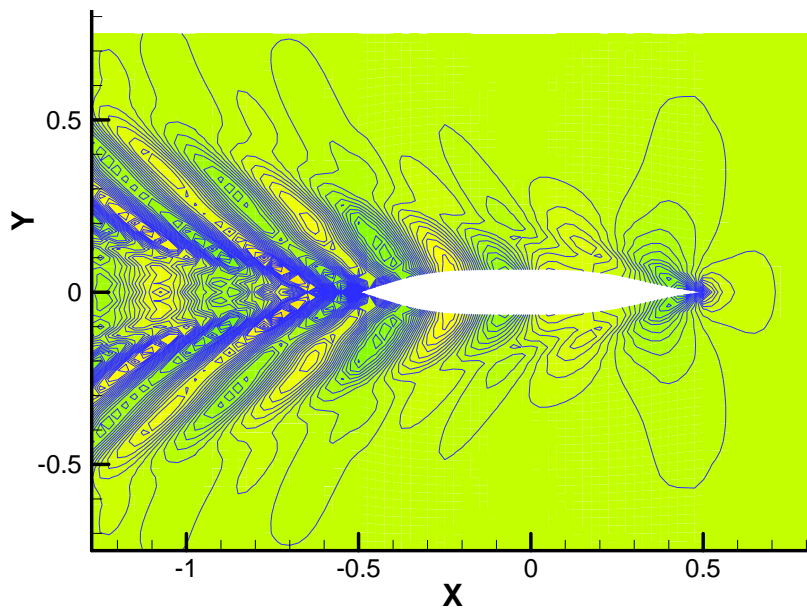


Fig. 5.28 – Elevación de la superficie libre del casco Serie 60 – $C_b = 0.6$ Linealización del Casco Doble - $F_n = 0.25$

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN PRÁCTICA: MODIFICACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN CATAMARÁN DE PASAJEROS

6.1 Generalidades

Cuando el Ingeniero Naval sea contratado para diseñar las alteraciones a ser realizadas en el sistema de propulsión de determinada embarcación, él debe de saber evaluar e identificar cual tipo de método es el más adecuado para determinar la Resistencia al Avance.

En el presente capitulo se describe el método adoptado para la determinación de la Resistencia al Avance de un catamarán de pasajeros y así poder diseñar las modificaciones a ser efectuadas en el sistema de propulsión, debido al cambio de motores por otros de mayor potencia. La embarcación no contaba con resultados experimentales de Resistencia al Avance y ninguno de los métodos estadísticos disponibles (Holtrop, Van Oortmerssen e Compton) podían ser aplicados adecuadamente, debido a que ningún de los métodos mencionados, representaba el incremento de la Resistencia al Avance debido al efecto de la interferencia de las olas formadas por los casco del catamarán. Para poder contornear este problema, la división de la Resistencia al Avance adoptada en el Capitulo 1 párrafo (1.2.3) es utilizada.

La componente de la Resistencia por Formación de Olas fue determinada con el programa **SHIPWAVE**, desarrollado en este tema de tesis. Como visto anteriormente, este programa

esta basado en la Teoría Potencial, la cual representa adecuadamente la formación de las olas de gravedad, entonces puede ser utilizado para obtener la Resistencia por Formación de Olas, considerando la presencia de los dos cascos y de esta forma obtener implícitamente el efecto de la interferencia de las olas formadas por los cascos del catamarán. La Resistencia Viscosa fue aproximada a la resistencia de una placa plana debido la esbeltez de los cascos. La Resistencia de los Apéndices, Rugosidad y del Aire fueron consideradas dentro del cálculo.

Después de determinar la Resistencia al Avance del Catamarán para el calado de diseño, se precedió con el diseño de las hélices y la selección de la relación de reducción para los nuevos motores a ser instalados.

Se analizaron dos alternativas:

- La primera, consistía en el diseño de hélices nuevas junto con otras relaciones de reducción.
- La segunda, consistía en la re-utilización de las hélices originales con los nuevos motores. Para esto, una nueva relación de reducción tenía que ser determinada;

Ambas opciones fueron analizadas y la elección entre las dos alternativas disponibles fue realizada por el armador.

Las hélices de la Serie B de Wageningen fueron utilizadas y diagramas de interacción Casco-Motor-Hélice fueron elaborados para verificar que las hélices seleccionadas no se encuentren sobrecargadas.

6.2 Descripción del problema

El catamarán en estudio presentaba dos configuraciones de operación, las cuales fueron revisadas, porque inicialmente no se sabía si los cascos del catamarán podían alcanzar altas velocidades, estas configuraciones son mostradas a continuación:

- La primera configuración de operación, consistía en la navegación propulsada solamente por los motores principales.
- La segunda configuración de operación consistía en la navegación propulsada por los motores principales y por las velas.

Las velocidades alcanzadas por estas dos configuraciones son mostradas a seguir:

Operación	Vel. (nudos)	Fn	Régimen
Motores	6	0.22	Desplazamiento
Motores y Velas	12	0.43	Semi-desplazamiento

Tabla 6.1 - **Condiciones de operación**

De la Tabla (6.1) se puede observar que la embarcación es capaz de superar el límite de velocidad de las embarcaciones de desplazamiento ($F_n=0.40$), entonces concluyese que los cascos son de semi-desplazamiento y puede alcanzar altas velocidades.

El armador deseaba incrementar la velocidad del catamarán sin el uso de las velas. Se sugirió la instalación de motores de mayor potencia así como nuevas hélices y cajas de reducción, pero el armador sugirió el posible aprovechamiento de las hélices actuales, entonces fueron elaboradas dos alternativas para la modificación del sistema de propulsión:

6.2.1 Alternativa 1

Consiste en el diseño de nuevas hélices y relaciones de reducción para los nuevos motores de mayor potencia.

6.2.2 Alternativa 2

Consiste en la utilización de las hélices originales conjuntamente con los nuevos motores, para esto, nuevas relaciones de reducción son seleccionadas.

6.3 Características Generales de la embarcación



Tipo de embarcación :	Catamarán de pasajeros
LOA :	22.0 m
Lpp :	20.61m
Manga de cada casco (b) :	2.40 m
Puntal (D) :	2.98 m
Calado de diseño (T) :	1.0m
Manga Total (Btotal) :	10.40m
Desplazamiento (Δ) :	30.97 ton

Figura 6.1 - Catamarán de Pasajeros de 22m - Dimensiones

Características del Sistema de Propulsión Original

Las características de los motores diesel marinos de propulsión e las hélices originales son mostrados a continuación:

Motores Principales		Hélices	
Modelo	4.236M	Diámetro	21"
Potencia	88HP a 3000 RPM	Paso	21"
Cantidad	2	Número de palas	3
Reducción	2.61:1	Cantidad	2

Tabla 6.2 – Características del Sistema de Propulsión

6.5 Determinación de la Resistencia al Avance

En esta parte del trabajo, se utilizaran las formulas descritas en el capítulo 1 para lo cual es necesario conocer la eslora mojada y algunas áreas de los cascos. Estas son mostradas a continuación:

Eslora mojada (L_{wl})	20.318 m
Superficie mojada total (S)	83.851 m ²
Superficie de apéndices (S_{ap})	17.34 m ²
Superficie proyectada de la obra muerta (A_{VT})	23.94 m ²

Tabla 6.3 - Superficies

6.5.1 Resistencia Viscosa (R_v) y Adicional (R_a)

Sustituyendo las áreas de la tabla (6.3) en las ecuaciones (1.3) a (1.12), se obtiene los valores para la Resistencia Viscosa y Adicional.

6.5.2 Resistencia por Formación de Olas (R_w)

El programa **SHIPWAVE** es utilizado para su determinación, para lo cual, los cascos del catamarán y la superficie libre alrededor de ellos son discretizados, figura (6.2).

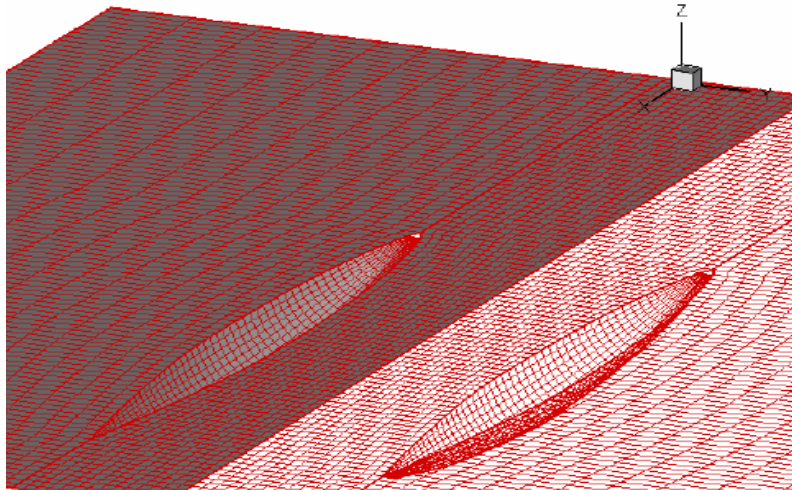


Figura 6.2 - Discretización del Catamarán de Pasajeros

Las elevaciones de la superficie libre son calculadas, la diferencia de presiones provocadas por estas sobre los cascos origina la Resistencia por Formación de Olas (R_w).

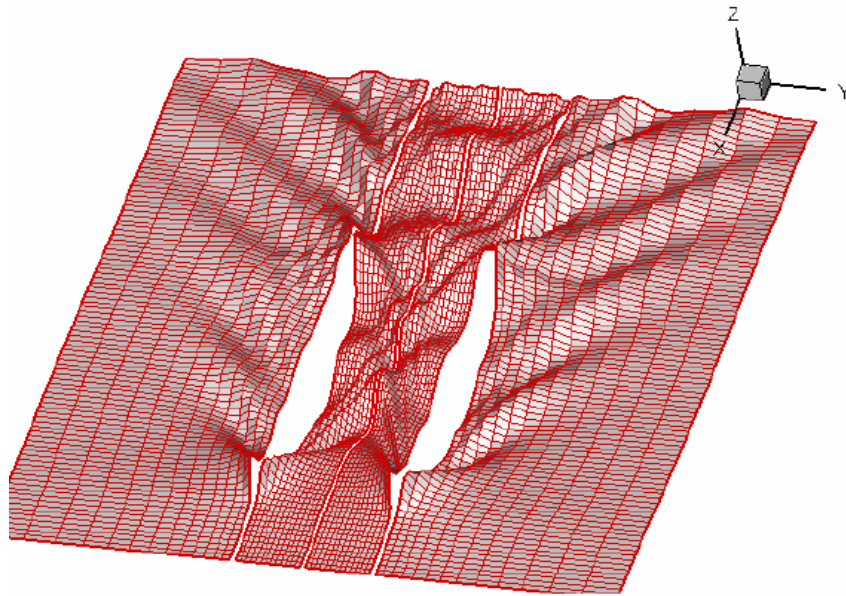


Figura 6.3 - Elevación de la superficie libre para la velocidad de $U = 7$ nudos

El Coeficiente de Resistencia por Formación de Olas (C_w) es calculado y mostrado en la figura (6.4), en la curva puede observarse crestas y valles, producto de la interferencia entre las olas formadas de la embarcación.

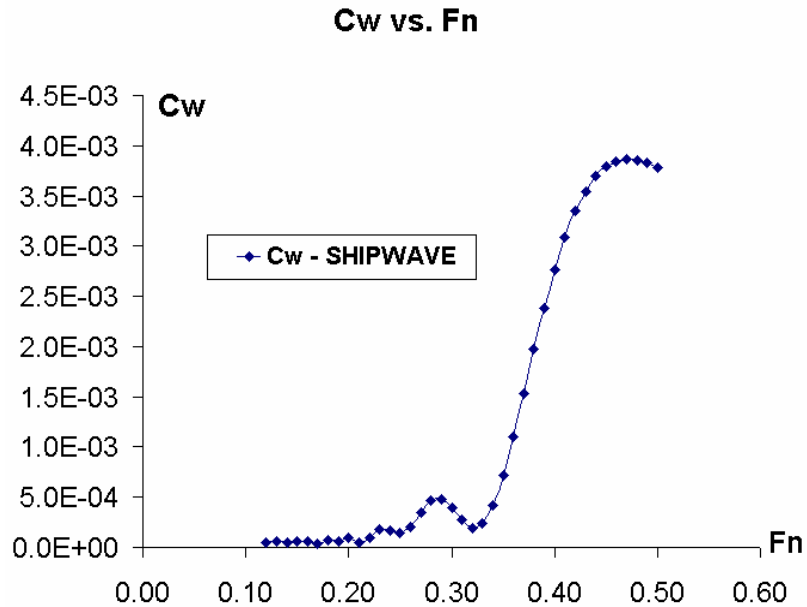


Figura 6.4 - Curva de C_w vs. F_n del

6.5.3 Resistencia al Avance Total (R_T) y Potencia Efectiva (EHP)

Con todas las componentes de la Resistencia al Avance determinadas, se procede a la determinación de la Resistencia al Avance Total e Potencia Efectiva usando la ecuación (1.8).

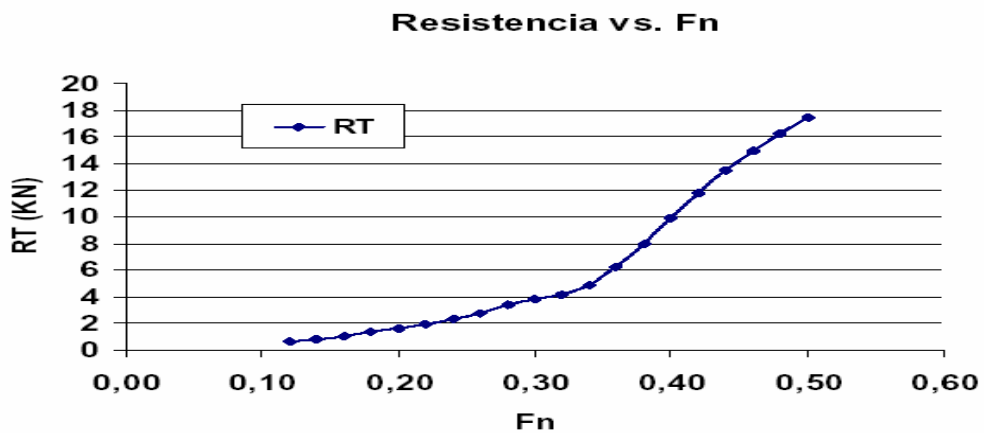


Figura 6.5 - Curva de R_T vs. F_n del catamarán

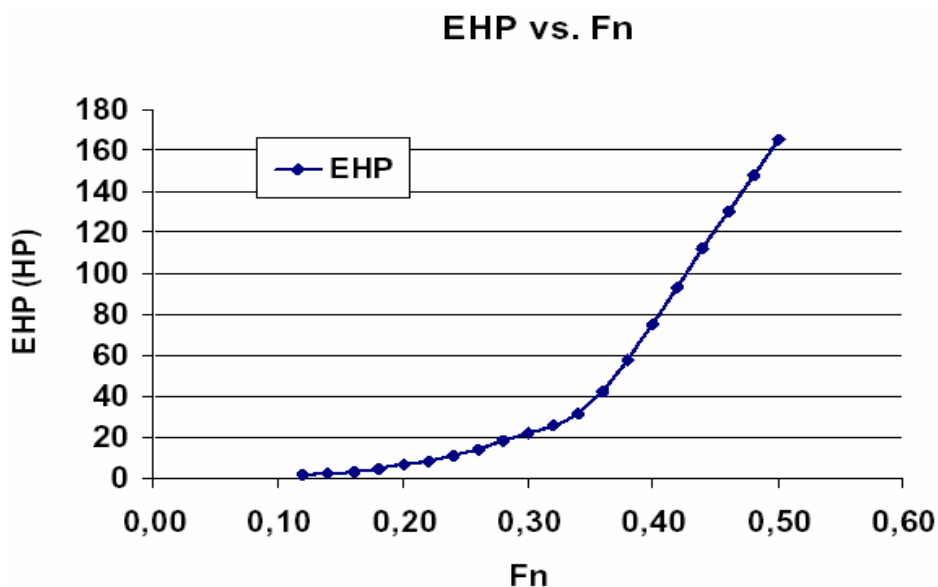


Figura 6.6 - Curva de EHP vs. Fn del catamarán

6.6 Determinación del sistema de propulsión

La resistencia al avance del catamarán se considero igualmente dividida entre los dos cascos y se desprecia cualquier interferencia entre los coeficientes de estela y empuje debido a la interferencia de los cascos. Con esta hipótesis se procede a calcular las hélices y relaciones de reducción para las dos alternativas consideradas en la sección 6.2 de este capítulo.

Los márgenes de seguridad adoptados para el cálculo de las hélices y la predicción de la velocidad son los siguientes:

Margen de mar :	10%
Margen del motor :	10%
Margen de rotación :	-3%

Tabla 6.4 – Márgenes de Seguridad

6.6.1 Características de los nuevos motores a ser instalados

Se contaba con dos motores de mayor potencia que los originales, entonces para aprovechar esta disponibilidad, se realizaron los cálculos del sistema de propulsión

respectivo. Las características de estos motores son:

Modelo del motor	Yanmar 4LHA-DTP
Potencia Máxima/RPM	200HP/3300rpm
Pot. del Régimen de Operación Continua (MCR) / RPM	158HP/3100rpm
Cantidad	2

Tabla 6.5 – Nuevos Motores de Propulsión a ser instalados

6.6.2 Alternativas del sistema de propulsión

6.6.2.1 Alternativa 1

El diámetro de las hélices fue incrementado en 1 1/2”, este incremento esta dentro de la tolerancia de espacios del cubo de la hélice. El paso de la hélice fue obtenido variándolo sistemáticamente y la relación de reducción fue escogida con el diagrama de interacción Casco-Hélice-Motor, a continuación se muestra el resultado de este análisis.

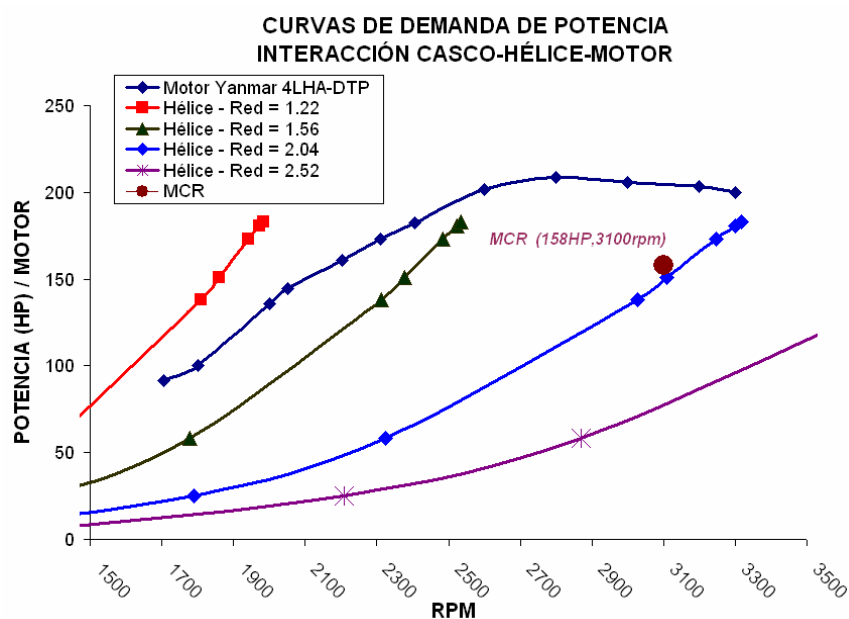


Figura 6.7 - Curvas de Demanda de Potencia para varias relaciones de reducción

De las curvas de demanda de potencia, se observa que la hélice con relación de reducción de 2.04:1 es la más conveniente, porque permite un mayor aprovechamiento de la potencia continua (MCR) y máxima, además de no encontrarse sobrecargada.

Las características de la hélice calculada son las siguientes:

Diámetro = 22 ½”

Paso = 15”

La velocidad del catamarán, así como la curva de interacción Casco-Hélice-Motor es mostrada a continuación:

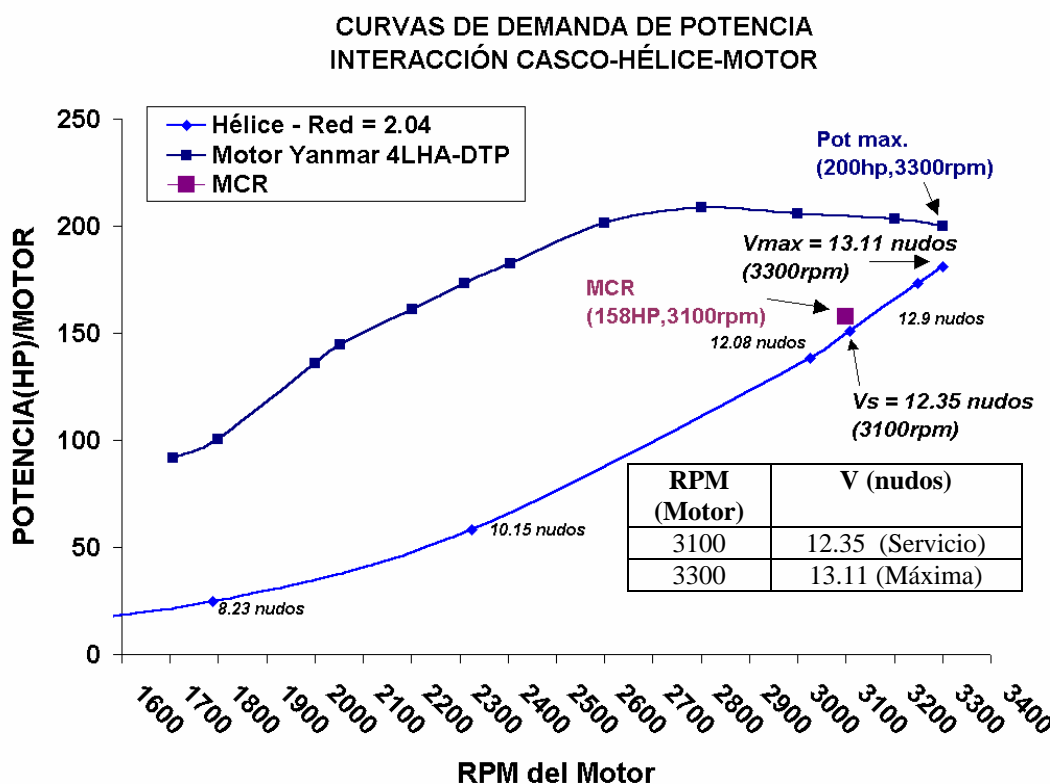


Figura 6.8 - Curva de EHP vs. Fn -

6.6.2.2 Alternativa 2

Las hélices originales serán utilizadas, la relación de reducción será escogida usando el diagrama de interacción Casco-Hélice-Motor, como mostrado anteriormente. La relación de reducción seleccionada de forma similar a la alternativa anterior, el valor escogido es 2.52:1. A continuación se muestra el resultado de este análisis.

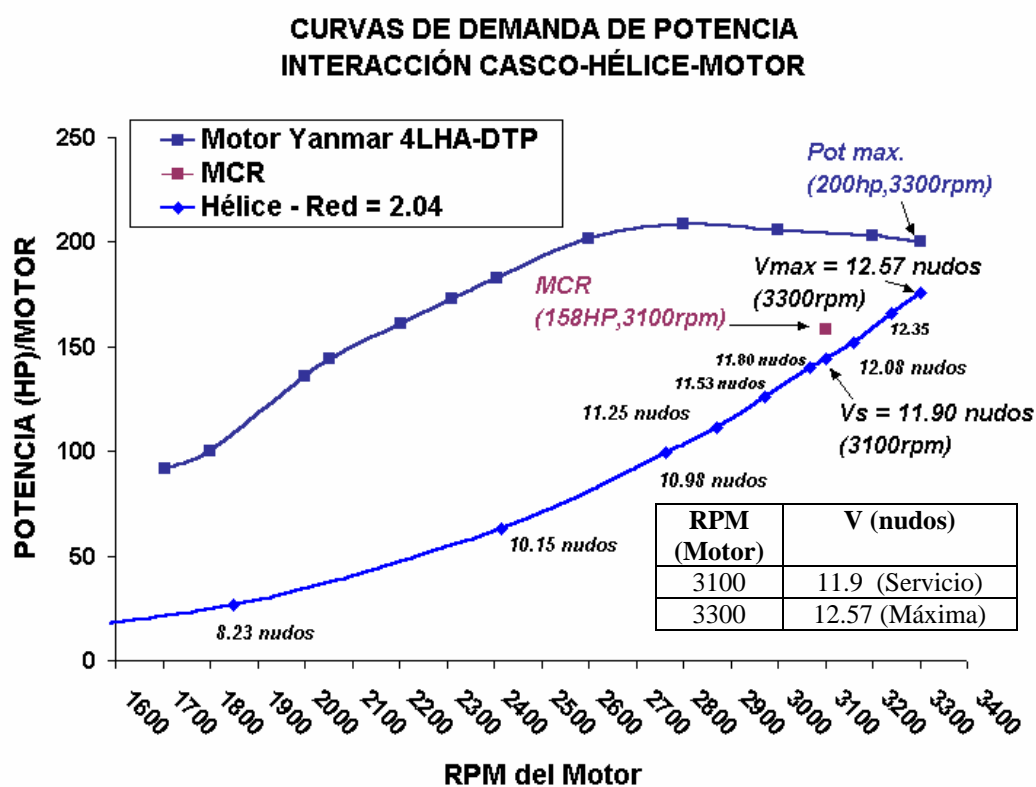


Figura 6.9 - Curva de EHP vs. Fn – reducción 2.52

La alternativa 2 fue escogida por el armador, debido a la disponibilidad de las hélices de propulsión original que quería reutilizar, las modificaciones efectuadas permitieron incrementar la velocidad de servicio a 11 nudos con 3100 rpm, según lo reportado por el armador.

CONCLUSIONES

- Un método para el cálculo de la Resistencia por Formación de Olas de navíos de desplazamiento del tipo mono casco y catamarán fue estudiado, desarrollado e implementado en un programa computacional denominado **SHIPWAVE**.
- El fenómeno de la interferencia entre el sistema de olas de proa y popa de un navío avanzando es de mucha importancia a la hora de definir la velocidad de operación de un navío, el método desarrollado consigue representar las crestas y valles de la curva de Resistencia por Formación Olas, así como las alturas y longitudes de las olas formadas por el avance del navío.
- Fue comprobado que la aplicación de la teoría potencial para la determinación de la Resistencia por Formación de Olas produce resultados de calidad adecuada.
- La utilización de curvas B-splines para la discretización de cascos es de importancia vital para que el programa desarrollado pueda evaluar cualquier forma de casco y se convierta en una herramienta versátil.

- El método de cálculo para la Resistencia por Formación de Olas desarrollado en conjunto con la división de la Resistencia al Avance adoptada en esta tesis fue utilizada para obtener la Resistencia al Avance de un catamarán de pasajeros. La diferencia entre los resultados numéricos y reales presentados por el catamarán pueden ser utilizados como factores de corrección en otros proyectos similares.
- Se consiguió obtener desarrollar una herramienta capaz de determinar la Resistencia por Formación de Olas de navíos de desplazamiento, los resultados obtenidos con el programa **SHIPWAVE** presentan calidad similar a los obtenidos por otros programas.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, D. A., (1984), *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 1 ed., Hemisphere Publishing Corporation.

BREBBIA, C.A., (1982), *Boundary Elements Methods in Engineering*, Berlin, Springer Verlag.

CARNAHAN, B., (1969), *Applied Numerical Methods*, 1 ed. New York, John Wiley & Sons INC, 1969.

CHENG, B. H., (1990), “Computations of 3D Transom Stern Flows”, *Proceedings : Fifth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp. 581-591, 1990.

DAWSON, C. W., (1977), “A Practical Method for Solving Ship-Wave Problem”, *2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp. 30 – 38.

DOMICIANO, V., DE CONTI, M. B., (2002), “Cálculo da Resistência de Ondas através de um Método de Elementos de Contorno”, *19^o Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore*”, T-129, pp. 1-15.

FLOWTECH., (1993), *ShipFlow Theoretical Manual version 1.3*, FLOWTECH International AB.

GADD, G. E., (1981), “A Convenient Method for Estimating Wave Resistance, and its Variation with Small Changes of Hull Shape, for a Wide Range of Ship Types”, *International Shipbuilding Progress*.

HARVALD, Sv. Aa., (1983), *Resistance and Propulsion of Ships*, 1 ed. New York, John Wiley & Sons INC.

HAVELOCK, T. H., (1934a), “The Calculation of Wave Resistance”, *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 144, Jan. 1934 a.

HAVELOCK, T. H., (1934b) “Wave Patterns and Wave Resistance”, *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 25, Jul.

HAVELOCK, T. H., (1951), “Wave Resistance Theory and its Application to Ship Problem”, *Trans. SNAME*, Vol. 59, pp. 13 - 24.

HESS, J. L. & SMITH, A.M.O., (1962), “Calculation of Nonlifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies”, *Journal of Ship Research* Vol.8 no. 2, pp

HIRATA, H. M., (1989), *Desenvolvimento de Veículos de Operação Remota*, CENPES/PETROBRAS, Ref.: 234.259.087.

HOSHINO, T., (1969), “Hydrodynamic Analysis of Propeller in Steady Flow Using a Surface Panel Method”, *Proceedings of the Spring Meeting, The Society of Naval Architects of Japan*, May.

INGLIS, R. B., (1980), A Three Dimensional Analysis of Motion of Rigid Ship in Waves. Tese de Ph.D., Department of Mechanical Engineering / University of London, London, England.

IWASHITA, H., OHKUSU M., (1992), “The Green Function Method for Ship Motions at Forward Speed”, *Ship Technology Research* Vol. 39 pp. 3-21.

JENSEN, G., (1990), “Ship Wave-Resistance Computations”, *Proceedings : Fifth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, pp. 593 – 606, 1990.

KOUH, J.-s., (2001), “Computations of Wave Loads Using a B-Spline Panel Method”, *Ocean Engineering* Vol 28, pp. 1499-1516.

KRING, D., HUANG, Y. -F., SCLAVOUNOS, P., (1997), “Nonlinear Ship Motions and Wave-Induced Loads by a Rankine Method”, *Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics* pp. 45-62.

LEE, C. -H., MANIAR, H., NEWMAN J. N., ZHU, X., (1997), “Computations of Wave Loads Using a B-Spline Panel Method”, *Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics* pp. 75-92.

LEVI, C., SALHUA, C.A., (2005), “Efeito de Fundo sobre a Resistência de Onda”, XXI Congresso Pan-Americano de Ingeniería Naval - COPINAVAL, Guayaquil, Ecuador.

LUNDE, J. K., (1951), “On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion”, *Trans. Soc. Nav. Arch. Mar. Eng.* Vol. 59.

NAKOS, D. E., (1990), Ship Wave Pattern by a Three Dimensional Rankine Panel Method, Ph.D Thesis, MIT.

NAKOS, D. E. & SCLAVOUNOS, P. D., (1990), “Ship Motions by a Three Dimensional Rankine Panel Method”, *Proceedings of the 18th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Ann Arbor, Michigan, pp.21-40.

NAKOS, D. E. & SCLAVOUNOS, P. D., (1994), “Kelvin and Wave Resistance of Cruiser – and Transom – Stern ships”, *Journal of Ship Research*, Vol. 38, No. 1, March, pp. 9-29.

NEWMAN, J. N., (1969), “Distributions of Sources and Normal Dipoles over a Quadrilateral Panel”, *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 20, pp. 113-126, May.

NEWMAN, J. N., (1974), *Marine Hydrodynamics*, 1 ed. Cambridge, MIT Press.

NOBLESSE, F., (1977), “The Fundamental Solution of the Theory of Steady Motion of a Ship”, *Journal of Ship Research*, Vol. 21 no. 2, Jun.

PAPANIKOLAOU, A., (1985), “On Integral-Equation-Methods for the Evaluation of Motions and Loads of Arbitrary Bodies in Waves”, *Ingenieur-Archiv* Vol. 55 pp. 17-29.

RAVEN, H. C., (1996), *A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem*, 1 ed., Grafisch Bedrijf Ponsen & Looijen BV –Wageningen - Netherlands.

REED, A., TELSTE J., SCRAGG C., (1991), “Analysis of Transom Stern Flows”, *Eighteen Symposium on Naval Hydrodynamics*, pp. 207-219.

SALHUA, C. S., (2004), Fontes de Rankine Aplicada a Escoamentos com Superfície Livre, Tese de M.Sc., COPPE-PENO/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SANTANA, J. F., (1992), Determinação Numérica da Resistência de Onda de Navios de Formas Arbitrárias. Tese de M.Sc., COPPE-PENO/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SCLAVOUNOS, P. D. & NAKOS, D.E., (1988), “Stability Analysis of Panel Methods for Free Surface Flows with Forward Speed”, *Proceedings of the 17th Symposium on Naval Hydrodynamics*, The Hague.

SCLAVOUNOS, P. D., (1983), *Computation of Wave Ship Interactions*, In: Bhattacharyya, R., (ed), *Advances in Marine Hydrodynamics*, 1 ed, chapter 4, New York, USA, , John Wiley & Sons INC.

SOUTO, A., (2001), Nuevas Herramientas de Diseño de Formas de Buques Basadas en Códigos de Flujo Potencial. Tesis de Doctorado, ETSIN/UPM, Madrid, España.

WEHAUSEN, J. V., (1979), *The Wave Resistance of Ships*, 1 ed., Academic Press INC.

APENDICE I

LINEALIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DE LA SUPERFICIE LIBRE

Se va a elaborar las condiciones de contorno de la superficie libre linealizada en relación al flujo del casco doble utilizado por Nakos (1990).

Se considera que las ecuaciones de contorno originales de la superficie libre están definidas con respecto a un sistema inercial :

Condición cinemática:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \Phi \cdot \nabla \zeta = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad \text{em } z = \zeta \quad \text{I.1}$$

Condición Dinámica:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi = -g \zeta \quad \text{em } z = \zeta \quad \text{I.2}$$

El potencial de velocidades que describe el problema es el mostrado en la siguiente ecuación:

$$\Phi(x, y, z; t) = -Ux + \phi(x', y', z'; t) \quad \text{I.3}$$

Substituyendo la ecuación (I.3) en las condiciones de contorno, (I.1) e (I.2), se obtiene las siguientes ecuaciones:

Condición cinemática :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\phi) \cdot \nabla \right] \zeta = \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad \text{en } z = \zeta \quad \text{I.4}$$

Condición Dinámica:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] \phi + \frac{1}{2} \nabla\phi \cdot \nabla\phi = -g\zeta \quad \text{en } z = \zeta \quad \text{I.5}$$

Debido a que el potencial base faz que la superficie libre presente un deformación base ζ_0 , entonces para poder obtener la deformación de la superficie libre ζ_1 , las ecuaciones de las condiciones de contorno, (I.7) e (I.8), tiene que ser expresadas en relación a $z = \zeta_0$.

Substituyendo las ecuaciones (2.17) e (2.19) en (I.7), se puede obtener las siguientes ecuaciones:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla(\phi_0 + \phi_1)) \cdot \nabla \right] (\zeta_0 + \zeta_1) = \frac{\partial(\phi_1 + \phi_0)}{\partial z} \quad , \text{ en } z = \zeta_0 + \zeta_1$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\phi_0) \cdot \nabla \right] (\zeta_0 + \zeta_1) + \nabla\phi_1 \cdot \nabla(\zeta_0 + \zeta_1) = \frac{\partial\phi_0}{\partial z} + \frac{\partial\phi_1}{\partial z} \quad , \text{ en } z = \zeta_0 + \zeta_1$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\phi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 + \nabla\zeta_0 \cdot \nabla\phi_1 = \frac{\partial\phi_0}{\partial z} + \frac{\partial\phi_1}{\partial z} \quad , \text{ en } z = \zeta_0 + \zeta_1$$

Expandiendo en serie de Taylor, se obtiene:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\phi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 + \nabla\zeta_0 \cdot \nabla\phi_1 = \frac{\partial\phi_0}{\partial z} \Big|_{z=\zeta_0} + \zeta_1 \frac{\partial^2\phi_0}{\partial z^2} \Big|_{z=\zeta_0} + \frac{\partial\phi_1}{\partial z} \Big|_{z=\zeta_0} \quad , \text{ en } z = \zeta_0$$

Considerando que la elevación ζ_0 es pequeña, entonces se puede trasladar el sistema de referencia al plano $z = 0$ sin mucho error :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 = \frac{\partial\varphi_0}{\partial z} \Big|_{z=0} + \zeta_1 \frac{\partial^2\varphi_0}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad \text{en } z = 0$$

El primer termino a la derecha es nulo, luego resulta la siguiente ecuación linealizada para la condición cinemática :

Condición de contorno cinemática

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 = \zeta_1 \frac{\partial^2\varphi_0}{\partial z^2} \Big|_{z=0} + \frac{\partial\varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad \text{em } z = 0 \quad \text{I.6}$$

Ahora substituyendo la ecuación (2.17) e (2.19) en la ecuación (I.5), se obtiene:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] (\varphi_0 + \varphi_1) + \frac{|\nabla(\varphi_0 + \varphi_1)|^2}{2} + g\zeta_0 + g\zeta_1 &= 0, \quad \text{en } z = \zeta_0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] \varphi_1 - \bar{U} \cdot \nabla\varphi_0 + \frac{|\nabla\varphi_0|^2}{2} + \nabla\varphi_0 \cdot \nabla\varphi_1 + g\zeta_0 + g\zeta_1 &= 0, \quad \text{en } z = \zeta_0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g\zeta_1 - g\zeta_0 + \bar{U} \cdot \nabla\varphi_0 - \frac{\nabla\varphi_0 \cdot \nabla\varphi_0}{2}, & \quad \text{en } z = \zeta_0 \\ \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g\zeta_1, & \quad \text{en } z = \zeta_0 \end{aligned} \quad \text{I.7}$$

La ecuación (I.7) puede ser trasladada al plano $z = 0$, sumando la a distancia ζ_0 en la ecuación (I.7), se tiene la siguiente ecuación:

Condición de contorno dinámica

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g\zeta_1 + \bar{U} \cdot \nabla\varphi_0 - \frac{\nabla\varphi_0 \cdot \nabla\varphi_0}{2}, \quad \text{en } z = 0 \quad \text{I.8}$$

APENDICE II

APLICACIÓN DE LA SIMETRÍA GEOMÉTRICA Y DEL FLUJO DE AGUA ALREDEDOR DE UN CUERPO

Los sistemas de ecuaciones formados por la aplicación de la Tercera Identidad de Green pueden ser simplificados considerando los planos de simetría de la geometría del cuerpo, así como la simetría del flujo alrededor del cuerpo debido a su avance. Puede ser aplicado este concepto para el caso de un cuerpo en reposo en presencia del flujo de agua incidiendo en la dirección del eje negativo x .

Se considera el sistema de ecuaciones a ser resuelto como:

$$A_{ij}(NT, NT) \Phi(NT) = B_{ij}(NT) \quad \text{II.1}$$

Donde :

$A_{ij}(NT, NT)$: Matriz de los coeficientes de velocidad normal inducida (A_{ij}).

$\Phi(NT, NT)$: Potencial de velocidades de los paneles NT.

$B_{ij}(NT)$: Vector de los coeficientes del potencial de velocidades inducida.

NT : Numero total de paneles en el cuerpo e e la superficie libre discretizada.

Se considera el dominio fluido a considerar formado pelo casco doblo del cuerpo a analizar y la superficie libre alrededor como mostrado en la figura (I.1):

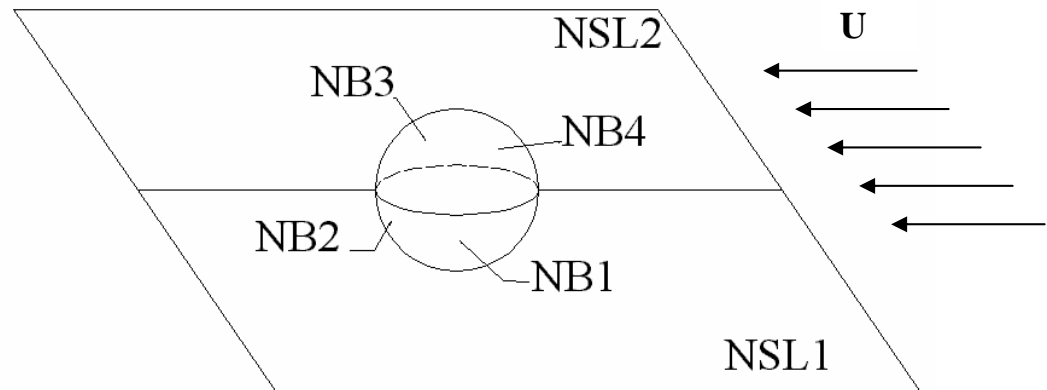


Figura I.1 - Paneles del casco duplo y de la superficie libre

Entonces el dominio fluido queda dividido en las siguientes partes:

$$NT = NB + NSL$$

Donde:

$$NB = NB1 + NB2 + NB3 + NB4$$

$$NSL = NSL1 + NSL2$$

El sistema de ecuaciones puede ser representado de la siguiente forma:

$A_{ij}(NT,NT)$:

	$\Phi(NB1)$	$\Phi(NB2)$	$\Phi(NB3)$	$\Phi(NB4)$	$\Phi(NSL1)$	$\Phi(NSL2)$
NB1	$A(NB1,NB1)$	$A(NB1,NB2)$	$A(NB1,NB3)$	$A(NB1,NB4)$	$A(NB1,NSL1)$	$A(NB1,NSL2)$
NB2	$A(NB2,NB1)$	$A(NB2,NB2)$	$A(NB2,NB3)$	$A(NB2,NB4)$	$A(NB2,NSL1)$	$A(NB2,NSL2)$
NB3	$A(NB3,NB1)$	$A(NB3,NB2)$	$A(NB3,NB3)$	$A(NB3,NB4)$	$A(NB3,NSL1)$	$A(NB3,NSL2)$
NB4	$A(NB4,NB1)$	$A(NB4,NB2)$	$A(NB4,NB3)$	$A(NB4,NB4)$	$A(NB4,NSL1)$	$A(NB4,NSL2)$
NSL1	$A(NSL1,NB1)$	$A(NSL1,NB2)$	$A(NSL1,NB3)$	$A(NSL1,NB4)$	$A(NSL1,NSL1)$	$A(NSL1,NSL2)$
NSL2	$A(NSL2,NB1)$	$A(NSL2,NB2)$	$A(NSL2,NB3)$	$A(NSL2,NB4)$	$A(NSL2,NSL1)$	$A(NSL2,NSL2)$

$B_{ij}(NT)$:

$$\begin{array}{c}
 \text{NB1} \\
 \text{NB2} \\
 \text{NB3} \\
 \text{NB4} \\
 \text{NSL1} \\
 \text{NSL2}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \text{NB1} & \text{NB2} & \text{NB3} & \text{NB4} & \text{NSL1} & \text{NSL2} \\
 B(\text{NB1,NB1}) + B(\text{NB1,NB2}) + B(\text{NB1,NB3}) + B(\text{NB1,NB4}) + B(\text{NB1,NSL1}) + B(\text{NB1,NSL2}) \\
 B(\text{NB2,NB1}) + B(\text{NB2,NB2}) + B(\text{NB2,NB3}) + B(\text{NB2,NB4}) + B(\text{NB2,NSL1}) + B(\text{NB2,NSL2}) \\
 B(\text{NB3,NB1}) + B(\text{NB3,NB2}) + B(\text{NB3,NB3}) + B(\text{NB3,NB4}) + B(\text{NB3,NSL1}) + B(\text{NB3,NSL2}) \\
 B(\text{NB4,NB1}) + B(\text{NB4,NB2}) + B(\text{NB4,NB3}) + B(\text{NB4,NB4}) + B(\text{NB4,NSL1}) + B(\text{NB4,NSL2}) \\
 B(\text{NSL1,NB1}) + B(\text{NSL1,NB2}) + B(\text{NSL1,NB3}) + B(\text{NSL1,NB4}) + B(\text{NSL1,NSL1}) + B(\text{NSL1,NSL2}) \\
 B(\text{NSL2,NB1}) + B(\text{NSL2,NB2}) + B(\text{NSL2,NB3}) + B(\text{NSL2,NB4}) + B(\text{NSL2,NSL1}) + B(\text{NSL2,NSL2})
 \end{pmatrix}$$

Para el caso del potencial base, se considera que los paneles del cuerpo, así como la matriz A_{ij} y el vector B_{ij} quedan reducidas a las siguientes matrices:

$A_{ij}(\text{NB},\text{NB})$:

$$\begin{array}{c}
 \Phi(\text{NB1}) \\
 \Phi(\text{NB2}) \\
 \Phi(\text{NB3}) \\
 \Phi(\text{NB4})
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \text{NB1} \\
 \text{NB2} \\
 \text{NB3} \\
 \text{NB4}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 A(\text{NB1,NB1}) & A(\text{NB1,NB2}) & A(\text{NB1,NB3}) & A(\text{NB1,NB4}) \\
 A(\text{NB2,NB1}) & A(\text{NB2,NB2}) & A(\text{NB2,NB3}) & A(\text{NB2,NB4}) \\
 A(\text{NB3,NB1}) & A(\text{NB3,NB2}) & A(\text{NB3,NB3}) & A(\text{NB3,NB4}) \\
 A(\text{NB4,NB1}) & A(\text{NB4,NB2}) & A(\text{NB4,NB3}) & A(\text{NB4,NB4})
 \end{pmatrix}$$

Debido a que el cuerpo tiene cuatro planos de simetría geométrica y el flujo alrededor es simétrico en esos cuatro planos, entonces se puede reducir la matriz de los coeficientes A_{ij} a la siguiente matriz :

$$\begin{array}{c}
 \Phi(\text{NB1}) \\
 \text{NB1}
 \end{array}
 [A(\text{NB1,NB1}) + A(\text{NB2,NB1}) + A(\text{NB3,NB1}) + A(\text{NB4,NB1})]$$

El vector de coeficientes $B_{ij}(NB)$:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{NB1} \\
 \mathbf{NB2} \\
 \mathbf{NB3} \\
 \mathbf{NB4}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \mathbf{NB1} \quad \mathbf{NB2} \quad \mathbf{NB3} \quad \mathbf{NB4} \\
 \left(\begin{array}{cccc}
 B(\mathbf{NB1},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB1},\mathbf{NB2}) + B(\mathbf{NB1},\mathbf{NB3}) + B(\mathbf{NB1},\mathbf{NB4}) \\
 B(\mathbf{NB2},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB2},\mathbf{NB2}) + B(\mathbf{NB2},\mathbf{NB3}) + B(\mathbf{NB2},\mathbf{NB4}) \\
 B(\mathbf{NB3},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB3},\mathbf{NB2}) + B(\mathbf{NB3},\mathbf{NB3}) + B(\mathbf{NB3},\mathbf{NB4}) \\
 B(\mathbf{NB4},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB4},\mathbf{NB2}) + B(\mathbf{NB4},\mathbf{NB3}) + B(\mathbf{NB4},\mathbf{NB4})
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Utilizando nuevamente la simetría geométrica del cuerpo e del flujo, el vector $B_{ij}(NB)$ puede ser reducido al siguiente vector :

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{NB1} \\
 \mathbf{NB1} \quad [B(\mathbf{NB1},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB2},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB3},\mathbf{NB1}) + B(\mathbf{NB4},\mathbf{NB1})]
 \end{array}$$

De esta manera, las NT incógnitas del sistema de ecuaciones (II.1), para el caso del potencial base, puede ser reducido a un sistema de ecuaciones de NB1 incógnitas, como mostrado a seguir:

$$A_{ij}(\mathbf{NB1}, \mathbf{NB1}) \Phi(\mathbf{NB1}) = B_{ij}(\mathbf{NB1}) \quad \text{II.2}$$

Para obtener el potencial de perturbación, donde los paneles de la superficie libre tienen que ser considerados, ecuación.(II.1), y el casco doble es utilizado como potencial base, se tiene:

$A_{ij}(\mathbf{NB1}+\mathbf{NB2}+\mathbf{NSL}, \mathbf{NB1}+\mathbf{NB2}+\mathbf{NSL})$:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{NB1} \\
 \mathbf{NB2} \\
 \mathbf{NSL1} \\
 \mathbf{NSL2}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \Phi(\mathbf{NB1}) \quad \Phi(\mathbf{NB2}) \quad \Phi(\mathbf{NSL1}) \quad \Phi(\mathbf{NSL2}) \\
 \left(\begin{array}{cccc}
 A(\mathbf{NB1},\mathbf{NB1}) & A(\mathbf{NB1},\mathbf{NB2}) & A(\mathbf{NB1},\mathbf{NSL1}) & A(\mathbf{NB1},\mathbf{NSL2}) \\
 A(\mathbf{NB2},\mathbf{NB1}) & A(\mathbf{NB2},\mathbf{NB2}) & A(\mathbf{NB2},\mathbf{NSL1}) & A(\mathbf{NB2},\mathbf{NSL2}) \\
 A(\mathbf{NSL1},\mathbf{NB1}) & A(\mathbf{NSL1},\mathbf{NB2}) & A(\mathbf{NSL1},\mathbf{NSL1}) & A(\mathbf{NSL1},\mathbf{NSL2}) \\
 A(\mathbf{NSL2},\mathbf{NB1}) & A(\mathbf{NSL2},\mathbf{NB2}) & A(\mathbf{NSL2},\mathbf{NSL1}) & A(\mathbf{NSL2},\mathbf{NSL2})
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

$B_{ij}(\text{NB1}+\text{NB2}+\text{NSL}) :$

$$\begin{array}{c}
 \text{NB1} \\
 \text{NB2} \\
 \text{NSL1} \\
 \text{NSL2}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \text{NB1} & \text{NB2} & \text{NSL1} & \text{NSL2} \\
 B(\text{NB1},\text{NB1}) + B(\text{NB1},\text{NB2}) + B(\text{NB1},\text{NSL1}) + B(\text{NB1},\text{NSL2}) \\
 B(\text{NB2},\text{NB1}) + B(\text{NB2},\text{NB2}) + B(\text{NB2},\text{NSL1}) + B(\text{NB2},\text{NSL2}) \\
 B(\text{NSL1},\text{NB1}) + B(\text{NSL1},\text{NB2}) + B(\text{NSL1},\text{NSL1}) + B(\text{NSL1},\text{NSL2}) \\
 B(\text{NSL2},\text{NB1}) + B(\text{NSL2},\text{NB2}) + B(\text{NSL2},\text{NSL1}) + B(\text{NSL2},\text{NSL2})
 \end{pmatrix}$$

Considerando que los planos de simetría del dominio fluido e el flujo de agua simétrico, además de considerar que la condición de contorno en el cuerpo aplicada a los paneles de la superficie del cuerpo es igual a cero, para la linealización de Neumann-Kelvin, esta como resultado lo siguiente:

$A_{ij}(\text{NB1}+\text{NB2}+\text{NSL},\text{NB1}+\text{NB2}+\text{NSL}) :$

$$\begin{array}{c}
 \text{NB1} \\
 \text{NB2} \\
 \text{NSL1} \\
 \text{NSL2}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \Phi(\text{NB1}) & \Phi(\text{NB2}) & \Phi(\text{NSL1}) & \Phi(\text{NSL2}) \\
 A(\text{NB1},\text{NB1}) & A(\text{NB1},\text{NB2}) & A(\text{NB1},\text{NSL1}) & A(\text{NB1},\text{NSL2}) \\
 A(\text{NB2},\text{NB1}) & A(\text{NB2},\text{NB2}) & A(\text{NB2},\text{NSL1}) & A(\text{NB2},\text{NSL2}) \\
 0 & 0 & A(\text{NSL1},\text{NSL1}) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & A(\text{NSL2},\text{NSL2})
 \end{pmatrix}$$

$B_{ij}(\text{NB1}+\text{NB2}+\text{NSL}) :$

$$\begin{array}{c}
 \text{NB1} \\
 \text{NB2} \\
 \text{NSL1} \\
 \text{NSL2}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \text{NB1} & \text{NB2} & \text{NSL1} & \text{NSL2} \\
 0 + 0 + B(\text{NB1},\text{NSL1}) + B(\text{NB1},\text{NSL2}) \\
 0 + 0 + B(\text{NB2},\text{NSL1}) + B(\text{NB2},\text{NSL2}) \\
 0 + 0 + B(\text{NSL1},\text{NSL1}) + B(\text{NSL1},\text{NSL2}) \\
 0 + 0 + B(\text{NSL2},\text{NSL1}) + B(\text{NSL2},\text{NSL2})
 \end{pmatrix}$$

Entonces la matriz de coeficientes A_{ij} puede reducirse a:

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} \Phi(\text{NB1}) & \Phi(\text{NSL1}) \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{NB1} \\ \text{NSL1} \end{array} & \left[\begin{array}{cc} A(\text{NB1},\text{NB1}) + A(\text{NB2},\text{NB1}) & A(\text{NB1},\text{NSL1}) + A(\text{NB2},\text{NSL1}) \\ 0 & 0 \\ & 2 * A(\text{NSL1},\text{NSL1}) \end{array} \right] \end{array}$$

El vector con los coeficientes B_{ij} , puede reducirse a:

$$\begin{array}{c} \text{NSL1} \\ \begin{array}{c} \text{NB1} \\ \text{NSL1} \end{array} \end{array} \left[\begin{array}{c} B(\text{NB1},\text{NSL1}) + B(\text{NB2},\text{NSL1}) \\ B(\text{NSL1},\text{NSL1}) + B(\text{NSL2},\text{NSL1}) \end{array} \right]$$

El sistema de ecuaciones $\text{NB1} + \text{NSL1}$ a ser resuelto es el siguiente:

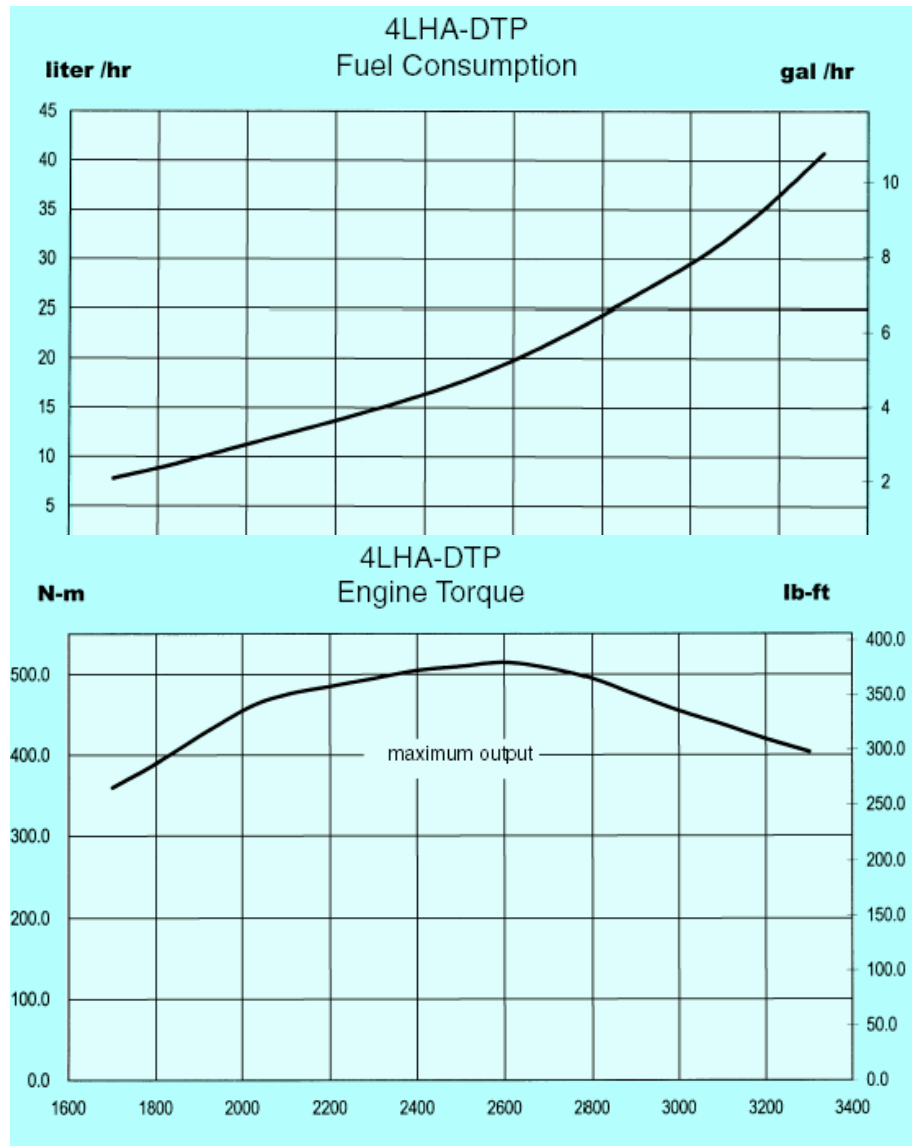
$$A_{ij}(\text{NB1} + \text{NSL1}, \text{NB1} + \text{NSL1}) \Phi(\text{NB1} + \text{NSL1}) = B_{ij}(\text{NB1} + \text{NSL1}) \quad \text{II.3}$$

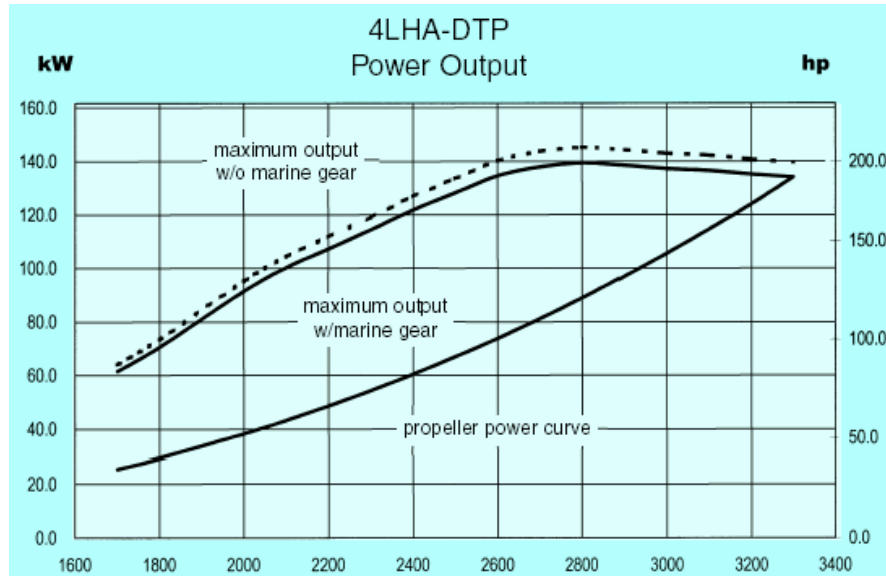
Entonces, para simplificar el problema solamente se necesita discretizar un cuarto de la superficie del cuerpo a analizar y mitad de la superficie libre. Así puede se ahorrar tiempo y espacio computacional haciendo que el programa desarrollado sea mas eficiente y versátil.

Alteraciones deberán ser realizadas cuando se necesite analizar el flujo de agua alrededor de un cuerpo cuando sobre este incide un flujo de agua con diferentes direcciones.

APÉNDICE III

CURVAS DE DESEMPEÑO DEL MOTOR YANMAR 4LHA-DTP





APÉNDICE IV

GLOSARIO TÉCNICO DE LOS TÉRMINOS

NAVALES RELACIONADOS CON ESTA TESIS

Português	Español
a ré	para popa
a vante	para proa
Afundamento	arfagem
Arfada	cabeceo
Baliza	cuaderna, estación.
bombordo	babor
boreste	estribor
discretização	discretización, acción de dividir una superficie en paneles
espelho de popa	espejo
linha de eixos	línea de ejes
manobra	maniobra
meia nau	sección media
planeio	planeo
popa quadrada	popa de espejo
rotação	revolución
semi-deslocamento	semi-desplazamiento

CATAMARÁN “AMAZONÍA”

MEMORIA DESCRIPTIVA

P06-003-CTAL-MT/22-01



**ARMADOR:
LATINTOUR GALÁPAGOS S.C.C.**

**GUAYAQUIL - ECUADOR
ENERO, 2006**

ÍNDICE

		Pág.
I	Introducción	3
II	Objetivo de la Memoria Técnica	3
III	Características principales	3
IV	Compartimientos	4
V	Tanques de almacenamiento	6
VI	Estructura	6
VII	Sistemas y equipos instalados	
	Sistema de propulsión y gobierno	7
	Sistema de achique	8
	Sistema contra incendios	8
	Equipos de seguridad y salvamento	8
	Sistema de combustible	9
	Sistema de agua potable	9
	Sistema eléctrico	9
	Equipos auxiliares	10
	Equipos de navegación y comunicaciones	10
	Equipos de amarre, fondeo y maniobra	11
	Protección catódica	11
	Equipos de buceo	11
	Velamen	12

MEMORIA TECNICA

I. INTRODUCCIÓN

Los planos del Velero Catamarán “Amazonía” han sido elaborados conforme a su actual condición y distribución. Según lo observado y analizado, la embarcación descrita ha sido diseñada según los estándares de diseño para embarcaciones de recreo.

El casco y superestructura son de aluminio, y cuenta con un sistema de propulsión mecánico adicional al sistema de propulsión por velamen.

Actualmente, la embarcación cuenta con bandera americana, pero su puerto base es la ciudad de Puerto Ayora, Isla Santa Cruz, contando con la autorización de la Dirección General de la Marina Mercante y del Litoral (DIGMER) para transportar pasajeros bajo la modalidad de crucero, entre las Islas del Parque Nacional Galápagos bajo el régimen de Internación Temporal.

La embarcación cuenta con alojamientos adecuados y cómodos para los pasajeros, manteniendo una dotación de 7 tripulantes (capitán, maquinista, marineros y un guía turístico). Adicionalmente, la embarcación cuenta con equipos de buceo para el servicio a los pasajeros, y para lo cual cuenta con un instructor certificado.

La condición general de la embarcación, tanto en operatividad como en mantenimiento, es buena, efectuando sus faenas sin restricciones y de manera satisfactoria.

II. OBJETIVO DE LA MEMORIA TÉCNICA

Nacionalización del catamarán “Amazonía” para enarbolar la bandera ecuatoriana.

III. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Nombre de la embarcación	: Amazonía
Tipo	: Velero Catamarán
Propietario	: LATINTOUR GALÁPAGOS S.C.C.
Dirección	: Diego de Almagro 1219 y la Niña Quito -Ecuador

Puerto Base	: Puerto Ayora, Islas Galápagos
Bandera	: Estados Unidos
Número de matrícula	: DL 59615
Patente de Operación Turística	: N° 00077 Vigente al 31 de enero del 2,006
Área de operación	: Provincia de Galápagos
Constructor / Año	: Alumarine, Francia - 1,990
Material del casco	: Aluminio
Eslora total	: 22.00 m.
Eslora entre perpendiculares	: 18.50 m.
Manga Moldeada	: 10.39 m.
Puntal Moldeado	: 2.98 m.
Calado de diseño	: 1.00 m.
Desplazamiento	: 30.97 Tons. (calado de diseño)
T.R.B.	: 96.22
T.R.N.	: 42.98
Potencia instalada	: (2) YANMAR 4LHP-DTP (200 BHP) c/u
Velocidad estimada	: 11.00 nudos
Cap. de combustible	: 2.84 m ³ (750 Gal).
Cap. de agua dulce	: 3.97 m ³ (1050 Gal).
Cap. de aguas sucias	: 0.76 m ³ (200 Gal).
Autonomía	: 7 días
Tripulación	: 07 Tripulantes 16 Pasajeros

IV. COMPARTIMENTOS

El Velero Catamarán cuenta con 02 cascos unidos a través de la cubierta principal sobre la cual se encuentra la superestructura. Cada casco está subdividido por 03 mamparos transversales estructurales.

El casco de babor presenta la siguiente distribución desde proa hacia popa:

- ④ Camarote de Tripulantes N° 2: con escotilla de acceso sobre la cubierta del casco; capacidad para 04 tripulantes y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Cabina N° 4 de pasajeros: con puerta de ingreso por el área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.

- ④ Cabina N° 5 de pasajeros: con puerta de ingreso por el área de salón; capacidad para 03 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Cabina N° 7 de pasajeros: con puerta de ingreso por el área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Sala de Máquinas de Babor: con escotilla de acceso sobre la cubierta del casco; donde se encuentra 01 máquina principal y otros equipos mecánicos y eléctricos.

El casco de estribor presenta la siguiente distribución desde proa hacia popa:

- ④ Camarote de Tripulantes N° 1: con escotilla de acceso sobre la cubierta del casco; capacidad para 03 tripulantes y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Cabina N° 3 de pasajeros: con puerta de ingreso por el área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Cocina: con puerta de ingreso por el área de salón, y cuenta con cocina a gas, 02 neveras y lavabo.
- ④ Cabina N° 6 de pasajeros: con puerta de ingreso por el área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Sala de Máquinas de Estribor: con escotilla de acceso sobre la cubierta del casco; donde se encuentra 01 máquina principal y otros equipos mecánicos y eléctricos.

La superestructura presenta la siguiente distribución desde proa hacia popa:

- ④ Cabina N° 1 de pasajeros: con puerta de ingreso por proa del área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.
- ④ Cabina N° 2 de pasajeros: con puerta de ingreso por proa del área de salón; capacidad para 02 pasajeros y con servicio de baño completo independiente.

- ④ Sal6n: con puerta de ingreso a proa de la cubierta de buceo; 04 mesas para comedor; equipos de entretenimiento (TV, DVD, etc.); tableros de distribuci6n y control el6ctrico; y equipos electr6nicos de navegaci6n y de comunicaciones.
- ④ Cubierta de buceo: a popa de la cubierta principal, abierto a la intemperie, con una toldilla como prolongaci6n de la cubierta sobre la superestructura; con equipos para buceo; y rampa de embarque / desembarque a popa. Cuenta con un peque1o bar.

En la cubierta sobre la superestructura se encuentra la consola de mando, abierto a la intemperie. En dicha consola se encuentran equipos electr6nicos para navegaci6n y comunicaciones, as6 como los tableros de control para el accionamiento de las m1quinas principales.

Asimismo, en la cubierta sobre la superestructura se encuentra el sistema de palos para el velamen.

A popa de la embarcaci6n se encuentran los pescantes para maniobrar el bote auxiliar tipo zodiac.

V. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Cuenta con los siguientes tanques:

- ④ Combustible Diario: 01 en el casco de estribor, bajo el 1rea de cocina, de una cap. de 250 Gal. y construido de aluminio.
- ④ Combustible de Reserva: 02 en proa de la cubierta principal a Er./Br. de una cap. de 250 Gal. c/u. y construido de aluminio.
- ④ Agua Dulce: 02 en los cascos a Er./Br., bajo las cabinas 3 y 4, de una cap. de 525 Gal. c/u. y construidos de aluminio.
- ④ Aguas Servidas: 02; 01 bajo el 1rea de cocina y 01 bajo la cabina 5, de 100 Gal. c/u.

VI. ESTRUCTURA

CASCO:

El catamarán cuenta con 02 cascos de aluminio, con líneas de forma tipo “U” y de construcción longitudinal, con cuadernas, baos, longitudinales de fondo, longitudinales de costado y longitudinales de cubierta.

Todos los elementos estructurales que conforman el casco son de aluminio. Las cuadernas y baos son de perfil tipo “t” de alma 120 mm. ala 60 x 4 mm. Los longitudinales de fondo, costado y cubierta son de perfil tipo “t” de alma 50 mm. ala 50 x 4 mm. La eslora del fondo es Pt. 100 x 10 mm. La quilla es de 25.4 mm. de espesor.

Cada casco tiene subdivisiones con mamparos de aluminio de 6 mm. El forro de los cascos y cubiertas sobre estos son de aluminio de 6 mm. de espesor.

SUPERESTRUCTURA:

La superestructura se encuentra sobre la cubierta principal que une los dos cascos. El planchaje de la superestructura es de aluminio de 6 mm. de espesor; y cuenta con refuerzos transversales y longitudinales de Pt. 50 x 4 mm. Las cuadernas son de perfil tipo “t” de alma 120 mm. ala 60 x 4 mm.

La cubierta principal es de aluminio de 6 mm. de espesor; y cuenta con refuerzos transversales y longitudinales de Pt. 50 x 4 mm.

VII. SISTEMAS Y EQUIPOS INSTALADOS

Cuenta con dos salas de máquinas, Br. y Er., independientes entre sí, ubicadas a popa de casa casco, donde se encuentran las máquinas principales y demás equipos mecánicos y eléctricos. Asimismo, en su interior se encuentra el sistema de gobierno.

SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y GOBIERNO

Las máquinas principales son motores diesel marinos con las siguientes características:

Marca	YANMAR
Modelo	4LHP-DTP
Potencia	200 HP a 3300 RPM
Cilindros	4 en “L”
Arranque	Eléctrico
Caja de reducción	ZF 63 A (HSW 630 A1) Ratio “A” Continuous Duty Classification - reducción 2.52 a 1.

El montaje del motor y caja es través de una bancada común estructurada en el fondo a proa de sala de máquinas. El movimiento de la embarcación es producida por hélices de bronce de 3 palas de paso fijo y 21" Ø x 21" de paso (una hélice en cada línea de propulsión) unidas al motor por un eje de acero de 1 1/2". Cada línea de propulsión cuenta con un prensa estopa y una bocina exterior al casco que descansa sobre un arbotante.

El sistema de gobierno se encuentra a popa de cada sala de máquinas, y cuenta con pistones hidráulicos para su accionamiento. Adicionalmente, el eje barón puede ser accionado manualmente.

Cada sala de máquinas cuenta con sistema de ventilación forzado.

SISTEMA DE ACHIQUE

Este sistema corresponde al achique general de agua de los diferentes compartimientos, con salidas de 1"; este servicio cuenta con:

- ④ 10 Electro bombas Rule de 12 VDC 1"Ø; en las cabinas de pasajeros, camarote de tripulantes, cocina y salas de máquinas.
- ④ 01 Motobomba portátil auxiliar, Honda de 4 HP, con tubería de 2"Ø. Ubicada a popa en la cubierta sobre la caseta.

SISTEMA DE CONTRAINCENDIOS

Para el servicio de contra incendio se utilizan los siguientes equipos:

- ④ Un (01) botón pulsador de la alarma, en la entrada al salón.
- ④ Una (01) Motobomba portátil Honda de 4 HP, con tubería de 2"Ø (utilizada también para achique auxiliar).
- ④ Cuatro (04) botellas de CO2 fijo de 20 Lbs. c/u, 02 para cada sala de máquinas.
- ④ Una (01) botella de PQS de 10 Lbs., en la cocina.
- ④ Diecisiete (17) botellas de PQS de 2.5 Lbs. c/u, en las cabinas de pasajeros, camarotes de tripulantes, cocina, salón y cubierta de buceo.
- ④ Once (11) detectores de humo, en las cabinas de pasajeros, camarotes de tripulantes, cocina y salón.
- ④ Dos (02) cierres rápidos de combustible, en la cubierta de buceo.

EQUIPOS DE SEGURIDAD Y SALVAMENTO

Cuenta con el siguiente equipamiento:

- Dos (02) aros salvavidas circulares.
- Dos (02) aros salvavidas tipo “U”.
- Veintitres (23) chalecos salvavidas con luz y pito.
- Seis (06) luces de bengala de mano.
- Cuatro (04) luces de bengala con paracaídas.
- Dos (02) señales de humo.
- Una (01) pistola de señales.
- Una (01) radiobaliza (EPIRB).
- Un (01) respondedor de radar (SART).
- Dos (02) radios bidireccionales.
- Dos (02) balsas salvavidas autoinflables: Plastimo, para 10 personas c/u..
- Dos (02) botes auxiliares tipo zodiac:
 - Caribe C20 (capacidad para 12 personas, con motor fuera de borda Yamaha de 40 HP)
 - Caribe C14 (capacidad para 08 personas, con motor fuera de borda Yamaha de 15 HP)
- Un (01) equipo de primeros auxilios.

SISTEMA DE COMBUSTIBLE

El sistema de combustible ha sido previsto para cubrir los servicios de llenado y almacenamiento de petróleo a bordo. Esta compuesto por 01 tanque de combustible de diario construido en aluminio bajo el piso de la cocina y por 02 tanques de combustible de almacenamiento ubicados en proa de la cubierta. La línea de combustible del tanque de diario está compuesta por mangueras.

SISTEMA DE AGUA POTABLE

El sistema de agua potable para el servicio de abordó, estará equipado con 02 tanques de consumo diario bajo el piso de las cabinas 3 y 4. Adicionalmente cuenta con un desalinizador ubicado en la sala de máquinas de babor. La distribución hacia los puntos de consumo es a través de tubos de PVC.

SISTEMA ELECTRICO

La red eléctrica es alimentada por generadores de 110/220 VAC, además de contar con banco de baterías que proporciona 12 y 24 VAC para el funcionamiento de algunos equipos y sistemas de abordó.

Cuenta con tableros de distribución, conductos, cableado eléctrico, interruptores y lámparas adecuados para la embarcación. Asimismo, cuenta con luces de navegación y posición según IMCO 72.

El equipamiento para el sistema eléctrico es el siguiente:

- Ⓢ Un (01) generador Kohler modelo 21 CCOZ de 21 Kw 110/220 VAC., accionado por un motor Yanmar de 38 HP, ubicado en la sala de máquinas de estribor.
- Ⓢ Un (01) generador Kohler modelo 12.5 CCOZ de 12.5 Kw 110/220 VAC., accionado por un motor Yanmar de 38 HP, ubicado en la sala de máquinas de babor.
- Ⓢ Cuatro (04) alternadores de 12 VDC, acoplados a los motores Perkins y Yanmar en las salas de máquinas.
- Ⓢ Banco de baterías:
 - 02 De 12 VDC en la cubierta a proa, para el cabrestante del ancla.
 - 04 De 12 VDC en la salas de máquinas, para el arranque de los motores diesel.
 - 02 De 12 VDC en el salón, para los equipos electrónicos de navegación y comunicaciones.
 - 05 De 12 VDC en popa, para el funcionamiento de los equipos electrónicos de la consola de mando y las luces de navegación y posición.
- Ⓢ Un (01) cargador de baterías Power Mark, en el salón.
- Ⓢ Un (01) cargador de baterías Promatic 50-3, en la sala de máquinas de Br.
- Ⓢ Un (01) cargador de baterías True Charge 40, en la sala de máquinas de Br.
- Ⓢ Un (01) tablero eléctrico de 110 VAC, en el salón.
- Ⓢ Un (01) tablero eléctrico de 12 VDC, en el salón.

EQUIPOS AUXILIARES

- Ⓢ Un (01) desalinizador de 220 VAC, en sala de máquinas de babor.

- ☉ Una (01) electro bomba Pedrollo de 110 VAC 0.5 HP, para enfriamiento del motor auxiliar Yanmar en la sala de máquinas de babor.
- ☉ Dos (02) termas de 220 VAC 20 Gln., en las sala de máquinas de babor y estribor.
- ☉ Dos (02) compresores de 220 VAC para las neveras, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Una (01) electro bomba de 220 VAC para enfriamiento de los compresores, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Una (01) electro bomba Pedrollo de 110 VAC para agua dulce, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Una (01) electro bomba de 12 VDC auxiliar para agua dulce, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Una (01) electro bomba de 110 VAC para agua salada, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Una (01) electro bomba de 220 VAC para enfriamiento de los compresores, en la sala de maquinas de estribor.
- ☉ Dos (02) electro bombas de 12 VDC para gobierno, en las sala de máquinas de babor y estribor.

EQUIPOS DE NAVEGACION Y COMUNICACIÓN

Cuenta con los siguientes equipos de navegación y comunicaciones:

- ☉ Un (01) compás magnético Ritchie
- ☉ Un (01) radio HF Icom, modelo IC-M802
- ☉ Un (01) radio VHF Icom, modelo IC-M402
- ☉ Un (01) radio VHF Aniden, modelo MC635
- ☉ Un (01) radar Furuno, modelo 1720
- ☉ Un (01) radar Furuno, modelo 1623
- ☉ Una (01) ecosonda Raymarine, modelo ST60
- ☉ Un (01) navegador Garmin, modelo GPS MAP 180
- ☉ Un (01) piloto automático Raytheon

EQUIPOS DE AMARRE, FONDEO Y MANIOBRA

Cuenta con el siguiente equipamiento:

- ☉ Un (01) cabrestante eléctrico de 24 VDC en proa
- ☉ Una (01) cadena de acero galvanizado de 1/2" sin contrete x 80 mts.
- ☉ Un (01) ancla Fortress tipo danforth para fondeo

- ☉ Un (01) ancla Fortress tipo danforth, de respeto
- ☉ Nueve (09) molinetes
- ☉ Dos (02) bitas simples
- ☉ Dieciséis (16) cornamusas
- ☉ Dos (02) pescantes, en popa

PROTECCIÓN CATÓDICA

- ☉ Un (01) zinc a popa de la quilla, en cada casco.
- ☉ Un zinc (01) en el pantoque, en cada casco.
- ☉ Un zinc (01) en el arbotante, en cada casco.
- ☉ Un zinc (01) a proa de la pala de timón, en cada casco.

EQUIPOS DE BUCEO

Cuenta el siguiente equipamiento:

- ☉ Veinte (20) botellas de oxígeno
- ☉ Siete (07) equipos de buceo
- ☉ Un (01) compresor Bauer, de 220 VAC.
- ☉ Un (01) compresor Lushard, de 220 VAC.

VELAMEN

Actualmente la embarcación no cuenta con sistema de velamen De acuerdo a lo informado por el Armador, se encuentra en proceso su adquisición.

ACTA DE ESTABILIDAD Y TRIMADO

P06-003-CTAL-T/22-06

CATAMARAN DE PASAJEROS “AMAZONIA”

1 - Introducción

La presente acta de estabilidad y trimado analiza las posibles condiciones de estabilidad intacta que la embarcación de pasajeros “Amazonia” puede presentar durante su operación. Esta es un acta preliminar, pero que cubre los casos mas críticos que la embarcación puede presentar. Los criterios de estabilidad adoptados en este trabajo siguen las recomendaciones del Código Small Commercial Vessel and Pilot Boat (SCV Code) [1]. Los cálculos de estabilidad y las figuras presentadas en este documento fueron elaborados utilizando el programa Hecsalv for Windows Versión 7.06.

2 - Características de la embarcación

Nombre de la embarcación	: Amazonía
Tipo	: Velero Catamarán
Propietario	: LATINTOUR GALÁPAGOS S.C.C.
Dirección	: Diego de Almagro 1219 y la Niña Quito -Ecuador
Puerto Base	: Puerto Ayora, Islas Galápagos
Bandera	: Estados Unidos
Número de matrícula	: DL 59615
Patente de Operación Turística	: N° 00077 Vigente al 31 de enero del 2,006
Área de operación	: Provincia de Galápagos
Contructor / Año	: Alumarine, Francia - 1,990
Material del casco	: Aluminio
Eslora total	: 22.00 m.
Eslora entre perpendiculares	: 18.50 m.
Manga Moldeada	: 10.39 m.
Puntal Moldeado	: 2.98 m.
Calado de diseño	: 1.00 m.
Desplazamiento	: 30.97 Tons. (calado de diseño)
T.R.B.	: 96.22
T.R.N.	: 42.98
Potencia instalada	: (2) YANMAR 4LHP-DTP (200 BHP) c/u
Velocidad estimada	: 11.00 nudos
Cap. de combustible	: 2.84 m3 (750 Gal).
Cap. de agua dulce	: 3.97 m3 (1050 Gal).
Cap. de aguas sucias	: 0.76 m3 (200 Gal).
Autonomía	: 7 días
Tripulación	: 07 Tripulantes 16 Pasajeros

3 - Disposición de los Pesos y Tanques

Item	Vol (m ³)	ρ (Ton/m ³)	Δ (Ton)	LCG (m)	VCG (m)	TCG (m)
Peso leve	-----	-----	22.41	-2.150	0.699	0.000
Pasajeros	-----	-----	2.07	0.000	1.200	4.000
TQ PR-ER	0.947	0.8850	0.84	0.172	0.297	4.000
TQ PR-BR	0.947	0.8850	0.84	0.172	0.297	-4.000
TQ PR-DIARIO	0.947	0.8850	0.84	5.261	2.806	4.000
TQ-H2O-ER	1.985	1.0000	1.99	3.895	0.345	4.000
TQ-H2O-BR	1.985	1.0000	1.99	3.895	0.345	-4.000
TQ-SER-ER	0.380	1.0000	0.38	1.552	0.285	4.000
TQ-SER-BR	0.380	1.0000	0.38	1.552	0.285	-4.000

4 - Estabilidad Intacta e Trimado

4.1 Criterio de estabilidad

Parámetro	Unidad	Requerido
Área hasta 15°	m-rad	0.07
Área entre 30° e 40°	m-rad	0.03
Angulo del máximo GZ	Grados	15
GZ para 30°	m	0.2
GM inicial	m	0.15

4.2 Condiciones de estabilidad

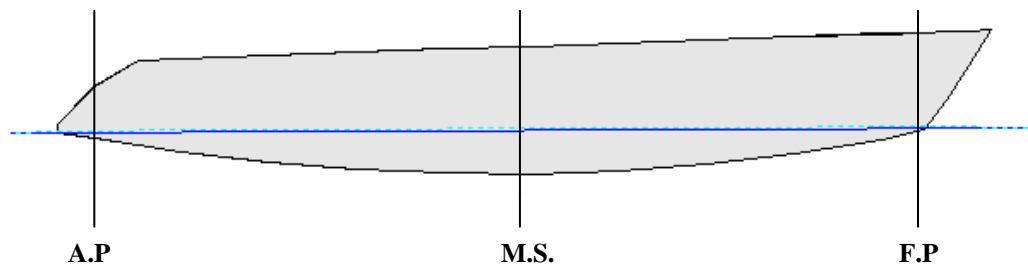
Las condiciones de estabilidad a ser analizadas son las siguientes:

4.2.1 Salida de Puerto – 100% de Consumibles

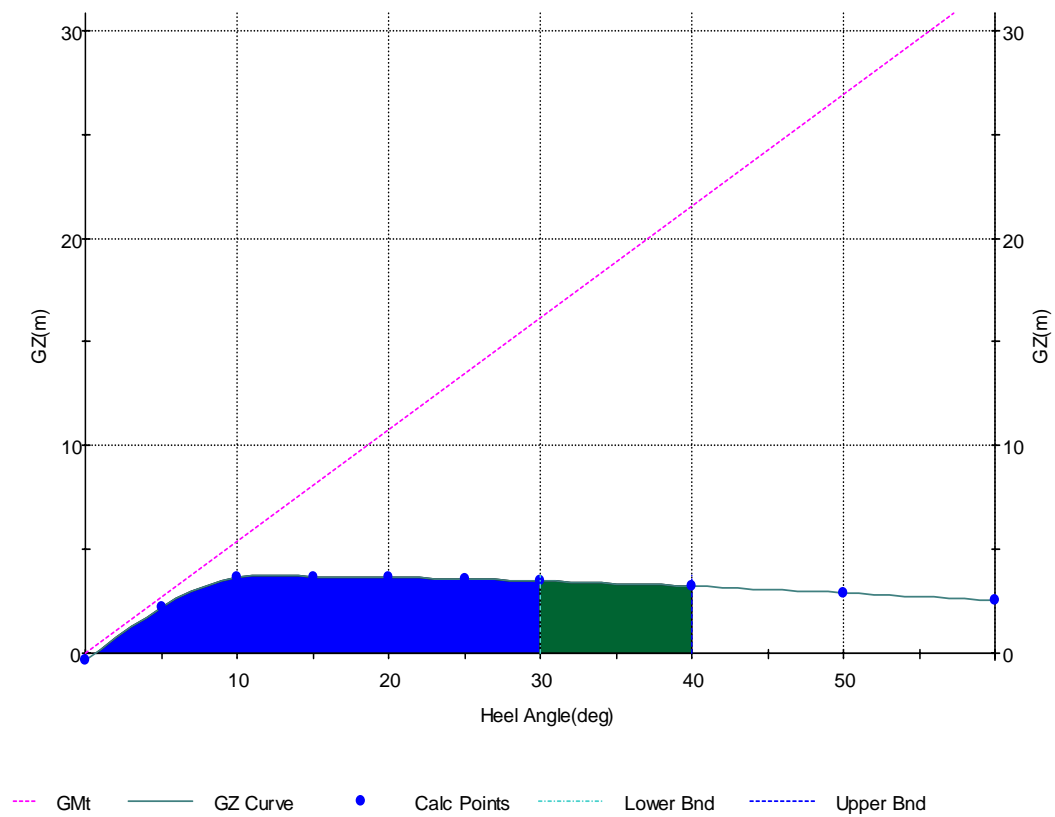
Todos los tanques están cargados en su capacidad máxima.

4.2.1.1 - Tabla de Trimado

→ SALIDA DE PUERTO - 100% DE CONSUMIBLES					
Item	Weight MT	VCG m	LCG m-MS	TCG m-CL	FSMom m-MT
Light Ship	22	0.699	2.150A	0.000	----
Constant	2	1.200	0.000	4.000S	0
Diesel Oil	3	1.133	1.869F	1.333S	0
Fresh Water	4	0.345	3.895F	0.000	0
SW Ballast	0	----	----	----	----
Misc. Weights	0	----	----	----	----
Displacement	31	0.722	0.905A	0.376S	0
Stability Calculation			Trim Calculation		
KMt	31.578	m	LCF Draft	0.994	m
VCG	0.722	m	LCB (even keel)	1.109A	m-MS
GMt (Solid)	30.856	m	LCF	1.419A	m-MS
FSc	0.000	m	MT1cm	1	m-MT/cm
GMt (Corrected)	30.856	m	Trim	0.110	m-F
			List	0.75	deg
Specific Gravity	1.0250				
Hull calcs from tables			Tank calcs from tables		
Drafts					
Draft at A.P.	0.946	m			
Draft at M.S.	1.001	m			
Draft at F.P.	1.055	m			
Draft at Aft Marks	0.946	m			
Draft at Mid Marks	1.001	m			
Draft at Fwd Marks	1.055	m			



4.2.1.2 - Curva de Estabilidad Intacta



Parámetro	Unidad	Disponible	Requerido	Evaluación
Área hasta 15°	m-rad	0.73	0.07	Cumple
Área entre 30° e 40°	m-rad	0.58	0.03	Cumple
Angulo del máximo GZ	Grados	15	15	Cumple
GZ para 30°	m	3.438	0.2	Cumple
GM inicial	m	30.856	0.15	Cumple

4.2.2 Navegación

Las siguientes condiciones desfavorables son analizadas:

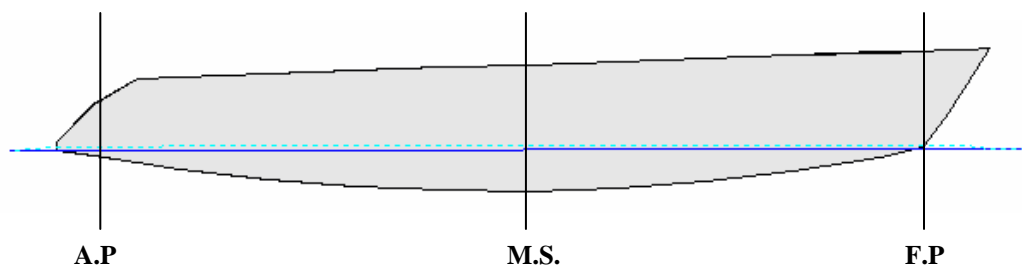
4.2.2.1 - Navegación 50% Consumibles de ER – 100%

Consumibles de BR

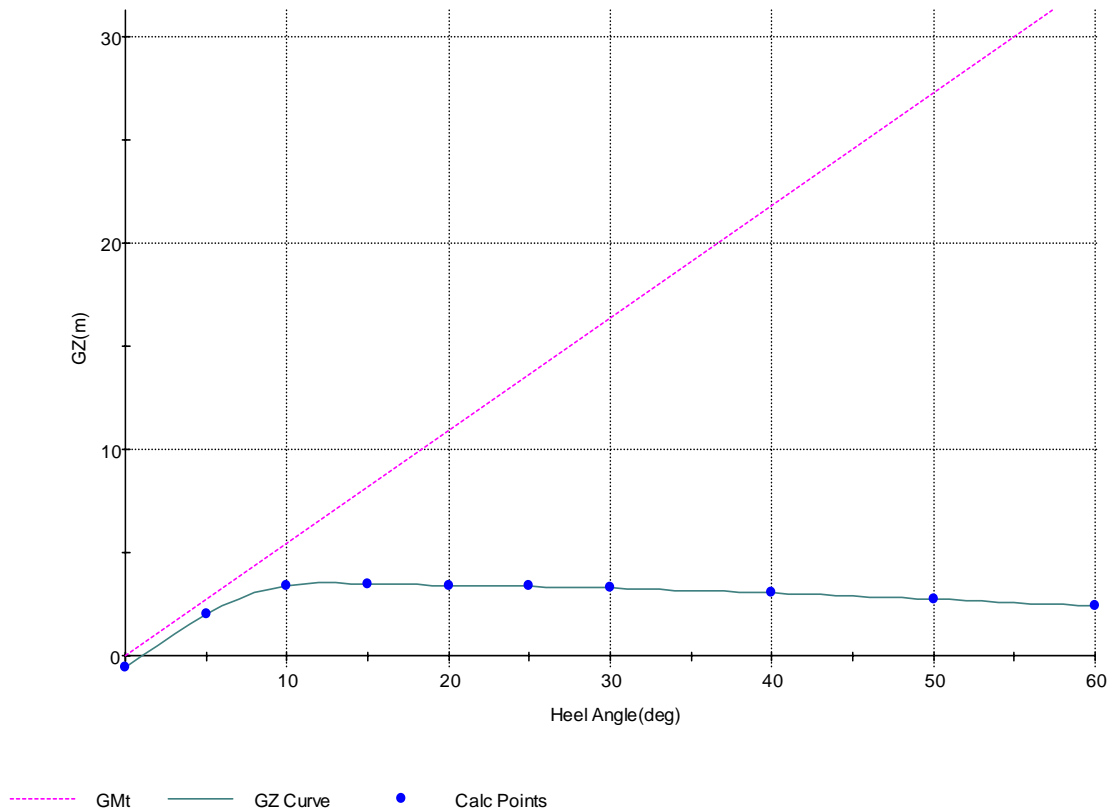
Esta condición contempla que la mitad de los consumibles de estribor fue utilizada.

4.2.2.1.1 - Tabla de Trimado

→ NAVEGACIÓN 50% CONSUMIBLES BR - 100% CONSUMIBLES ER						
Item	Weight MT	VCG m	LCG m-MS	TCG m-CL	FSMom m-MT	
Light Ship	22.410	0.70	2.15A	0.00	---	
Constant	2.070	1.20	0.00	4.00S	0.000	
Diesel Oil	2.095	1.30	2.21F	2.40S	0.000	
Fresh Water	2.977	0.35	3.90F	1.33S	0.000	
SW Ballast	0.760	0.25	1.55F	0.12P	0.000	
Misc. Weights	0.000	---	---	---	---	
Displacement	30.312	0.73	1.02A	0.57S	0.000	
Stability Calculation			Trim Calculation			
KMt	32.01	m	LCF Draft	0.98	m	
VCG	0.73	m	LCB (even keel)	1.10A	m-MS	
GMt (Solid)	31.28	m	LCF	1.41A	m-MS	
FSc	0.00	m	MT1cm	0.569	m-MT/cm	
GMt (Corrected)	31.28	m	Trim	0.05	m-F	
			List	1.0S	deg	
Specific Gravity	1.0250					
Hull calcs from tables				Tank calcs from tables		
Drafts						
Draft at A.P.	0.96	m				
Draft at M.S.	0.99	m				
Draft at F.P.	1.01	m				
Draft at Aft Marks	0.96	m				
Draft at Mid Marks	0.99	m				
Draft at Fwd Marks	1.01	m				



4.2.2.1.2 - Curva de Estabilidad Intacta



Parámetro	Unidad	Disponible	Requerido	Evaluación
Área hasta 15°	m-rad	0.68	0.07	Cumple
Área entre 30° e 40°	m-rad	0.55	0.03	Cumple
Angulo del máximo GZ	Grados	15	15	Cumple
GZ para 30°	m	3.27	0.2	Cumple
GM inicial	m	31.28	0.15	Cumple

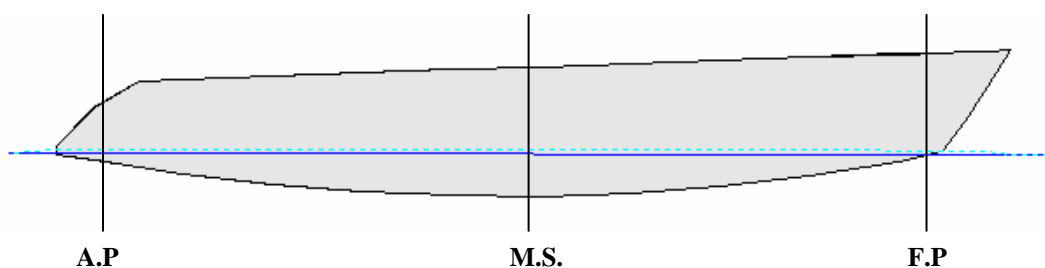
4.2.2.2 - Navegación 10% Consumibles de ER – 100%

Consumibles de BR

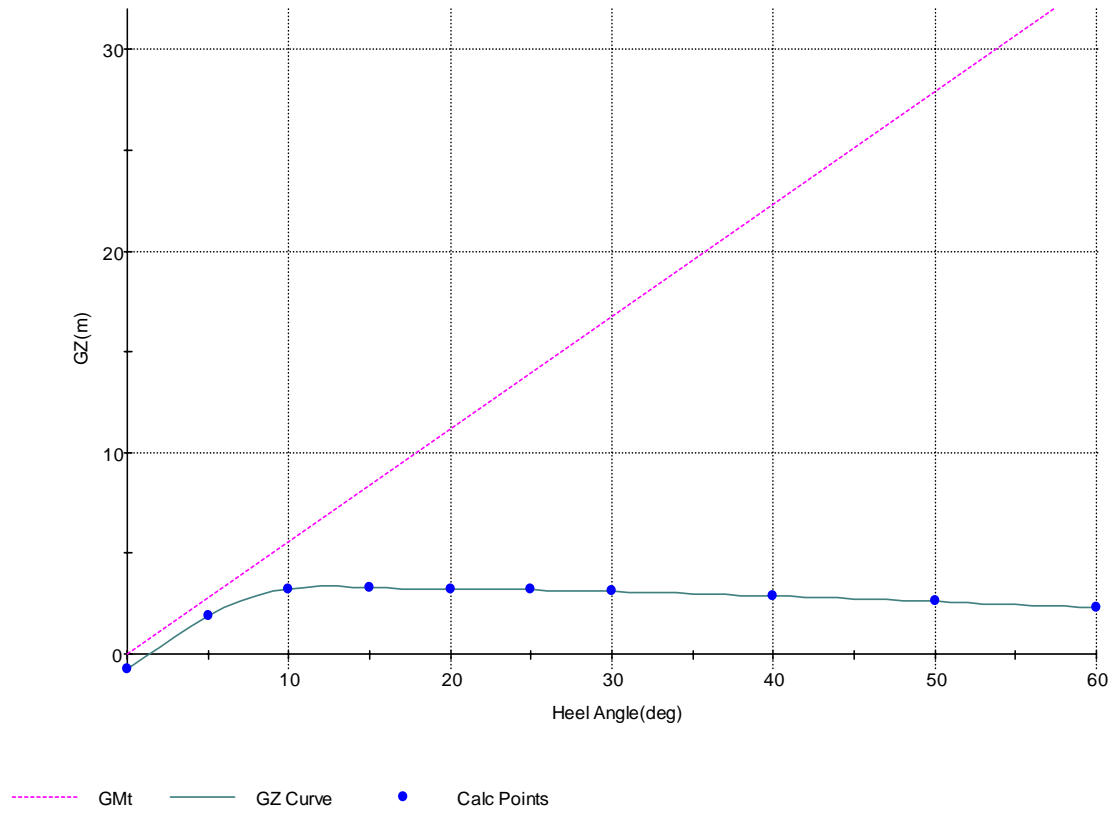
Esta condición contempla que la mitad de los consumibles de estribor fue utilizada.

4.2.2.2.1 - Tabla de Trimado

→ NAVEGACIÓN 10% CONSUMIBLES BR - 100% CONSUMIBLES ER					
Item	Weight MT	VCG m	LCG m-MS	TCG m-CL	FSMOM m-MT
Light Ship	22.410	0.70	2.15A	0.00	----
Constant	2.070	1.20	0.00	4.00S	0.000
Diesel Oil	1.760	1.49	2.60F	3.62S	0.000
Fresh Water	2.184	0.35	3.90F	3.27S	0.000
S/W Ballast	0.760	0.25	1.55F	0.12P	0.000
Misc. Weights	0.000	----	----	----	----
Displacement	29.183	0.74	1.16A	0.74S	0.000
Stability Calculation		Trim Calculation			
KMt	32.75	m	LCF Draft	0.96	m
VCG	0.74	m	LCB (even keel)	1.08A	m-MS
GMt (Solid)	32.01	m	LCF	1.40A	m-MS
FSc	0.00	m	MT1cm	0.553	m-MT/cm
GMt (Corrected)	32.01	m	Trim	0.04	m-A
			List	1.3S	deg
Specific Gravity	1.0250				
Hull calcs from tables			Tank calcs from tables		
Drafts					
Draft at A.P.	0.98	m			
Draft at M.S.	0.96	m			
Draft at F.P.	0.94	m			
Draft at Aft Marks	0.98	m			
Draft at Mid Marks	0.96	m			
Draft at Fwd Marks	0.94	m			



4.2.2.2 - Curva de Estabilidad Intacta



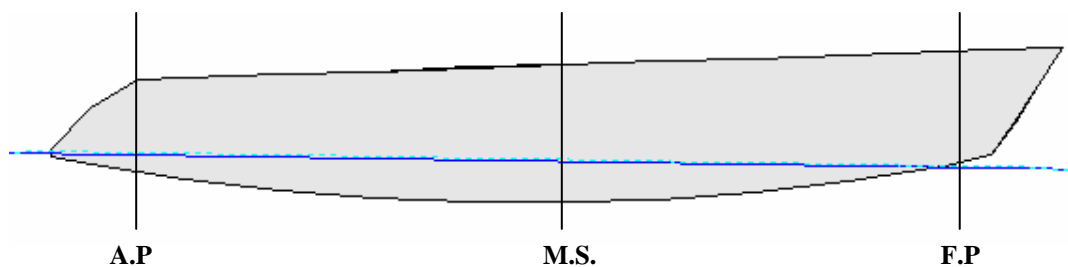
Parámetro	Unidad	Disponible	Requerido	Evaluación
Área hasta 15°	m-rad	0.64	0.07	Cumple
Área entre 30° e 40°	m-rad	0.52	0.03	Cumple
Angulo del máximo GZ	Grados	15	15	Cumple
GZ para 30°	m	3.10	0.2	Cumple
GM inicial	m	32.01	0.15	Cumple

4.2.3 Llegada a Puerto 10% de Consumibles

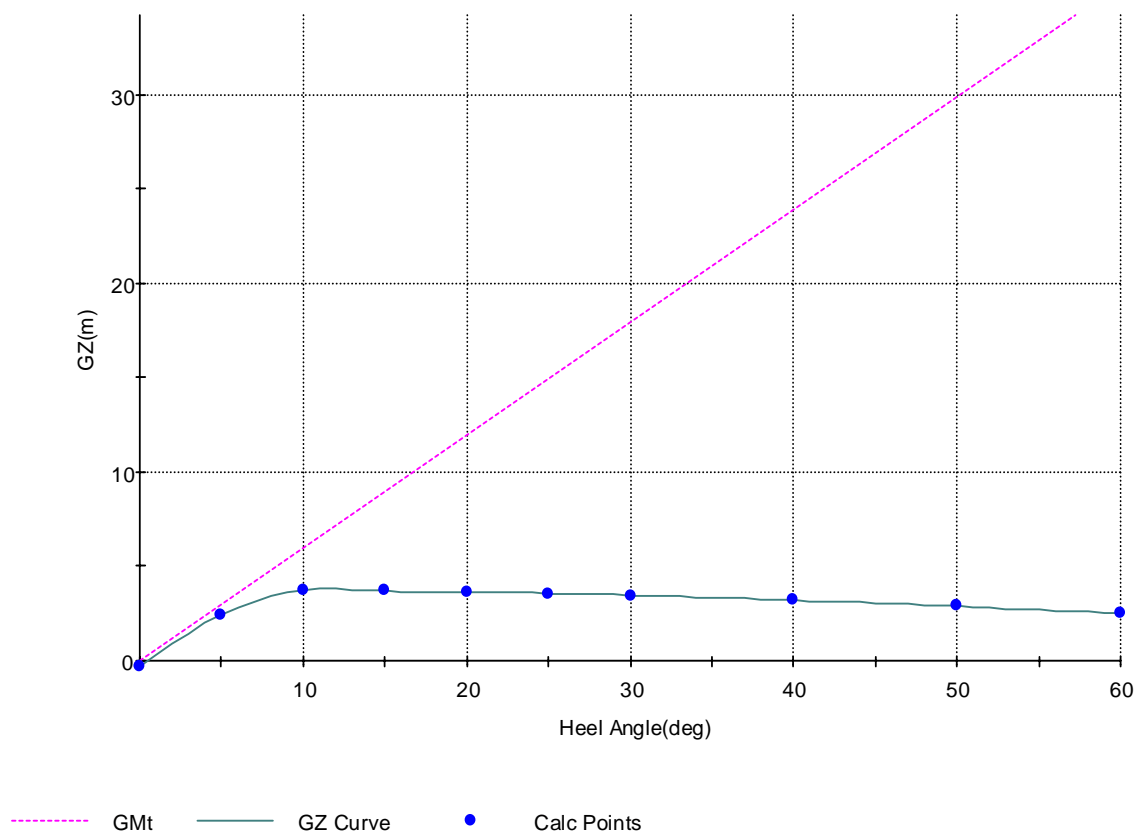
En esta condición todos los consumibles fueron utilizados, quedando únicamente un 10% de estos en todos los tanques.

4.2.3.1 – Tabla de Trimado

→ LLEGADA A PUERTO - 10% DE CONSUMIBLES					
Item	Weight MT	VCG m	LCG m-MS	TCG m-CL	FSMom m-MT
Light Ship	22.410	0.70	2.15A	0.00	----
Constant	2.070	1.20	0.00	4.00S	0.000
Diesel Oil	0.251	1.13	1.87F	1.33S	0.000
Fresh Water	0.397	0.35	3.90F	0.00	0.000
SW Ballast	0.760	0.25	1.55F	0.12P	0.000
Misc. Weights	0.000	----	----	----	----
Displacement	25.888	0.72	1.74A	0.33S	0.000
Stability Calculation		Trim Calculation			
KMt	34.93 m	LCF Draft	0.90 m		
VCG	0.72 m	LCB (even keel)	1.04A m-MS		
GMT (Solid)	34.20 m	LCF	1.38A m-MS		
FSc	0.00 m	MT1cm	0.507 m-MT/cm		
GMT (Corrected)	34.20 m	Trim	0.36 m-A		
		List	0.5S deg		
Specific Gravity	1.0250				
Hull calcs from tables	Tank calcs from tables				
Drafts					
Draft at A.P.	1.06 m				
Draft at M.S.	0.88 m				
Draft at F.P.	0.70 m				
Draft at Aft Marks	1.06 m				
Draft at Mid Marks	0.88 m				
Draft at Fwd Marks	0.70 m				



4.2.3.2 – Curva de Estabilidad Intacta



Parámetro	Unidad	Disponible	Requerido	Evaluación
Área hasta 15°	m-rad	0.77	0.07	Cumple
Área entre 30° e 40°	m-rad	0.58	0.03	Cumple
Ángulo del máximo GZ	Grados	15	15	Cumple
GZ para 30°	m	3.45	0.2	Cumple
GM inicial	m	34.20	0.15	Cumple

5 - Conclusiones

La embarcación cumple con todos los criterios de estabilidad establecidos. El brazo restaurador se presenta con un ángulo de aproximadamente 12° en todos los casos contemplados, pero la diferencia del brazo GZ con el brazo en el ángulo de 15° es despreciable, por lo que se considera constante y por lo tanto que cumple el criterio.

6 - Referencias

- [1] Small Commercial Vessel and Pilot Boat (SCV)
Disponible em el site <http://www.mcga.gov.uk>

