

**DISEÑO Y OPTIMIZACION DE CASCOS DE PLANEADO FABRICADOS EN
POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO**

CARLOS FRANCISCO CHIMA SIERRA

JORGE ENRIQUE GARCIA TACHACK

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2009

**DISEÑO Y OPTIMIZACION DE CASCOS DE PLANEADO FABRICADOS EN
POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO**

CARLOS FRANCISCO CHIMA SIERRA

JORGE ENRIQUE GARCIA TACHACK

Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

JAIRO F. USECHE VIVERO

Ingeniero Mecánico, PH. D Facultad de Ingenierías

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2009

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena de Indias, Octubre de 2009

DEDICATORIA

A través de estas palabras deseo enormemente dedicar este trabajo de investigación a Dios, quien ha sido la guía a lo largo de mi vida personal y profesional, dándome la sabiduría y la perseverancia para lograr las metas propuestas.

A mi esposa Angélica Maria Paz Martelo, por estimularme en los momentos difíciles, por su compañía en el camino de la vida, su paciencia y sobre todo su amor incalculable.

A mi madre Aminta Elena Sierra Morales, por enseñarme los valores y principios para ser mejor persona, e insistir hasta el cansancio en que “Si se puede”.

A mis hermanos Ludwing Mariano Chimá Sierra y José Raúl Chimá Sierra, por que son la llama que enciende mis ganas de seguir adelante.

A mi padre Ludwing Mariano Chimá Chimá, por su apoyo incondicional y por mostrarme el camino al éxito.

A mis tutores en el ámbito laboral Miguel Caro, Efraín Dueñas, Jorge E. Jaramillo y Miguel A. Pabon, por compartir sus invaluable conocimientos y confiar en mis capacidades.

Finalmente, a mi familia y amigos, por que con su cariño y consejos las debilidades se convierten en fortalezas.

Carlos Francisco Chimá Sierra

DEDICATORIA

A mi madre Maria del Rosario Tachack Tatís y mi hermana Janece Cristina García Tachack, gracias por su apoyo incondicional y por estar presentes en cada día de mi vida.

A la empresa EDUARDOÑO S.A, departamento de Servicio técnico regional costa atlántica y al departamento de ingeniería fábrica de botes, sus aportes a nivel laboral han sido de gran ayuda para crecer como profesional.

Jorge Enrique García Tachack

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan sus más sinceros agradecimientos a:

Agradecer especialmente a nuestro Director de tesis Jairo F. Useche Vivero, por aceptar nuestra propuesta de investigación, convertirse en nuestro mentor y guía, por su especial colaboración para no detenernos en los puntos álgidos de la investigación y lograr finalizarla.

A la Universidad Tecnológica de Bolívar y al pool de profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica, por su tiempo, paciencia y dedicación para transmitirnos los conceptos académicos fundamentales a través de las herramientas tecnológicas que siempre estuvieron a nuestra disposición.

Finalmente, a la empresa Eduardoño S.A. y a todos sus miembros por convertirse en nuestra escuela en un área de la Ingeniería fundamental para el desarrollo de la economía de la Costa Atlántica y el país en general.

Cartagena de Indias, Octubre 13 de 2009

Señores:

COMITÉ DE EVALUACION

Programa de Ingeniería Mecánica

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados señores:

De la manera mas cordial, me permito presentarles para su estudio, consideración y aprobación el trabajo de grado titulado “**DISEÑO Y OPTIMIZACION DE CASCOS DE PLANO FABRICADOS EN POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO**”, realizado por los estudiantes Carlos Francisco Chimá Sierra y Jorge Enrique García Tachack, como requisito para optar el titulo de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

Jairo F. Useche Vivero

Cartagena de Indias, Octubre 13 de 2009

Señores:

COMITÉ DE EVALUACION

Programa de Ingeniería Mecánica

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Estimados señores:

De la manera mas cordial, nos permitimos presentarles para su estudio, consideración y aprobación el trabajo de grado titulado “**DISEÑO Y OPTIMIZACION DE CASCOS DE PLANEADO FABRICADOS EN POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO**”, como requisito para optar el titulo de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

Carlos Francisco Chimá Sierra

C.C. 7.917.611 de Cartagena

Jorge Enrique García Tachack

C.C. 9.236.646 de Cartagena

AUTORIZACION

Nosotros, Carlos Francisco Chimá Sierra y Jorge Enrique García Tachack, identificados con cedula de ciudadanía 7.917.611 de Cartagena y 9.236.646 de Cartagena respectivamente, autorizamos a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso del trabajo de grado y publicarlo en el catalogo On – line de la biblioteca.

Carlos Francisco Chimá Sierra

C.C. 7.917.611 de Cartagena

Jorge Enrique García Tachack

C.C. 9.236.646 de Cartagena

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	22
1. OBJETIVOS	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2. CLASIFICACION TIPOS DE NAVEGACION	24
2.1 TIPO DESPLAZAMIENTO PARCIALMENTE SUMERGIDO	24
2.2 TIPO SEMIDESLIZAMIENTO (SEMI PLANEO)	26
2.3 TIPO DESLIZAMIENTO (PLANEO)	27
2.4 RESISTENCIA A LA NAVEGACIÓN	28
2.4.1 Tipo desplazamiento parcialmente sumergido	28
2.4.2 Tipo semideslizamiento y deslizamiento	28
3. DISEÑO Y CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN	30
3.1 ESCOGENCIA DEL DISEÑO CORRECTO	31
3.2 REQUISITOS ESTRUCTURALES Y DE DISEÑO	33
4. REGLAS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CASCOS EN PRFV	37
4.1 ESTRUCTURA INFERIOR (CASCO)	37
4.1.1 General	37

4.1.2 Laminado de superficie sencillo	37
4.1.3 Paneles de sandwich	47
4.2 ARMAZÓN INFERIOR (COSTILLAS)	49
4.2.1 General	49
4.2.2 Vigas	50
4.2.3 Cubierta	50
4.2.4 Pisos	50
4.2.5 Estructura	50
5. HERRAMIENTAS PARA ANALISIS ESTRUCTURAL	51
5.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)	51
5.2 METODOLOGÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	53
5.2.1 Fundamentos teóricos	55
5.2.2 Etapas de aplicación	56
6. ALTA VELOCIDAD HIDRODINAMICA	60
6.1 PLANEEO	60
6.2 CASCOS EN " V " (DEADRISE)	64
6.3 FUERZAS EN UN CASCO DE PLANEEO	68
6.4 PROCEDIMIENTO PARA ENCONTRAR EL ANGULO DE TRIM DE EQUILIBRIO Y LA CORRESPONDIENTE RESISTENCIA Y POTENCIA	74

7. OPTIMIZACION DEL TRANSOM DE UN BOTE EN PRFV CON 02	
MOTORES FUERA DE BORDA	77
7.1 ASPECTOS BASICOS DE OPTIMIZACION	78
7.2 OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO	80
7.3 ALGORITMOS GENETICOS	83
7.4 OPTIMIZACION TRANSOM FABRICADO EN PRFV	84
7.5 CALCULO DE LA FUERZA DE EMPUJE PRODUCIDA EN LA HELICE	85
7.6 CALCULO DE FUERZAS EN LOS PUNTOS DE ANCLAJE DEL MOTOR	92
7.7 CALCULOS DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN EL TRANSOM	94
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFIA	105
ANEXOS	107

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de área – tipo desplazamiento parcialmente sumergido	25
Figura 2. Curva de área – tipo semideslizamiento	26
Figura 3. Curva de área-tipo deslizamiento	27
Figura 4. Resistencia a la navegación	29
Figura 5. Diseño en espiral	32
Figura 6. Determinación de la profundidad del casco en medio del bote	35
Figura 7. Localización de la mitad del bote	36
Figura 8. Espesor de paneles curvos	40
Figura 9. Espesor quillas de placa en cascos de una sola pieza	42
Figura 10. Espesor quillas de placa en cascos moldeados en mitades	42
Figura 11. Espesor de quillas verticales y tracas	44
Figura 12. Espesor de quillas verticales estabilizadas	46
Figura 13. Espesor de chines y transoms	46
Figura 14. Tipos de elementos	57
Figura 15. Distribución de presión y velocidad parte inferior superficie de Planeo	61
Figura 16. Fuerzas en una superficie de planeo	63

Figura 17. Influencia del casco en “V” en el roció y las fuerzas de Presión	65
Figura 18. Calculo de la resistencia por fricción en el casco	67
Figura 19. Fuerzas en un casco de planeo	69
Figura 20. Momentos, trim y resistencia	71
Figura 21. Calculo resistencia por fricción	72
Figura 22. Método para hallar el centro de gravedad	73
Figura 23. Clasificación métodos de optimización	79
Figura 24. Principio de Pareto entre soluciones para f_{10} y f_{20}	82
Figura 25. Bote 36 pies con 02 motores de 200 HP	85
Figura 26. Fuerzas en motor fuera de borda	92
Figura 27. Geometría sección del casco a analizar	95
Figura 28. Enmallado geometría y fuerzas aplicadas en transom	95
Figura 29. Secciones donde el desplazamiento se limita a cero	96
Figura 30. Resultados secuencia laminación MWM	96
Figura 31. Resultados secuencia laminación MRMWM	97
Figura 32. Resultados secuencia laminación MRMRMWM	97
Figura 33. Resultados secuencia laminación MRMRMRMWM	98
Figura 34. Resultados secuencia laminación MRMRMRMRMWM	98
Figura 35. Factor de seguridad Vs Deflexión	100

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1: Coeficiente de paneles planos	39
TABLA 2: Coeficiente de paneles curvos	41
TABLA 3: Coeficiente de paneles de sandwich	48
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en análisis de transom	94
Tabla 5. Resumen análisis de resultados numéricos transom	99
Tabla 6. Parametrización de resultados y mano de obra secuencias de laminación	99

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Gráficos número de Scantling	107
ANEXO B: Imágenes bote de planeo	110
ANEXO C: Imágenes proceso fabricación transom	111

GLOSARIO

Aparejos: Conjunto de mástiles, velas y cabos de una embarcación a vela.

Babor: En un barco y en cualquier medio de transporte en el agua, es el lado izquierdo en el sentido de la marcha o, más exactamente, el lado izquierdo mirando hacia proa.

Bovedilla: Un plano extremo del barco. La parte inferior y más inclinada de la popa.

CAD: Diseño Asistido por Computadora. Regularmente son terminales de control numérico que pueden estar conectadas a la red.

Casco: El armazón de un barco. El casco comprende la estructura interna compuesta por la quilla, cuadernas, baos, el forro exterior y la cubierta sin incluir los mástiles, ni el casillaje ni los cables o cabos. El casco puede ser de madera, hierro, acero, goma, hormigón, poliéster, fibra de vidrio, aluminio, entre otros materiales.

Chines (Tracas): Fila de tablas o planchas que corren de la roda al codaste.

Chopped strand mat: Mat de hilos cortados o CSM es una forma de refuerzo utilizados en plástico reforzado con fibra de vidrio. Se compone de fibras de vidrio establecidos al azar entre sí y unidas por un aglutinante.

Costillas: Vulgarismo que se refiere a cada una de las cuadernas del barco.

Cubierta (náutica): Las cubiertas son cada una de las superficies (suelos) de madera o metálicos de un buque (barco) que, a diferentes alturas respecto de la quilla, afirmados sobre los baos, dividen el buque horizontalmente.

Deadrise: Nombre que se le da a los cascos en forma de "V".

Estribor: Es en un barco, y en cualquier medio de transporte en el agua, el lado derecho en el sentido de la marcha o, más exactamente, el lado derecho mirando hacia proa (la parte delantera del barco).

Elevación (tilt): Es la posición en la que se eleva el motor para su almacenamiento.

Fuerza de flotación: El principio de Arquímedes afirma lo siguiente: existe una fuerza de flotación sobre un objeto igual al peso del líquido desalojado, la fuerza de flotación es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo sumergido.

Gelcoat: Es una capa de gel utilizado para proporcionar un acabado de alta calidad en la superficie visible de un reforzado con fibra de material compuesto. Los gelcoats más comunes están basados en epoxi o resina de poliéster insaturado química. Gelcoats se modifican las resinas que se aplican a los moldes en el estado líquido. Se curan para formar polímeros entrecruzados y posteriormente una copia de seguridad con las matrices de polímeros compuestos, a menudo mezclas de resina de poliéster y fibra de vidrio o resina epoxi de vidrio, kevlar y / o fibras de carbono.

Hidroestática: Es la rama de la mecánica de fluidos o de la hidráulica, que estudia los fluidos en estado de equilibrio, es decir, sin que existan fuerzas que alteren su movimiento o posición.

Inclinación (trim): Es la posición en la que se inclina el motor para poder navegar en crucero.

Molde: Un molde es una pieza, o un conjunto de piezas acopladas, interiormente huecas pero con los detalles e improntas en negativo del futuro sólido que se desea obtener.

Mono casco: Se denominan monocasco los buques que no poseen una doble barrera de separación a lo largo de toda la eslora de carga entre los tanques de carga

Motor fuera de borda: Es un motor de combustión interna que se utiliza para impulsar embarcaciones. Se instala en la popa por fuera de la borda de la embarcación.

Nudos: Unidad de velocidad. Equivale a una milla por hora.

Nudillos: Articulación en la curva de popa.

Número de scantling (escantillado): Número determinado por las dimensiones de la embarcación, se utiliza para ingresar a una base de datos de embarcaciones exitosas y así obtener datos como espesores de cascos, laminaciones, etc.

Patín del casco: Superficie inferior del casco que entra en contacto con el agua.

Pecho de mar (tajamar): Pieza que prolonga la quilla, empalmándose a ésta en dirección vertical o inclinada hasta la cubierta, rematando al casco por la proa (sinónimo de tajamar).

Planeo: Condición en la que el casco esta por fuera del agua desapareciendo el desplazamiento y manteniéndose sobre el agua a pesar de su peso por la presión de la superficie del casco sobre la superficie del agua. El fenómeno es el mismo al del patín de un ski acuático.

Popa: Se designa con el nombre de popa a la terminación posterior de la estructura del buque

Power trim and tilt: Por su sigla en ingles es el mecanismo que permite modificar las posiciones de inclinación y elevación del motor.

Presión hidrodinámica: Es la presión que un fluido ejerce sobre un cuerpo que se encuentra en movimiento.

PRFV: Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, es un material compuesto, constituido por una estructura resistente de fibra de vidrio y un material plástico que actúa como aglomerante de las mismas.

Proa: Se llama proa o a la parte delantera de un barco que va cortando las aguas del mar.

Helice: Es un dispositivo formado por un conjunto de elementos denominados palas o alabes, montados de forma concéntrica alrededor de un eje, girando alrededor de éste en un mismo plano. Su función es transmitir a través de las palas su propia energía cinética (que adquiere al girar) a un fluido, las hélices y los dispositivos derivados de ellas se emplean para multitud de propósitos: refrigeración, compresión de fluidos, generación de electricidad, propulsión de vehículos e incluso para la generación de efectos visuales.

OPC: Por su sigla en inglés Coeficientes propulsivos totales. Éstos incluyen componentes tales como deducción de empuje, fracción de la estela, eficacia del propulsor en mar abierto, y eficacia rotativa relativa del propulsor. Obviamente, cada uno depende de la forma del casco, el tipo de propulsor, y la velocidad.

Quilla: En náutica pieza que se ubica de popa a proa por la parte inferior del barco y en la que se asienta todo su armazón.

Resina: La resina es cualquiera de las sustancias de secreción de las plantas con aspecto y propiedades más o menos análogas a las de los productos así denominados. Del latín resina. Se puede considerar como resina las sustancias que sufren un proceso de polimerización o secado dando lugar a productos sólidos siendo en primer lugar líquidas.

Sanduche: Constitución básicamente de dos pieles de poliéster, un núcleo y dos capas de adhesivo, aunque también se le puede incluir diferentes refuerzos metálicos, en madera o pultrusión, según las necesidades.

SHP: Por su sigla en inglés estimación de los caballos de fuerza en el eje para cada forma de monocasco.

Sentina: Partes interiores bajas del casco donde se deposita el agua que se filtra, los derrames, etc.

SLR: Por su sigla en inglés es la relación que existe entre la velocidad de la embarcación y la longitud de la misma.

Transom (Espejo de popa): Superficie que forma la popa de una embarcación, en ella se instalan los motores fuera de borda.

Placa anticavitación: Aleta ubicada en la transmisión del motor fuera de borda. Esta placa está diseñada de manera que la hélice no succiona el aire durante la alta velocidad del motor

Virola: Abrazadera de metal que se pone por remate o por adorno en algunos instrumentos.

Woven roving: Es una tela de Fibra de Vidrio diseñada para laminación manual (HAND LAY-UP) reforzando resinas de Poliéster no saturadas y Vinylester.

INTRODUCCION

“Cuan Inadecuado es llamar al planeta Tierra cuando en realidad es Océano”.¹

La industria naval es un campo bastante amplio el cual ha generado gran actividad comercial y tecnológica a lo largo de los años, es así como se han creado procedimientos, normas, utilización de nuevos y mejores materiales, etc, para lograr unificar criterios al momento de diseñar, transformar y poner en funcionamiento una embarcación.

Pero muchas veces los controles son pobres al momento de verificar el correcto funcionamiento tanto estructural como de navegación de una embarcación, dando la oportunidad que personas y/o empresas que no tienen los conocimientos ni la experiencia en el área náutica, procedan a diseñar, transformar, reparar, entre otros aspectos, embarcaciones que podrían poner en riesgo la vida de las personas que las utilicen.

En este trabajo se describen las principales normas y procedimientos para lograr diseñar cascos de botes de planeo fabricados en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y las bases para la realización de procesos de optimización en la parte estructural de los mismos, para ello la investigación se baso en ubicar la teoría de los temas descritos a continuación:

Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV), diseño de botes de planeo, técnicas de optimización y método de elementos finitos (MEF).

Por ultimo se presentara un análisis estructural de una sección del casco, con el objetivo de explicar en detalle un proceso de optimización.

¹ Arthur C. Clarke. Escritor de ciencia ficción

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer el procedimiento para el diseño y optimización estructural de cascos de botes de planeo fabricado en PRFV partiendo de una geometría establecida, empleando para ello la revisión de las teorías existentes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la teoría empleada en el diseño de botes en PRFV.
- Integrar la teoría y los parámetros establecidos para desarrollar el procedimiento de diseño y optimización de cascos en PRFV.
- Identificar y aplicar las teorías de optimización para el análisis estructural de una sección del casco.

2. CLASIFICACION TIPOS DE NAVEGACION

Una de las principales consideraciones a la hora del desarrollo de una embarcación es el tipo de casco a emplear, teniendo en cuenta la aplicación a la cual será sometida una vez entre en operación.

La clasificación de los cascos depende del comportamiento de la fuerza de flotación sobre la superficie del mismo; definiendo de esta manera los diferentes tipos de navegación.

El casco y el motor no son productos aislados, en este capítulo se provee varios ítems representativos que requieren cierto cuidado cuando se desarrolla una configuración específica bote-motor y las explicaciones de configuración relevante.

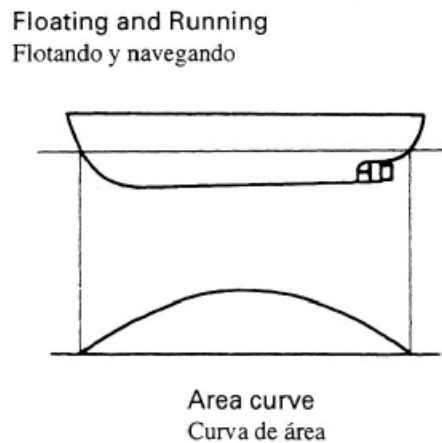
Las embarcaciones a motor pueden clasificarse en tres tipos: desplazamiento parcialmente sumergido, semideslizamiento y deslizamiento, de acuerdo con los estilos de navegación.

2.1 TIPO DESPLAZAMIENTO PARCIALMENTE SUMERGIDO

Embarcaciones diseñadas para navegar soportadas por su flotación (la fuerza del agua que ejerce una fuerza hacia arriba en una embarcación Flotante = empuje) se dan como casco de tipo desplazamiento parcialmente sumergido (ver figura 1).

Aunque las embarcaciones de alta velocidad no tienen este tipo de casco, se mueven con un estilo de desplazamiento a baja velocidad.

Figura 1. Curva de área – tipo desplazamiento parcialmente sumergido



Fuente: Boat and Rigging Text September 2007

El casco de tipo desplazamiento parcialmente sumergido cambia muy poco su área por debajo de la línea de flotación de cero en la proa, pasa a ser máximo en el centro de la embarcación y vuelve a cero en la popa.

La forma del casco se ha diseñado para empujar el agua a los lados en la proa recuperar su posición original inmediatamente cuando pase su popa, produciendo de esta forma, mínimo disturbio hidráulico.

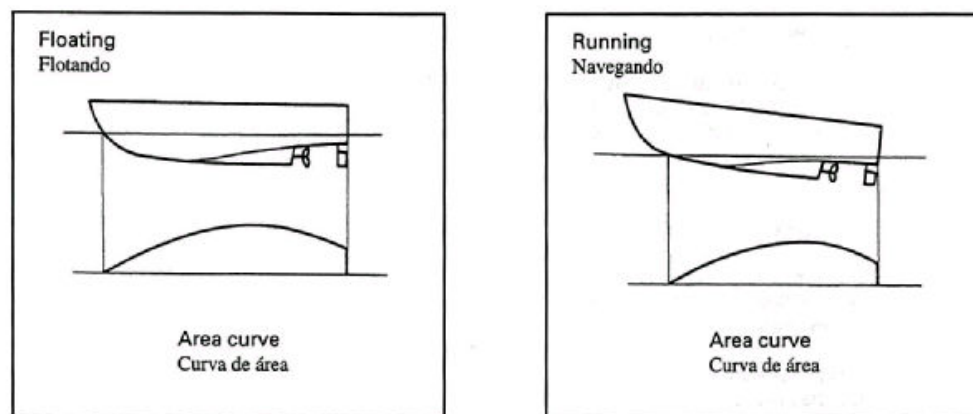
En consecuencia, a baja velocidad de la embarcación, incluso una baja potencia de caballos de fuerza hará que navegue un casco de tipo desplazamiento parcialmente sumergido.

2.2 TIPO SEMIDESLIZAMIENTO (SEMI PLANEO)

Las embarcaciones diseñadas para navegar soportadas tanto por su flotación como elevación tienen un casco de tipo semideslizamiento. La curva de área del casco de tipo semideslizamiento es similar la del casco de tipo desplazamiento parcialmente sumergido excepto que no baja a cero en la popa. Esto significa que la bovedilla de popa está parcialmente sumergida cuando la embarcación está flotando (ver figura 2)

Sin embargo, la popa fue diseñada para minimizar el disturbio del agua cuando la embarcación navega más rápido.

Figura 2. Curva de área – tipo semideslizamiento



Fuente: Boat and Rigging Text September 2007

2.3 TIPO DESLIZAMIENTO (PLANEADO)

Embarcación diseñada para navegar con la mayor parte del casco fuera del agua mientras se soporta por la elevación (la fuerza hacia arriba contraria a la fuerza de gravedad, debido a la navegación) son características del casco de tipo deslizamiento (ver figura 3).

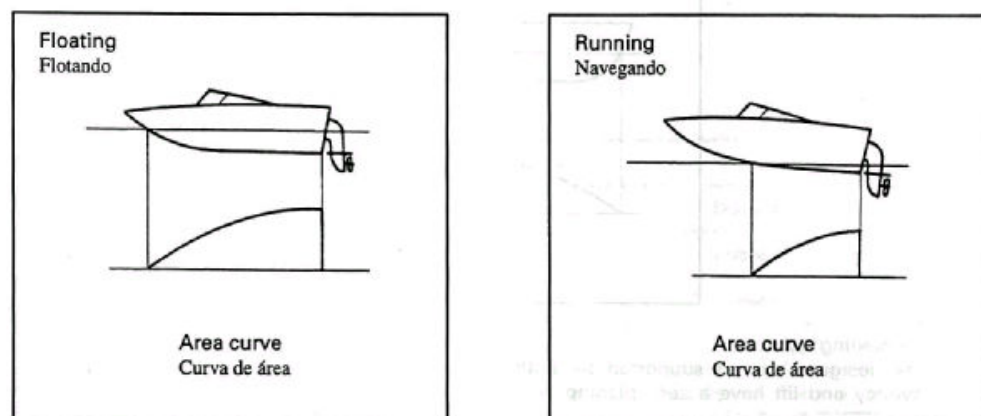
El corte de un casco tipo deslizamiento aumenta de cero en la proa hacia la popa.

Con una embarcación a motor típica con casco de tipo deslizamiento, cerca de 90% del peso está soportado por la presión hidrodinámica a su fondo.

La curva de área de este casco sube hacia popa, con lo que la flotación del casco se concentra en la popa.

En el anexo B se pueden apreciar imágenes de este tipo de botes.

Figura 3. Curva de área – tipo deslizamiento.



Fuente: Boat and Rigging Text September 2007.

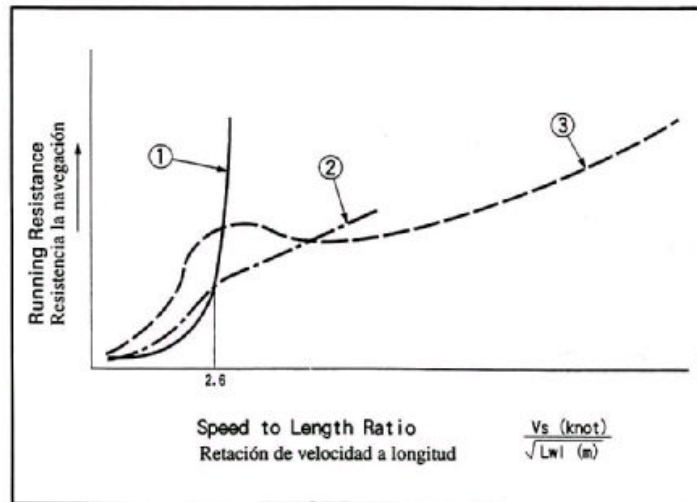
2.4 RESISTENCIA A LA NAVEGACIÓN

La resistencia a la navegación de los tres tipos de cascos se da así:

2.4.1 Tipo desplazamiento parcialmente sumergido. Con un rango de velocidad baja de la embarcación, la resistencia total toma prácticamente la forma de “resistencia a la fricción”. Proporcionalmente al aumento de la velocidad de la embarcación la “resistencia a la creación de olas” y la “resistencia a la creación de remolinos” aumenta gradualmente y aumenta también el ángulo de asiento del casco de la embarcación.

2.4.2 Tipo semideslizamiento y deslizamiento. En un rango de baja velocidad del motor, la resistencia total del tipo semideslizamiento/deslizamiento es mayor que el del tipo desplazamiento parcialmente sumergido. Después de que el tipo deslizamiento supera la “resistencia máxima”, su resistencia disminuye dentro de cierto rango y proporcionalmente al aumento en la velocidad de la embarcación, aumenta gradualmente la resistencia total. Por lo tanto se debe instalar un motor con suficientes caballos de fuerza para superar la “resistencia máxima”. En consecuencia, si se instala un motor con más caballos de fuerza, se obtendrá una mayor velocidad de la embarcación.

Figura 4. Resistencia a la navegación



Fuente: Boat and Rigging Text September 2007

En la figura 4:

1. Tipo desplazamiento parcialmente sumergido
2. Tipo semideslizamiento
3. Tipo deslizamiento

3. DISEÑO Y CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCIÓN

Para efectos de diseño es fundamental conocer inicialmente la aplicación de la embarcación, información relativa a las dimensiones del bote e incluso la velocidad requerida (estimada) para generar una aproximación del modelo y velocidad real del bote.

En principio el diseñador, a través de un procedimiento iterativo define ciertas asunciones con las cuales trabajara, tales como:

Casco y cubierta, Quillas timón.

Aparejos.

Arreglo general.

Propela y motor.

Scantlings de casco y cubierta.

Dimensiones de aparejos.

Calculo del peso.

Hidroestática y estabilidad.

Posteriormente realiza una evaluación del modelo escogido, con lo cual define si es necesario actualizar la información (datos) para una siguiente iteración o finalmente se satisficieron los requerimientos especificados de antemano.

En la actualidad este procedimiento se desarrolla con técnicas modernas de diseño automatizado (CAD y CAE) con las cuales se ahorra tiempo y se alcanza mayor exactitud. Estas técnicas se pueden basar en las reglas dadas por las sociedades de clasificación.

Antes de que realmente comiencen el trabajo del diseño, debe tenerse una imagen clara del propósito del bote: ¿cuales son los requisitos, limitaciones y objetivos del diseño?

3.1 ESCOGENCIA DEL DISEÑO CORRECTO

Un bote de madera o de acero se puede acomodar a los cambios solicitados por el comprador hasta una etapa final en la construcción. Un bote de PRFV no. La forma es una reproducción idéntica de un molde que generalmente se ha diseñado y hecho mucho antes de que apareciera un comprador. Por lo tanto la producción asegura en un solo molde el “diseño estándar”.

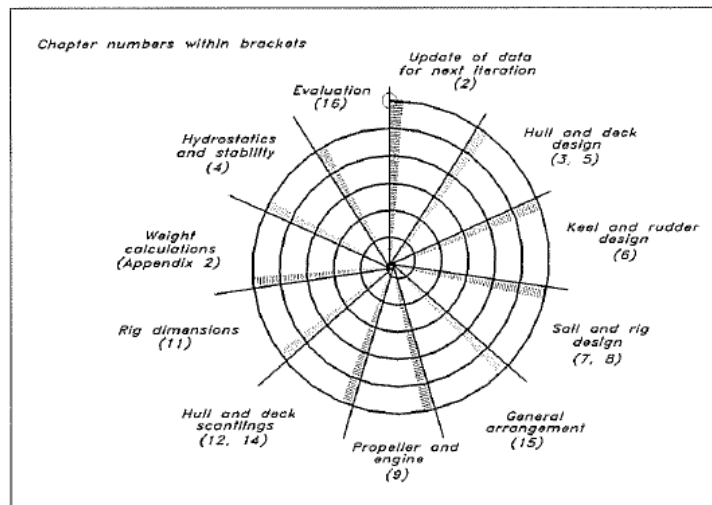
Se enfatiza que la escogencia de un diseño incorrecto, o un diseño con características inadecuadas para un ambiente tropical, limitarían el mercado y se fallaría desde e el inicio del proceso. Una investigación de las necesidades de los usuarios permitiría seleccionar una plantilla base a partir de esa información.

El diseño de un bote es iterativo, un procedimiento de ensayo y error donde el resultado final tiene que satisfacer ciertos requerimientos, especificados de antemano. Para alcanzar esto el diseñador tiene que iniciar con un número de asunciones y trabajar a través del diseño para observar si, al final, esto satisface

los requerimientos. Seguramente este no será el caso en la primera iteración, por lo tanto será necesario cambiar algunas asunciones y repetir nuevamente el proceso, normalmente en varias ocasiones. La secuencia de las operaciones a menudo se refiere a un espiral, donde el diseñador corre a través de todos los pasos de diseño. Después de varios recorridos sobre el proceso pudieron haberse producido los resultados esperados. El diseño en espiral se describe mas abajo.

Si todas las medidas se toman manualmente el procedimiento podría desperdiciar tiempo, y se esta tentando con parar las iteraciones antes de que las especificaciones iniciales se hayan resuelto completamente. Un ahorro enorme de tiempo y exactitud son posibles si se adoptan técnicas modernas de diseño automatizado (CAD).

Figura 5. Diseño en espiral



Fuente: Dave Gerr. The elements Boat Strength for Builders, Designers and Owners. International Marine / Mc Graw – Hill. 2000

En la figura 5 se muestra el diseño en espiral. Once diferentes segmentos pueden ser identificados, y cada segmento corresponde a una operación del diseñador. No todas las operaciones tienen que ser realizadas en cada recorrido, y las herramientas utilizadas en cada operación puede variar de recorrido a recorrido. En principio, mas segmentos son incluidos, y mejores herramientas son utilizadas, ya que el proceso converge hacia la solución final.

Como el diseñador se acerca a la solución final, él puede querer evaluar el diseño más cuidadosamente, para hacer esto se requiere un programa de la predicción de la velocidad (VPP). El diseñador aficionado no puede tener acceso tampoco a estas herramientas, sin embargo, la evaluación del diseño tendrá que ser basada en su experiencia.

Se debe aclarar, que en algunos segmentos las iteraciones internas son requeridas. Particularmente en el caso del diseño del área del casco. Aquí, los requisitos para el volumen y su distribución se especifican probablemente de antemano, y puede tomar varias iteraciones para satisfacerlas. Si el proceso es manual, las iteraciones entre las diversas vistas también se requieren. En los segmento de hidrostática y de estabilidad las iteraciones se requieren para encontrar el hundimiento y ajuste apropiado para cuando el casco se inclina en ángulos grandes.

3.2 REQUISITOS ESTRUCTURALES Y DE DISEÑO

Se aconseja la opinión de terceros para comprobar los cálculos hidrodinámicos y estructurales de una nueva embarcación. Este procedimiento es normal en donde emplean los conocimientos y experiencias de sociedades certificadas para emprender tales tareas. A continuación se describen algunas entidades reconocidas a nivel mundial por realizar este tipo de trabajos:

- American Bureau of Shipping (ABS)
- Bureau Veritas
- Det Norske Veritas
- Lloyds Register of Shipping
- Nippon Kaiji Kyokai
- Sea Fish Industry Authority (SFIA)

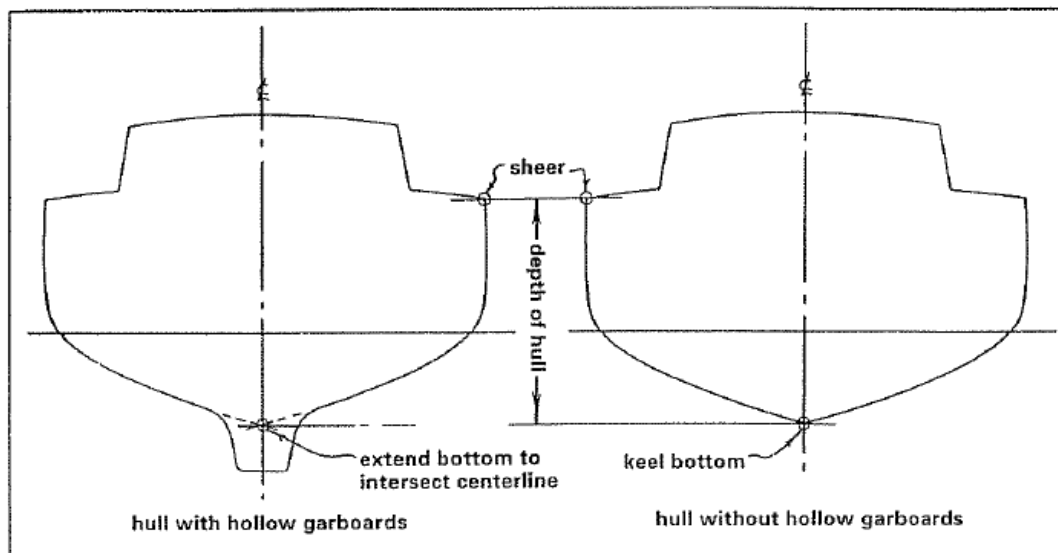
La **SFIA** recomienda que la cantidad de PRFV necesaria para las superficies de los cascos de varios tamaños se base en el Número de Scantling (Sn) el cual se obtiene de multiplicar LxBxD los cuales se definen como sigue:

L: Longitud medida en metros en línea recta desde la parte delantera hasta la parte trasera del casco.

B: La anchura medida en metros mas grande del recipiente al exterior del molde del casco.

D: La profundidad medida en metros en el centro de la superficie del casco a la parte superior de la quilla al interior del casco.

Figura 6. Determinación de la profundidad del casco en medio del bote



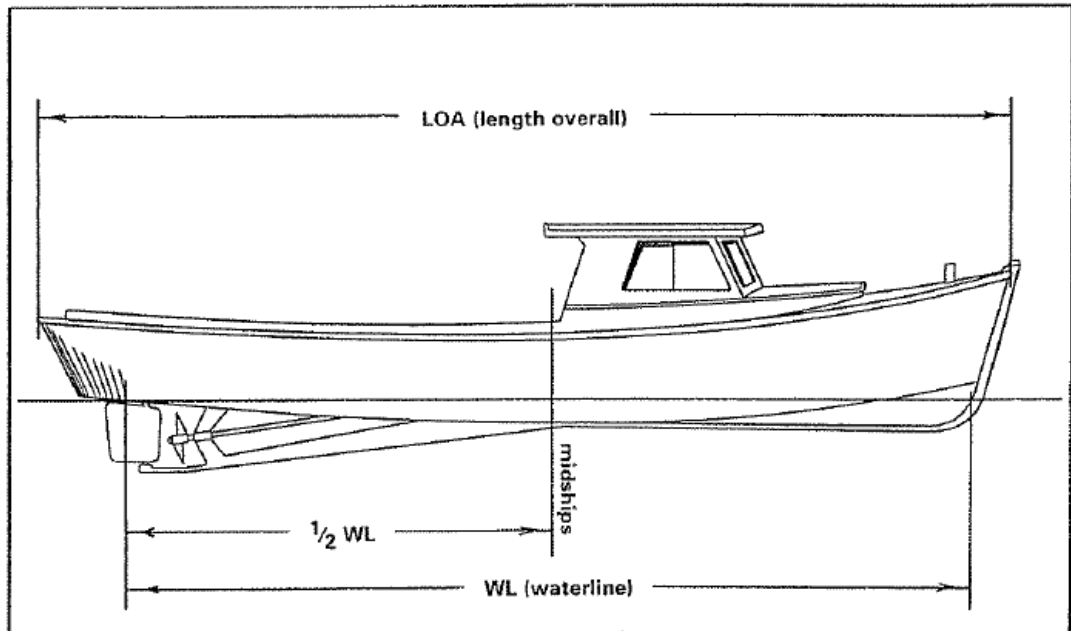
Fuente: Fishing boat construction: 2 Building a fibreglass fishing boat

Director, Publications Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy

Existen dos métodos estandarizados para determinar los Scantlings de las embarcaciones: el primer método – y en gran medida de los mas viejos – es una regla empírica; el segundo es análisis de ingeniería. La regla empírica es considerablemente mas rápida y más fácil de aplicar; Sin embargo, la regla empírica puede no ser confiable y limitada – especialmente cuando usted se pierde de la norma o cuando usted utiliza nuevos o diversos materiales, en el anexo A, se muestran algunos gráficos para calcular variables en el diseño, basados en el número de scantling.

Como se menciona en el numeral 3.2 se aconseja la opinión de terceros (Sociedades de clasificación) para comprobar los cálculos hidrodinámicos y estructurales de una nueva embarcación.

Figura 7. Localización de la mitad del bote



Fuente: Fishing boat construction: 2 Building a fibreglass fishing boat

Director, Publications Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy

4. REGLAS PARA LA CONSTRUCCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CASCOS EN PRFV

El corazón de cualquier sociedad de clasificación son las reglas y guías que se derivan de los principios de la arquitectura naval y de las disciplinas relacionadas. Actualmente la ABS (American Bureau of Shipping) cuenta con más de 100 reglas, guías o notas de dirección disponibles para la consulta.

En el presente capítulo se enumeran algunas de las reglas para la construcción y clasificación de la ABS, en las cuales se describen los parámetros a considerar para el diseño de cascos y sus partes en poliéster reforzado con fibra de vidrio, para embarcaciones de desplazamiento y planeo.

4.1 ESTRUCTURA INFERIOR (CASCO)

4.1.1 General. “Patín del casco” hace referencia a la superficie sencilla en PRFV o en sandwich laminado desde la quilla hasta 150 mm (6 pulgadas) sobre la línea de agua, diseñada bajo carga. Donde es instalado un pecho de mar (tajamar), el espesor del límite del pecho de mar no puede ser menor que el del espesor requerido para el patín del casco.

4.1.2 Laminado de superficie sencillo.

a. Embarcaciones de desplazamiento. El espesor del patín del casco en embarcaciones de desplazamiento no puede ser menor que el obtenido de la siguiente ecuación:

$$t = 0.0510s^3\sqrt{kh} \text{ mm}$$

$$t = 0.0343s^3\sqrt{kh} \text{ in}$$

t = espesor en mm o pulgadas.

s = Palmo o panel lateral mas corto del patín en mm o pulgadas.

k = coeficiente que varia con el aspecto del patín del casco (Ver tabla 1).

h = distancia en metros o pies desde el filo mas bajo del patín hasta la borda en cubierta.

b. Embarcaciones de planeo. El espesor del patín del casco en embarcaciones de planeo no puede ser menor que el requerido en la ecuación del ítem (a) o el obtenido de las siguientes ecuaciones:

Donde la velocidad de la embarcación es menor o igual a 31 nudos.

$$t = 0.0384s^3\sqrt{kV} \text{ mm o pulgadas.}$$

Donde la velocidad de la embarcación es mayor a 31 nudos.

$$t = 0.0122s^3\sqrt{kV^2} \text{ mm o pulgadas.}$$

t = espesor en mm o pulgadas.

s = Palmo o panel lateral mas corto del patín en mm o pulgadas.

k = coeficiente que varia con el aspecto del patín del casco (ver tabla 1).

V = velocidad de mar de la embarcación en nudos.

Tabla 1. Coeficiente de paneles planos

k	aspect ratio
0.028	>2.0 : 1
0.028	2.0 : 1
0.027	1.9 : 1
0.027	1.8 : 1
0.026	1.7 : 1
0.025	1.6 : 1
0.024	1.5 : 1
0.023	1.4 : 1
0.021	1.3 : 1
0.019	1.2 : 1
0.016	1.1 : 1
0.014	1.0 : 1

Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

c. Paneles curvos. El espesor del patín del casco en un panel curvo (ver figura 8) necesita ser mayor que la requerida en el ítem (a), y no puede ser mayor que el que se obtiene por las siguientes ecuaciones:

$$t = 0.04r_3 \sqrt{\frac{h}{(k_1^2 - 1)}} \text{ mm} \qquad t = 0.0269r \sqrt{\frac{h}{(k_1^2 - 1)}} \text{ pulgadas}$$

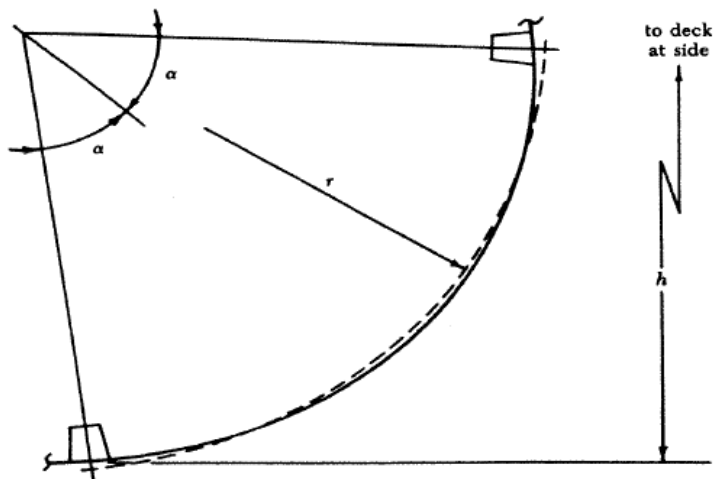
t = espesor en mm o pulgadas.

r = radio de curvatura en mm o pulgadas entre soportes (ver tabla 2).

h = distancia en metros o pies desde el filo mas bajo del patín hasta la borda en cubierta.

K₁ = coeficiente que varia inversamente a α (ver tabla 2).

Figura 8. Espesor de paneles curvos



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

α = mitad de Angulo, en grados entre el radio al final de la curva (ver figura 8).

d. Quillas de placa en cascos de una sola pieza. El espesor y la anchura de quillas de placa en cascos de una sola pieza (ver figura 9) no debe ser menor que el obtenido de las siguientes ecuaciones:

$$t_1 = 1,5t \text{ mm o pulgadas} \qquad \omega = \frac{B}{10} \text{ m o pies}$$

t_1 = espesor de la quilla en mm o pulgadas.

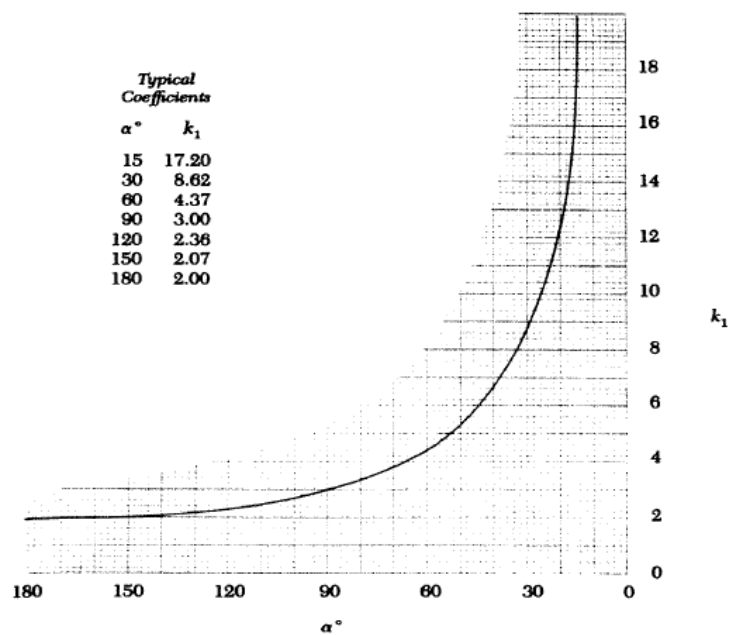
t = espesor del patín del casco en mm o pulgadas, requerido por las ecuaciones del ítem (a), (b) y (c).

ω = ancho de la quilla en mm o pulgadas.

B = la mayor anchura, excluyendo los accesorios en m o pies.

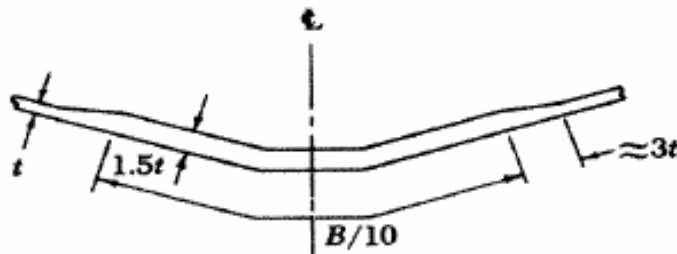
El espesor y ancho de la quilla se debe mantener desde la proa hasta la popa.

Tabla 2. Coeficiente de paneles curvos.



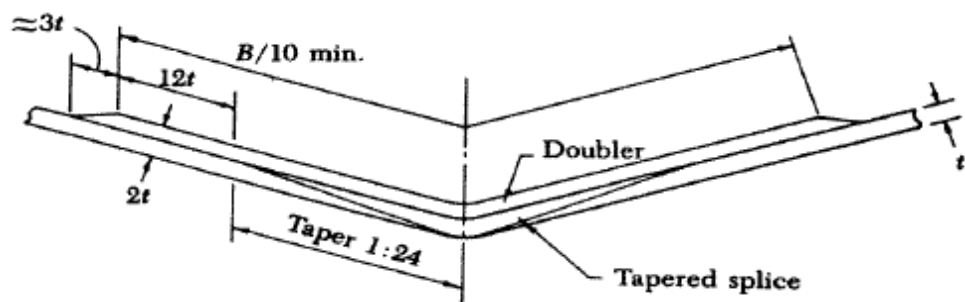
Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978.

Figura 9. Espesor quillas de placa en cascos de una sola pieza



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

Figura 10. Espesor quillas de placa en cascos moldeados en mitades



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

e. Quillas de placa en cascos moldeados en mitades. El espesor de quillas de placa en cascos moldeados en mitades (ver figura 10) no debe ser menor al que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$t_1 = 2t \text{ mm o pulgadas.}$$

t_1 = espesor de la quilla en mm o pulgadas.

t = espesor del patín del casco en mm o pulgadas, requerido por las ecuaciones del ítem (a), (b) y (c).

Las mitades del patín del casco deberán ser afiladas hacia la línea central como se muestra el ancho de las capas en una escala de 1:24. Las mitades deben estar conectadas en un empalme con igual espesor a un laminado en la misma forma del patín del casco con el ancho de las capas para empalmar contra el ancho de las capas en el patín del casco. El resto del espesor requerido de la quilla debe ser proporcionado por un dobles igual en espesor a un laminado en forma equivalente al patín del casco. El ancho del dobles no debe ser menor que el obtenido de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{B}{10} \text{ m o pies}$$

ω = ancho en metros o pies.

B = la mayor anchura, excluyendo los accesorios en m o pies.

El ancho del dobles tampoco debe ser menor que el ancho del empalme afilado más 24 veces el espesor del patín del casco.

f. Quillas verticales y tracas. El espesor de las quillas verticales y las distancias de estos espesores deben ser llevados al fondo del recipiente (ver figura 11) no debe ser menor que el obtenido de las siguientes ecuaciones:

$t_1 = 1.5t$ mm o pulgadas

$\omega = 0.25H$ mm o pulgadas

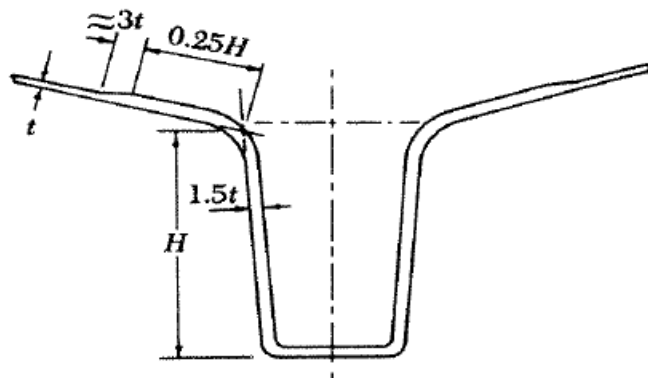
t_1 = espesor de la quilla en mm o pulgadas.

t = espesor del patín del casco en mm o pulgadas, requerido por las ecuaciones del ítem (a) y (c).

ω = ancho en metros o pulgadas. Extensión del espesor de la quilla o de la traca sobre el fondo del recipiente.

H = máxima profundidad de la quilla o de la traca en mm o pulgadas.

Figura 11. Espesor de quillas verticales y tracas



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

Donde un pedazo del el zapato del timón se ata a la parte inferior de la traca, el numero de scantling de la traca debe ser convenientemente incrementado.

g. Quillas verticales estabilizadas. El espesor de las quillas verticales estabilizadas y las distancias a los que estos espesores deben ser llevados por encima de las quillas (ver figura12) no deben ser menores que las obtenidas de las siguientes ecuaciones:

$$t_2 = 2.0t \text{ mm o pulgadas}$$

$$H_1 = 0.5\omega_1 \text{ mm o pulgadas}$$

t_2 = espesor del fondo de la quilla en mm o pulgadas.

t = espesor del patín del casco en mm o pulgadas, requerido por las ecuaciones del ítem (a), (b) y (c).

h_1 = altura en mm o pulgadas. Extensión del espesor del fondo de la quilla encima de cada lado.

ω_1 = ancho del fondo del laminado de la quilla en metros o pulgadas, o 254 mm (10 pulgadas) cualquiera que sea el mejor.

h. Chines y transoms. En embarcaciones con unas formas de chines complicadas y en los de transoms de popa, el grueso de las láminas a ambos lados de los dobleces deben ser llevados una distancia desde los nudillos (ver figura13) no menor que la obtenida de las siguientes ecuaciones:

$$t_1 = 1.5t \text{ mm o pulgadas}$$

$$\omega = B/40 \text{ m o pies}$$

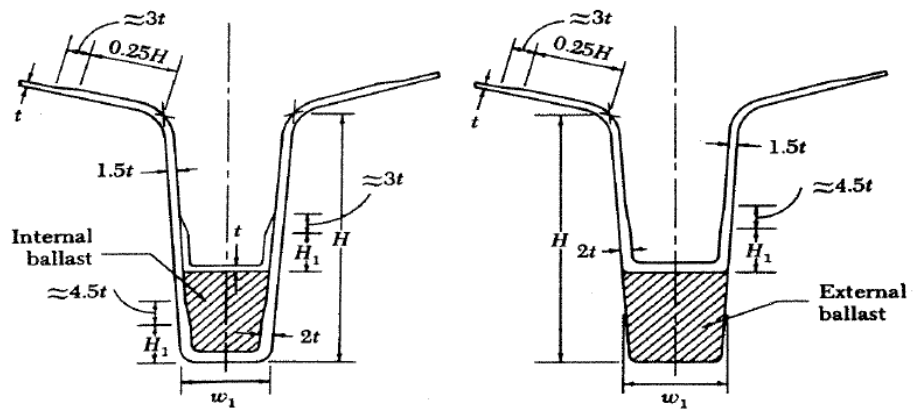
t_1 = espesor del chine o el empalme del doblez del transom en mm o pulgadas.

t = espesor del patín del casco en mm o pulgadas, requerido por las ecuaciones del ítem (a) y (c).

ω = ancho en metros o pulgadas.

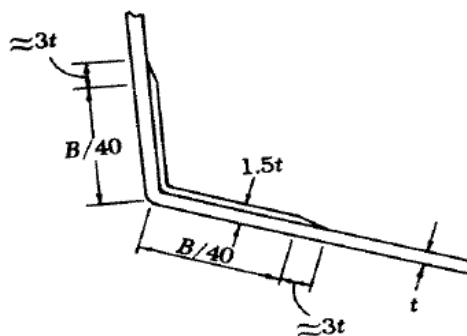
B = la mayor anchura, excluyendo los accesorios en m o pies.

Figura 12. Espesor de quillas verticales estabilizadas



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

Figura 13. Espesor de chines y transoms



Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

i. Endurecimiento local y compensación. El empalme de la laminación del fondo debe ser aumentado en espesor en las formas de puntales de eje, tubos de relleno, codastes, otros accesorios y penetraciones. Todas las aberturas del casco deben tener esquinas bien redondeadas y los bordes de la laminación deben ser sellados con resina. Todas la aberturas mayores a 150 mm (6 pulgadas) de diámetro deben ser compensadas por los dobleces.

4.1.3 Paneles de sandwich

a. Embarcaciones de desplazamiento. Cuando la construcción con sandwiches es utilizada para la laminación del fondo en una embarcación de desplazamiento, el momento de inercia de ambas superficies de una tira del sandwich de 25mm (1 pulgada) en total no puede ser menor que el momento de inercia de una tira del mismo espesor de un laminado sencillo que satisfaga la ecuación del ítem (a) del título anterior. El espesor del panel de sandwich no debe ser menor que el obtenido de la siguiente ecuación:

$$d = 0.0015k_2hs/u \text{ mm}$$

$$d = 0.666k_2hs/u \text{ pulgadas}$$

d = espesor total en mm o pulgadas.

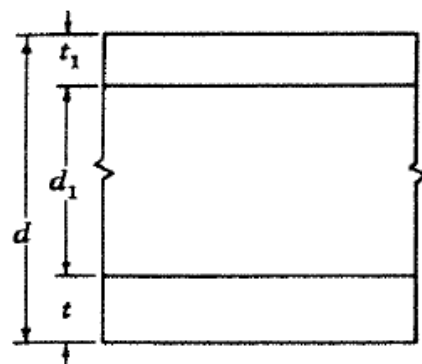
k_2 = coeficiente que varía inversamente con el espesor relativo de la base (ver tabla 3), donde t y t_1 son el espesor en mm o pulgadas. De la superficie exterior e interior.

h = distancia en metros o pies desde el filo mas bajo del patín hasta la borda en cubierta.

s = Palmo o panel lateral mas corto del patín en mm o pulgadas.

u = fuerza o esqueleto de la base plástica en Kg/mm^2 o psi.

Tabla 3. Coeficiente de paneles de sandwich



k_2	d_1
	$0.5(t + t_1)$
0.86	2
0.79	4
0.76	6
0.74	8
0.72	10
0.71	12
0.71	14
0.70	16
0.70	18
0.70	20

Fuente: Rules for Building and Classing Reinforced Plastic Vessels 197. Notice N° 1 and N° 2. American Bureau of Shipping. 1978

b. Embarcaciones de planeo. Cuando la construcción con sandwich es utilizada para la laminación del fondo en una embarcación de planeo, el momento de inercia de ambas superficies de una tira del sandwich de 25mm (1 pulgada) en total no puede ser menor que el momento de inercia de una tira del mismo espesor de un laminado sencillo que satisfaga la ecuación del ítem (b) del título anterior. El espesor del panel de sandwich no debe ser menor que el obtenido de la siguiente ecuación:

Donde la velocidad de la embarcación es menor o igual que 31 nudos.

$$d = 0.00041k_2Vs/u \text{ mm} \quad d = 0.586k_2Vs/u \text{ pulgadas}$$

Donde la velocidad de la embarcación es mayor que 31 nudos.

$$d = 0.000013k_2V^2s/u \text{ mm} \quad d = 0.019k_2V^2s/u \text{ pulgadas.}$$

d = espesor total en mm o pulgadas.

k_2 = coeficiente que varia inversamente con el espesor relativo de la base (ver tabla 3), donde t y t_1 son el espesor en mm o pulgadas. De la superficie exterior e interior.

V = velocidad de mar del recipiente en nudos.

s = Palmo o panel lateral mas corto del patín en mm o pulgadas.

u = fuerza o esquiolo de la base plástica en Kg/mm^2 o psi.

4.2 ARMAZÓN INFERIOR (COSTILLAS)

4.2.1 General. Toda la laminación del fondo del casco debe ser apoyada por vigas, marcos de tela o tabiques herméticos transversales, o ambos; pisos, y (en caso necesario) marcos transversales o longitudinales, o ambos. En las embarcaciones equipadas con velas, los marcos de tela o tabiques herméticos transversales deben ajustarse a los mástiles. A menos que estén aprobados de otra manera específica, los extremos de vigas, los marcos de tela deben ser atados a sus miembros de apoyo. Los agujeros de drenaje se moldean o cortan adentro de los refuerzos y los tabiques herméticos inferiores para asegurar el drenaje libre de las sentinas.

Los bordes de los agujeros deben ser sellados así:

Todos los bordes de PRFV de laminación sencilla deben ser sellados con resina. Bordes de paneles de sandwiches y agujeros en paneles de sandwiches deben ser sellados con mat impregnada en resina. Las virolas instaladas en los paneles de sandwich o los refuerzos para los drenajes o las penetraciones de alambre deben ser fijados con un compuesto.

4.2.2 Vigas. Todas las embarcaciones de fondo sencillo que tienen anchuras entre los chines o sobre las curvatura inferior de la sentina iguales o que exceden 2.44 m (8.0 pies) deberían tener vigas centrales o laterales. El espacio máximo entre vigas y de una viga exterior a un chine o curvatura inferior de la sentina debe ser 2.44 m (8.0 pies). En la práctica las vigas deben extenderse hacia la proa y hacia la popa. Los miembros estructurales longitudinales tales como tabiques herméticos de tanque, vigas del motor, quillas verticales y tracas pueden ser considerados como vigas.

4.2.3 Cubierta. Las cubiertas son cada una de las superficies (suelos) de madera o metálicos de un buque (barco) que, a diferentes alturas respecto de la quilla, afirmados sobre los baos, dividen el buque horizontalmente. El espacio entre cubiertas lo denominaremos entrepuente. Todas las cubiertas tienen su destino en cada embarcación, ya sea de pasajeros (para camarotes), ya sea una embarcación de carga el cual prescindirá de cubiertas (para el uso de este espacio para carga).

4.2.4 Pisos. Pisos serán requeridos para ajustarse a la forma de los motores y de la parte inferior de adelante. Los pisos adicionales se pueden requerir para ser apoyo de mástiles, quillas estabilizadoras, puntales de eje y los timones.

4.2.5 Estructura. La estructura de la embarcación es el conjunto de piezas que le dan su forma más o menos uniforme y de las cuales obtendremos las cualidades esenciales para navegar. Entre los elementos estructurales podemos distinguir los que forman su esqueleto o armazón, que contribuirán en grado sumo a darle solidez.

5. HERRAMIENTAS PARA ANALISIS ESTRUCTURAL

Asumiendo las embarcaciones como una estructura, es importante conocer las posibles herramientas tecnológicas que permiten analizarlas.

El presente capítulo tiene como finalidad mostrar algunas herramientas para mejorar las condiciones estructurales, operativas y de desempeño de un casco de planeo a partir de variables como el centro de gravedad y el peso necesarias para determinar condiciones como estabilidad estática y dinámica de la embarcación.

A continuación se describen algunas herramientas para análisis estructural empleadas generalmente en situaciones de búsqueda y optimización de parámetros y el Método de los Elementos Finitos (MEF) cuya aplicación sirve para calcular comportamientos de estructuras de Ingeniería.

5.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)

Gracias al rápido y reciente desarrollo de los últimos años, el Diseño Asistido por Computador (CAD) puede ser realizado en computadores Pc o Macintosh. Es importante tener una pantalla de alta resolución y programas de graficas especiales para agilizar el proceso. Una impresora láser podría producir imágenes a escala reducida razonablemente buenas., pero los diseñadores profesionales utilizan trazadores de pluma (Pen Plotters) de varios tamaños para generar dibujos a escala completa.

El diseñador está normalmente interesado en la primera tarea: crear un nuevo casco. Para alcanzar esto, tiene que trabajar con un conjunto de curvas

principales cercanas, pero en general no exactamente sobre la superficie. Cada curva principal es definida por un sistema de puntos (vértices) indicados en la curva. El número de curvas y los vértices varían en cada caso, pero están a menudo en la gama 5-15. Moviendo un vértice la curva principal cambia y la superficie del casco localmente está deformada de una manera tal que sea todavía lisa. En la mayoría de los programas la curvatura de la superficie puede ser trazada, así permitir al diseñador generar líneas justas incluso en una pequeña escala, y con la resolución de la pantalla relativamente baja. Algunos programas utilizan puntos sobre el mismo casco sí mismo o definiendo su forma, pero la mayoría de los programas del mercado internacional utilizan curvas principales. Parece haber un consenso entre diseñadores de botes que este acercamiento es muy eficaz para crear líneas principales.

Los módulos más importantes del sistema de CAD de botes son los programas de hidrostática y estabilidad. Éstos computan todas las cantidades de los parámetros, incluyendo estabilidad en pequeños y ángulos grandes ángulos de inclinación, el peso por el milímetro de hundimiento, y el momento por el grado de ajuste. En el cálculo de la estabilidad el hundimiento y ajuste correcto se encuentran para cada ángulo de inclinación - procedimiento desperdiciador de tiempo si se realiza manualmente.

Finalmente, programas más o menos avanzados para el diseño estructural del bote pueden ser incluidos. Tales programas se pueden basar en las reglas dadas por las sociedades de la clasificación: Et American Bureau of Shipping, (ABS), Lloyd's Register of Shipping (LR) entre otras, o la ISO Scantling Estándar 12215. Otros métodos empleados en el aparejo y los cálculos scantling se pueden basar en teoría básica de la fuerza o métodos de elementos finitos.

5.2 METODOLOGÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El método de elementos finitos es un método numérico cuya aplicación sirve para calcular comportamientos de estructuras de ingeniería. Puede emplearse para obtener desviaciones, esfuerzos, vibraciones, comportamientos de flujo, entre otros fenómenos; en los cuales la geometría de la estructura o la complejidad de las cargas aplicadas, hacen imposible obtener una solución analítica del problema. En este método, una estructura compleja se divide en muchos y pequeños bloques simples, llamados elementos finitos, de los cuales puede describirse su conducta (de un elemento individual) con un set relativamente simple de ecuaciones, así como también un set de elementos puede unirse para construir una estructura compleja, de esta forma se describe la conducta de los elementos individuales en un set relativamente grande de ecuaciones, que representan la conducta de la estructura completa. He aquí en donde queda de manifiesto la importancia de los computadores, ya que estos son capaces de resolver un número considerable de ecuaciones simultáneas y entregar una solución de los elementos por separado.²

La predicción precisa de los efectos producidos por el acoplamiento fluido estructura para cuerpos parcial o totalmente sumergidos, incluyendo superficies libres, es un problema de gran relevancia en la ingeniería naval así como en muchos otros campos del diseño de estructuras sometidas a la acción de fluidos.

Las dificultades que se encuentran en la resolución de los problemas de interacción fluido estructura se deben principalmente a las siguientes causas:

² RICHARD MEDINA, MARCOSSALAS RICHARDLUCO Y VOLKER BERTRAM. Análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos

1. La dificultad de resolver numéricamente las ecuaciones de la dinámica de un fluido incompresible que, en general, si descartamos el caso más simple del modelo del flujo potencial, tienen un importante carácter no lineal.
2. Los obstáculos que se presentan al resolver la ecuación de la superficie libre, que constriñen el movimiento de las partículas a una superficie fluida de posición a priori desconocida.
3. Las dificultades asociadas a la resolución del problema del movimiento de un cuerpo sumergido debido a las fuerzas de interacción, minimizando la deformación de los elementos de la malla y reduciendo, de esta manera, la necesidad del remallado.

Existen ocasiones en las que por las restricciones de peso de una embarcación, un requerimiento de desempeño elevado o simplemente por un proceso de optimización estructural, se hace necesario determinar más en detalle los esfuerzos a los que estará sometida la estructura de una embarcación. En estos casos se recurre a la simulación estructural mediante elementos finitos.

Para realizar este tipo de análisis se requiere del conocimiento en detalle de la estructura del bote en cuestión, pues cada componente deber ser modelado previamente a la simulación.

Iterativamente se calcula la distribución de las cargas y se hacen los ajustes necesarios a la estructura hasta obtener el nivel de optimización deseado.

Para cálculo estructural mediante elementos finitos, se requiere en primera instancia de un modelo de discretización para la estructura, generalmente realizado por software de modelado en 2D y 3D. Una vez generada la malla, los nodos que la conforman se relacionan con un conjunto de variables incógnitas denominadas grados de libertad, y se conforma un sistema de ecuaciones que se conoce como matriz de rigidez. Este sistema es resuelto computacionalmente para hallar los valores de las variables relacionadas.

5.2.1 Fundamentos teóricos. Los conceptos teóricos básicos de las herramientas de cálculo mediante el MEF, representan problemas físicos que pueden ser expresados mediante alguna de las siguientes ecuaciones:

$$[K]\{q\} = \{f\} \quad (1)$$

$$[C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (2)$$

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (3)$$

donde

$[K]$: matriz de rigidez,

$[M]$: matriz de masa,

$[C]$: matriz de amortiguamiento,

$\{q\}$: es el vector de desplazamientos nodales.

$\{\dot{q}\}$: es el vector de velocidades nodales.

$\{\ddot{q}\}$: es el vector de aceleraciones nodales.

$\{f\}$: es el vector de fuerzas externas.

En general el MEF puede resumirse dentro de los siguientes pasos:

1º.- A partir de la realidad física de la estructura, sus apoyos y tipos de carga que actúen sobre ella, es necesario primeramente seleccionar un modelo matemático apropiado para describir el comportamiento de la estructura. También hay que definir con detalle las propiedades mecánicas de los materiales y el carácter de la deformación de la misma (pequeños o grandes desplazamientos, análisis estático o dinámico, etc.) Asimismo, para el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio, se hará uso de las diferentes teorías establecidas.

2º.- Una vez seleccionado el modelo matemático se procede a discretizar la estructura en porciones no intersectantes entre sí denominadas "elementos finitos", dentro de los cuales se interpolan las variables principales en función de sus valores en una serie de puntos discretos del elemento denominados "nodos". Los elementos se conectan entre sí por nodos situados en sus contornos. Esta

etapa de discretización constituye una parte esencial de la fase de preproceso que incluye la representación gráfica de la malla de elementos finitos.

3º.- A partir de las teorías para el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio se obtendrán las matrices de rigidez $K(e)$ y el vector de cargas $f(e)$ para cada elemento.

4º.- Se procede a ensamblar las matrices de rigidez y el vector de carga elemental en la matriz de rigidez global de toda la malla de elementos finitos K y el vector de cargas sobre los nodos f , respectivamente.

5º.- El sistema de ecuaciones resultante $Kq = f$ se resuelve para calcular las variables incógnitas (desplazamientos de todos los nodos de la malla) q , utilizando uno, cualquiera, de los métodos conocidos para la solución de ecuaciones algebraicas simultáneas lineales.

6º.- Una vez calculados los movimientos nodales se pueden calcular las deformaciones y , seguidamente, las tensiones en cada elemento, así como las reacciones en los nodos con movimientos prescritos.

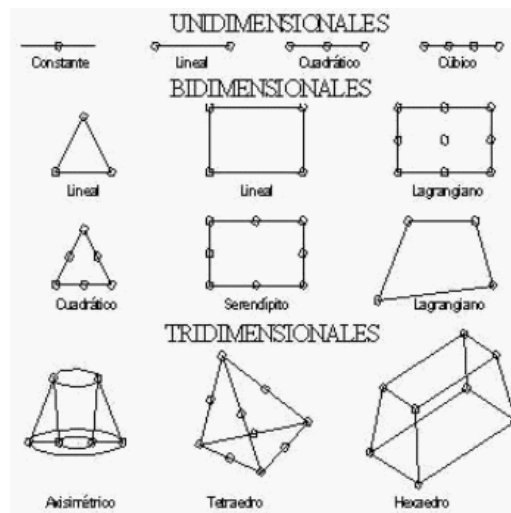
7º.- Obtenidos los resultados, la etapa siguiente es la interpretación y presentación de los mismos. Para ello suelen usarse las presentaciones gráficas de la misma herramienta informática en uso.

5.2.2 Etapas de aplicación. La estructura básica de los programas de aplicación del elemento finito al cálculo directo de estructuras, consta de tres módulos principales:

a. Pre-proceso: etapa en la cual se define el problema a resolver mediante las siguientes etapas:

Selección del Tipo de elemento finito, dentro de las librerías de los software se encuentra una gran variedad de tipos de elementos uni-, bi- y tridimensionales, con los cuales simulamos barras, vigas, cáscaras, placas, y elementos sólidos, etc.

Figura 14. Tipos de elementos



Fuente: Sínt. tecnol. v.2 n.1 Valdivia mayo 2005

Selección de las características geométricas y mecánicas del material, en esta etapa son asignados alturas, momentos de inercia, espesores, áreas transversales, módulos de elasticidad, coeficiente de poisson, etc, para cada tipo de elemento del modelo.

Creación de la geometría del modelo, debe representar lo más fielmente al modelo físico en estudio, obligando a la herramienta informática en uso a presentar facilidad de generación de geometrías complejas tales como partes curvas del casco, en general todo parte de la base de generar una serie de puntos (nodos) que componen el modelo, definido en un sistema de coordenadas ya establecido,

para posteriormente generar superficies y luego sólidos, dependiendo del modelo, ya que en algunos casos basta solo con superficies.

b. Solución: Durante la fase de solución se asigna el tipo de análisis aplicado a la estructura, las condiciones de contorno del modelo, las cargas aplicadas, y por último se procede a resolver los sistemas de ecuaciones resultantes de la etapa anterior. Dentro de los tipos de análisis podemos destacar:

Análisis estático, determina desplazamientos, tensiones, deformaciones, etc. en la estructura analizada.

Análisis modal, incluye la determinación de frecuencias naturales y modos de vibración

Análisis armónicos, usado para determinar la respuesta de una estructura sometida a cargas que varían armónicamente en el tiempo.

Análisis de pandeo, usado para calcular cargas críticas y deformaciones debidas a pandeo.

En el caso de las condiciones de contorno, éstas son restricciones de desplazamientos y rotaciones que se aplican a la matriz de rigidez completa resultante, la cual relaciona las cargas aplicadas al sólido elástico con los desplazamientos.

c. Post-proceso: La etapa de post-proceso e interpretación de los resultados numéricos obtenidos en la etapa de solución es de gran importancia, ya que no necesariamente los resultados obtenidos son correctos. Dentro de la función del ingeniero, la acertada interpretación de la enorme cantidad de información que entregan las herramientas informáticas será preponderante a la hora de diferenciar un buen diseño de otro realizado deficientemente.

La aplicación correcta del MEF requiere de:

- Desarrollar una estrategia global para la creación del modelo,
- Tener un conocimiento a priori de la estructura a analizar,
- Comparar el comportamiento de la estructura idealizada con el comportamiento esperado de la estructura real.

6. ALTA VELOCIDAD HIDRODINAMICA

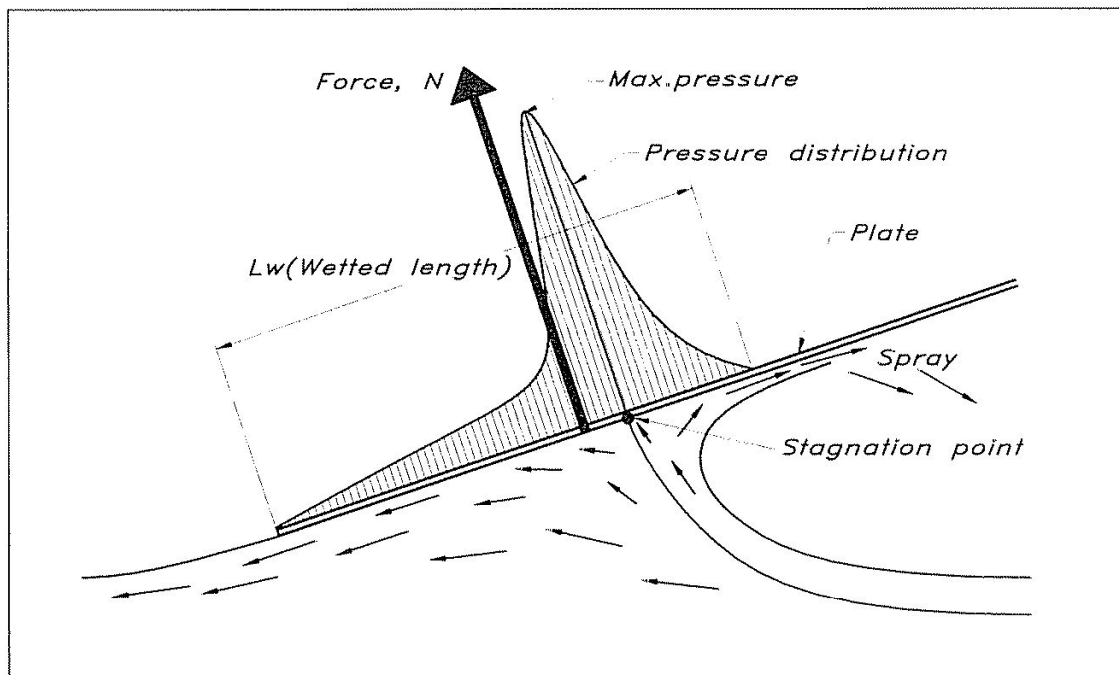
En este capítulo se analiza el proceso de planeo en botes de alta potencia y se describen las ecuaciones (numeral 6.4) y el procedimiento para calcular la resistencia al avance, la cual será útil para desarrollar el proceso de optimización en la sección del casco que se muestra en el numeral 7.4.

6.1 PLANEEO

De acuerdo a Arquímedes, la fuerza de empuje de un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido es igual al peso del volumen desplazado del fluido. Cuando la velocidad es cero esta fuerza iguala exactamente el peso de un cuerpo que se encuentra flotando. Sin embargo, tan pronto como el cuerpo comienza a moverse, el casco pone partículas de agua en movimiento al ejercer una fuerza sobre cada una de ellas. La misma fuerza, pero en la dirección opuesta, se ejerce sobre el casco. Esta fuerza por unidad de área puede ser llamada presión hidrodinámica. Esta presión es la responsable de la resistencia causada por la viscosidad y la resistencia producida por las olas. Estos dos componentes de resistencia son causados por la componente longitudinal de la fuerza de presión sobre la superficie del casco. En la dirección vertical, la presión hidrodinámica hace que el casco se hunda (o levante) y se equilibre. A alta velocidad esta fuerza de presión vertical puede ser considerablemente mayor que la fuerza de empuje, levantando parte del casco fuera del agua. Un casco predominantemente apoyado por la presión hidrodinámica es considerado de *planeo*. Tenga en cuenta que no todos los cascos pueden alcanzar velocidades lo suficientemente altas como para que esto ocurra.

Los principios básicos de planeo pueden explicarse con referencia a la figura 15, la cual muestra el flujo por debajo de una lámina plana a lo largo de la superficie del agua. Vectores de velocidad son mostrados para indicar la dirección del flujo en relación con la placa. Es evidente que en un punto el flujo golpea la lámina en ángulo recto. Este es el punto de estancamiento, donde el flujo se divide en dos partes, una va hacia adelante y otro hacia atrás. En el punto de estancamiento la presión (hidrodinámica) es muy alta, ya que toda la energía cinemática se ha convertido en presión. No hay flujo en relación con la placa en esta posición. A ambos lados del punto de estancamiento la presión disminuye y finalmente se reduce a cero. Esto ocurre en el borde de fuga hacia adelante y en el lugar donde la velocidad se ha convertido paralela a la lámina. Más adelante el rocío de agua cae en la superficie del agua.

Figura 15. Distribución de presión y velocidad parte inferior superficie de planeo



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

La alta presión crea una fuerza vertical hacia arriba perpendicular a la lámina, la componente vertical es la fuerza de elevación, la cual equilibra el peso del bote, mientras que la componente horizontal es la fuerza de resistencia total a la presión, esencialmente la resistencia producida por la ola.

En realidad, el gráfico ideal es más complicado que el mostrado en la Figura 15. En primer lugar, siempre hay algo de la presión hidrostática presente. Obviamente este componente también es perpendicular a la lámina y se añade a la presión hidrodinámica. Como aparece en la figura 16, esto significa un aumento en la fuerza de resistencia y elevación.

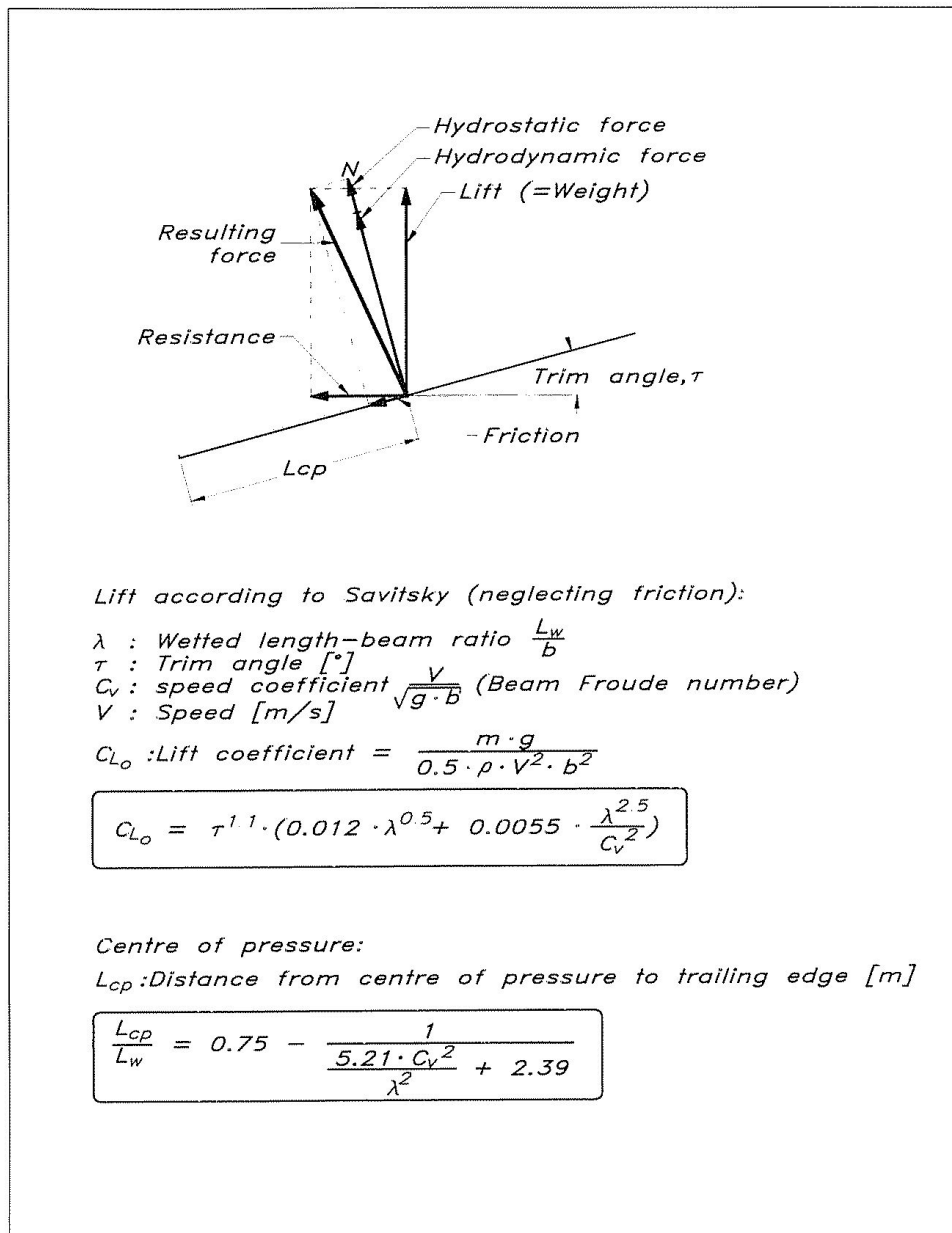
Un segundo factor que complica la situación es la fricción, la cual es paralela a la lámina. Aunque hay algún componente en la dirección de avance frente al punto de estancamiento, la fuerza de fricción resultante es esencialmente hacia atrás y aumenta la resistencia. Hay también una pequeña reducción en la fuerza de elevación.

Si el peso de la lámina es modificado la fuerza de elevación debe cambiar correspondientemente. Un aumento del peso puede ser compensado por un aumento en el ángulo de trim o la superficie mojada. En este último caso, la lámina estará un poco más hundida en el agua y se aumentara la fricción. Para aumentar el ángulo de trim el centro de gravedad debe ser movido hacia atrás.

En el Laboratorio de Davidson, Savitsky llevó a cabo una gran serie de experimentos sistemáticos para superficies de planeo y propuso varias relaciones generales que son utilizados con frecuencia por los diseñadores de cascos de alta velocidad.

La figura 16 muestra las fórmulas de Savitsky para la ubicación del centro de presión de la superficie de planeo. Esta ubicación es importante para determinar el ángulo de trim de botes de potencia como se vera mas adelante.

Figura 16. Fuerzas en una superficie de planeo



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

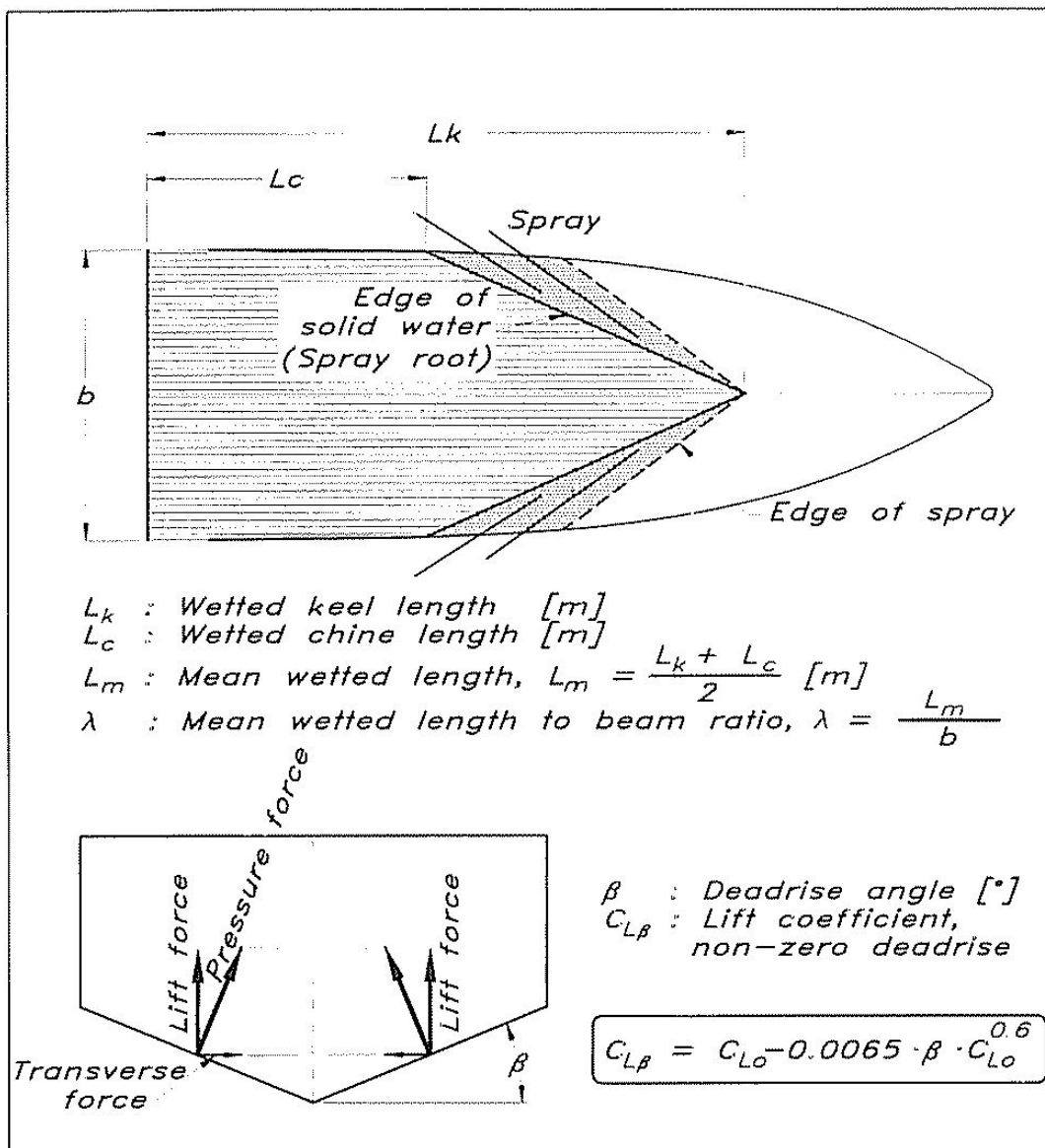
6.2 CASCOS EN “ V ” (DEADRISE)

Una lamina plana a alta velocidad en la superficie del agua puede ser útil para explicar el principio básico del planeo, pero los cascos de botes de potencia casi inevitablemente tienen secciones en forma de V, los cuales son llamados deadrise. La razón de ello es que mejora el comportamiento dinámico del casco en el mar. Un fondo completamente plano sería imposible en el mar, ya que la aceleración vertical sería demasiado grande. El viaje sería extremadamente fuerte y pondría en peligro a las personas a bordo. Las secciones en forma de “V” reducen el problema considerablemente; entre mas profunda la “V” mas pequeña la aceleración. Sin embargo, el deadrise reduce la fuerza de elevación, por lo cual es necesario una mayor superficie mojada o un mayor ángulo de trim, aumentando así la resistencia.³

La razón por la que el deadrise reduce la fuerza de elevación es porque el agua que golpea la parte inferior de la embarcación puede ser desviada hacia un lado. De hecho, para un ángulo normal de deadrise la mayoría del rocío de agua va hacia un lado. Como se explicó anteriormente, la presión hidrodinámica que levanta el bote es causada por la reacción de las fuerzas de partículas de agua que se han visto obligadas a cambiar de dirección cuando se acercan al casco. Para una lámina plana el cambio de dirección es casi de 180° en la parte del flujo frente al punto de estancamiento (ver Figura 15). Esto da lugar a alta presión. Sin embargo, si el rocío va hacia un lado, el cambio de dirección es mucho menor y también lo es la fuerza de reacción. Además, esta fuerza se inclina ahora hacia el interior, por lo que aparece una componente transversal útil; véase la figura 17, que también proporciona una fórmula para el cambio en la fuerza de elevación debido al deadrise.

³ LARS LARRSON Y ROLF E ELIASSON. Principles of yacht design

Figura 17. Influencia del casco en "V" en el rocío y las fuerzas de presión



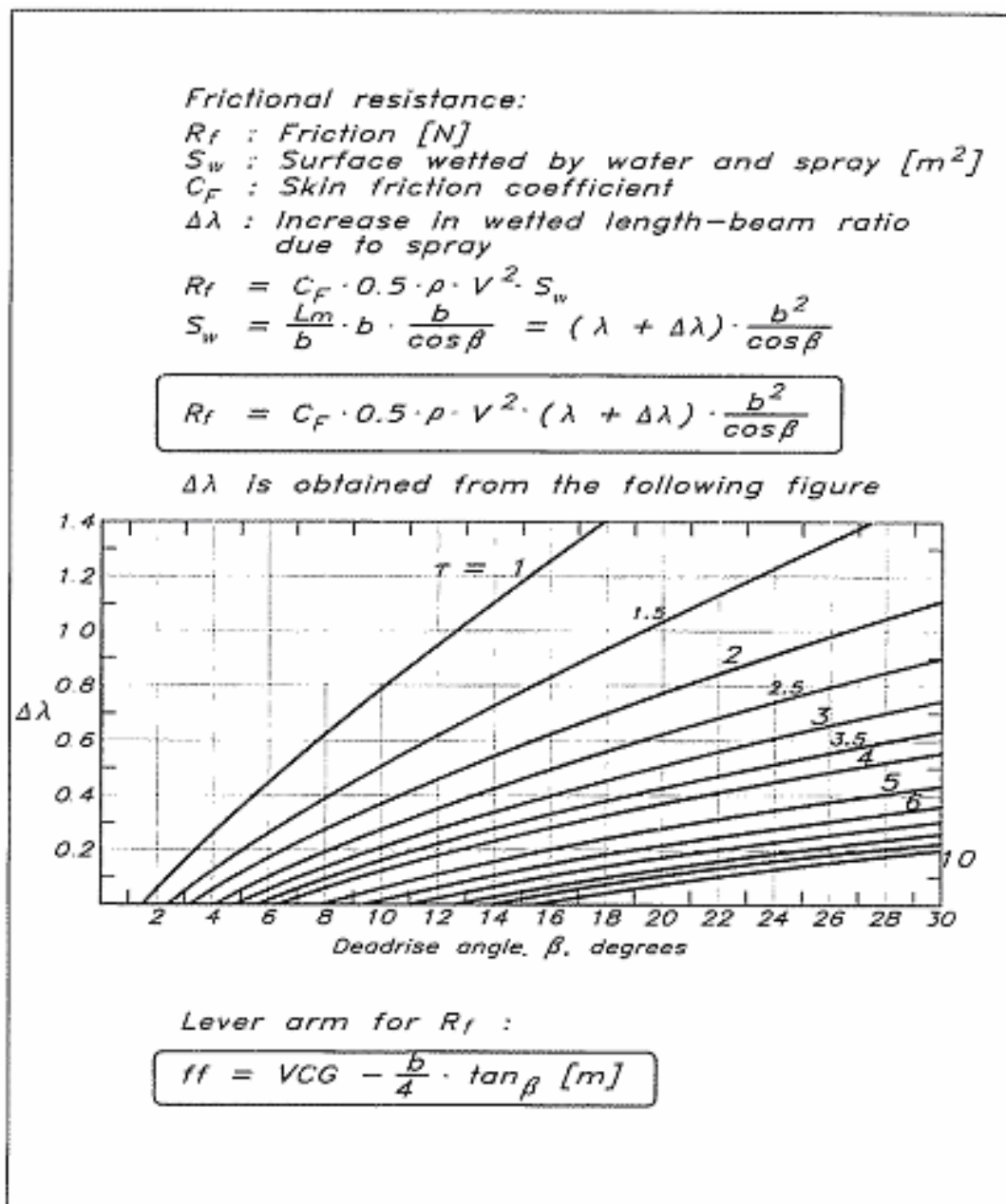
Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

Para entender las ventajas del deadrise cuando se encuentra en comportamientos dinámicos, compare el impacto de una cuña y de una lamina plana al golpear una superficie. En este último caso, la totalidad de la superficie de la lámina golpea al mismo tiempo el agua, mientras que la superficie de la cuña se sumerge poco a poco. Por lo tanto la fuerza de reacción, se ejerce mucho más lentamente en la cuña.

El roció en fondos con deadrise normalmente aumenta la resistencia de fricción, ya que la mayoría del roció actúa ejerciendo una fuerza hacia atrás.

Savitsky midió este efecto y elaboro una corrección para el roció en relación con la longitud húmeda / manga. Esta corrección se muestra gráficamente para diferentes deadrise y para los diferentes ángulos de trim en la figura 18, donde se encuentran también las formulas para calcular la resistencia de fricción.

Figura 18. Calculo de la resistencia por fricción en el casco



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

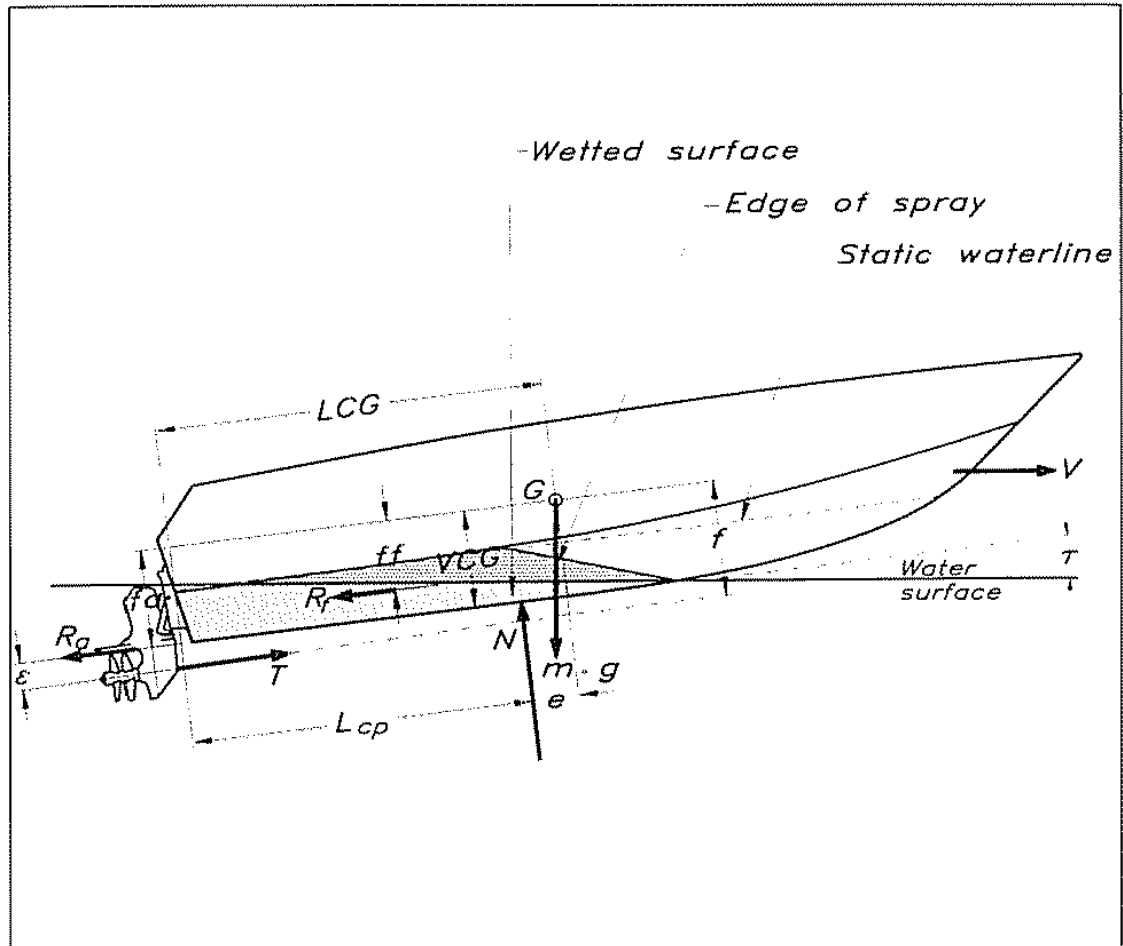
6.3 FUERZAS EN UN CASCO DE PLANEEO

La Figura 19 muestra un casco de planeo con las fuerzas más importantes que actúan en el casco mostrado. N corresponde a la fuerza de presión de la figura 16 (aporte hidrostático e hidrodinámico) y R_f es la fricción. Existe también el empuje T producido por la hélice y la resistencia de la unidad de la hélice, denotado por R_a (para motores fuera de borda esta resistencia no se tiene en cuenta por ser muy pequeña). Para un casco con una hélice en un eje la resistencia producida por el eje, el eje del timón y soportes deben ser considerados, la dirección de estas fuerzas varía en algo, pero sin demasiada pérdida, en general se pueden asumir paralelas a la línea de quilla.

El peso se muestra como una fuerza mg actuando verticalmente a través del centro de gravedad G . Para calcular los momentos este punto puede ser tomado como el origen. Se ve que N , R_f y R_a crean un momento para bajar la proa del bote y sus respectivas distancias de palanca son e , f_f y f_a . Por otro lado el empuje de la hélice crea un momento que levanta la proa el cual tiene como distancia de palanca f . El casco automáticamente alcanza un ángulo de trim donde los momentos se cancelan, es decir, el momento neto es cero.

Si un momento hacia abajo es aplicado al casco en un ángulo óptimo de trim, el nuevo y más pequeño ángulo de trim significa que la presión hidrodinámica es reducida. Por otra parte, la superficie mojada se incrementa, por lo que la fuerza de elevación puede ser todavía lo suficientemente grande. Si no es así, el casco se hundirá hasta que la presión hidrostática nivele la pérdida de presión hidrodinámica. En ambos casos hay un aumento de la fricción que supera la ventaja de tener la fuerza N apuntando menos atrás. Esta situación se produce si el centro de gravedad está demasiado lejos de la parte delante del bote.

Figura 19. Fuerzas en un casco de planeo



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

Si el centro de gravedad está demasiado lejos de popa, un momento neto para inclinar el bote por la popa incrementara el trim, lo que aumenta la presión y reduce la superficie mojada. La popa del bote estará en menor contacto con el agua, lo que es bueno, ya que se reduce la fricción, pero el mayor componente de arrastre de la fuerza N hace que el total de la resistencia sea más grande. Cuando

el centro de gravedad está demasiado lejos de popa, a menudo se produce una inestabilidad.

Por lo tanto, es muy importante diseñar el bote para lograr un equilibrio razonable en el ángulo de trim, por tal motivo se describe el siguiente procedimiento. Este sistema es una simplificación de un procedimiento propuesto por Hadler, basado en un trabajo previo de Savitsky.

La potencia efectiva P_E es la potencia que hace adecuada la conducción del bote. Para obtener la potencia real requerida para girar la hélice (potencia entregada) P_E debe ser dividida por la eficiencia de propulsión.

Figura 20. Momentos, trim y resistencia

Bow-down moment (M):

$$M_h = g \cdot m \cdot \left[\frac{e \cdot \cos(\tau + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} - f \cdot \frac{\sin \tau}{\cos \varepsilon} \right]$$

$$M_f = R_f \cdot \left[f_f - e \cdot \tan \varepsilon - \frac{f}{\cos \varepsilon} \right]$$

$$M_a = R_a \cdot \left[f_a - e \cdot \tan \varepsilon - \frac{f}{\cos \varepsilon} \right]$$

$$M = M_h + M_f + M_a \quad [\text{Nm}]$$

Linear interpolation between two computed moments, M_1 and M_2 , at two trims, τ_1 and τ_2 , to find τ_0 , giving zero moment:

$$\tau_0 = \tau_1 - \frac{M_1 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{M_2 - M_1}$$

Linear interpolation between two computed frictional resistance values R_{f1} and R_{f2} to find R_{f0} corresponding to the trim angle τ_0

$$R_{f0} = R_{f1} + \frac{R_{f2} - R_{f1}}{\tau_2 - \tau_1} \cdot (\tau_0 - \tau_1)$$

Resistance:

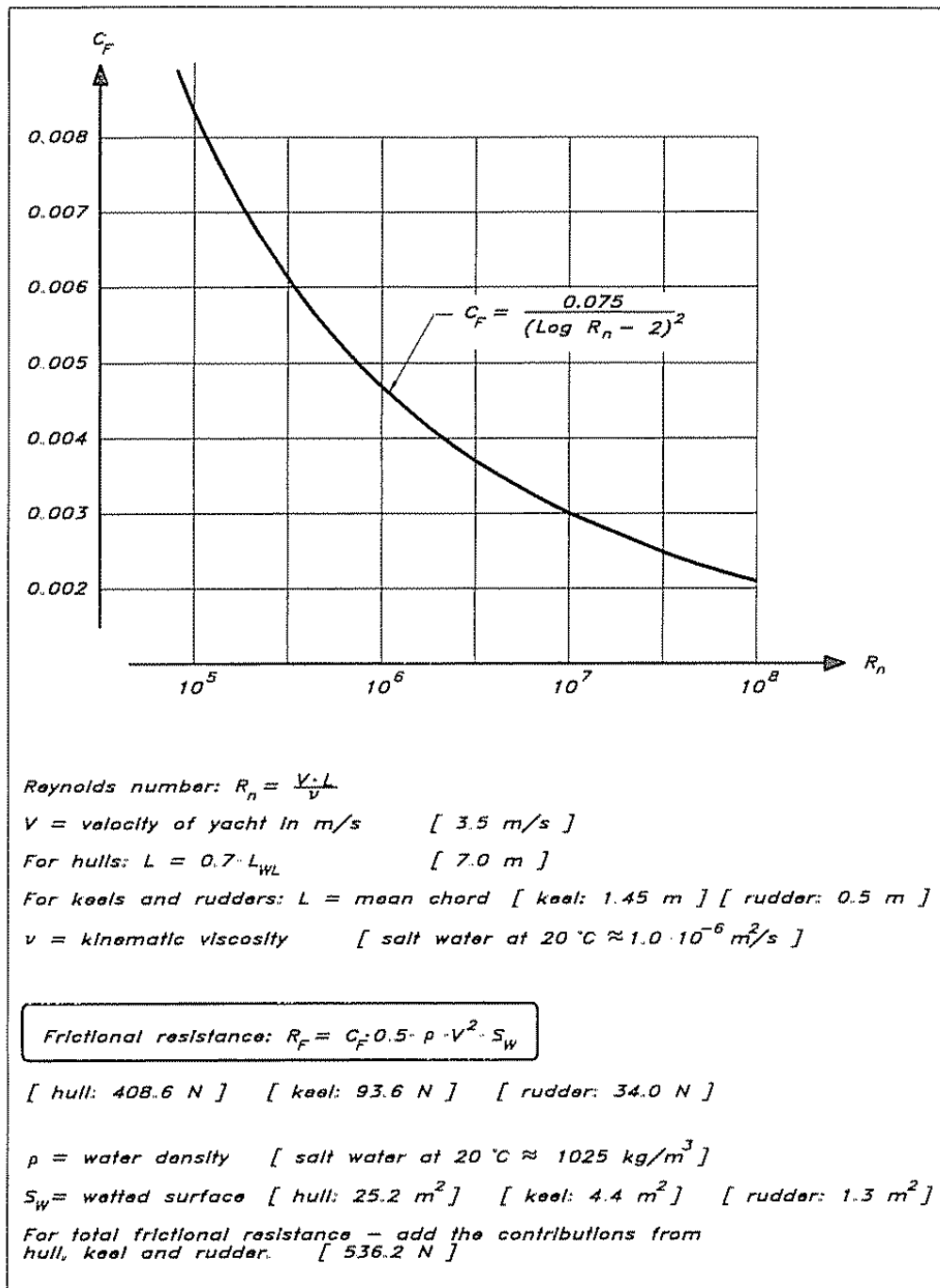
$$R = [g \cdot m \cdot \sin \tau_0 + R_f] \cdot \frac{\cos(\tau_0 + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} \quad [\text{N}]$$

Effective power

$$P_E = V \cdot R \quad [\text{W}]$$

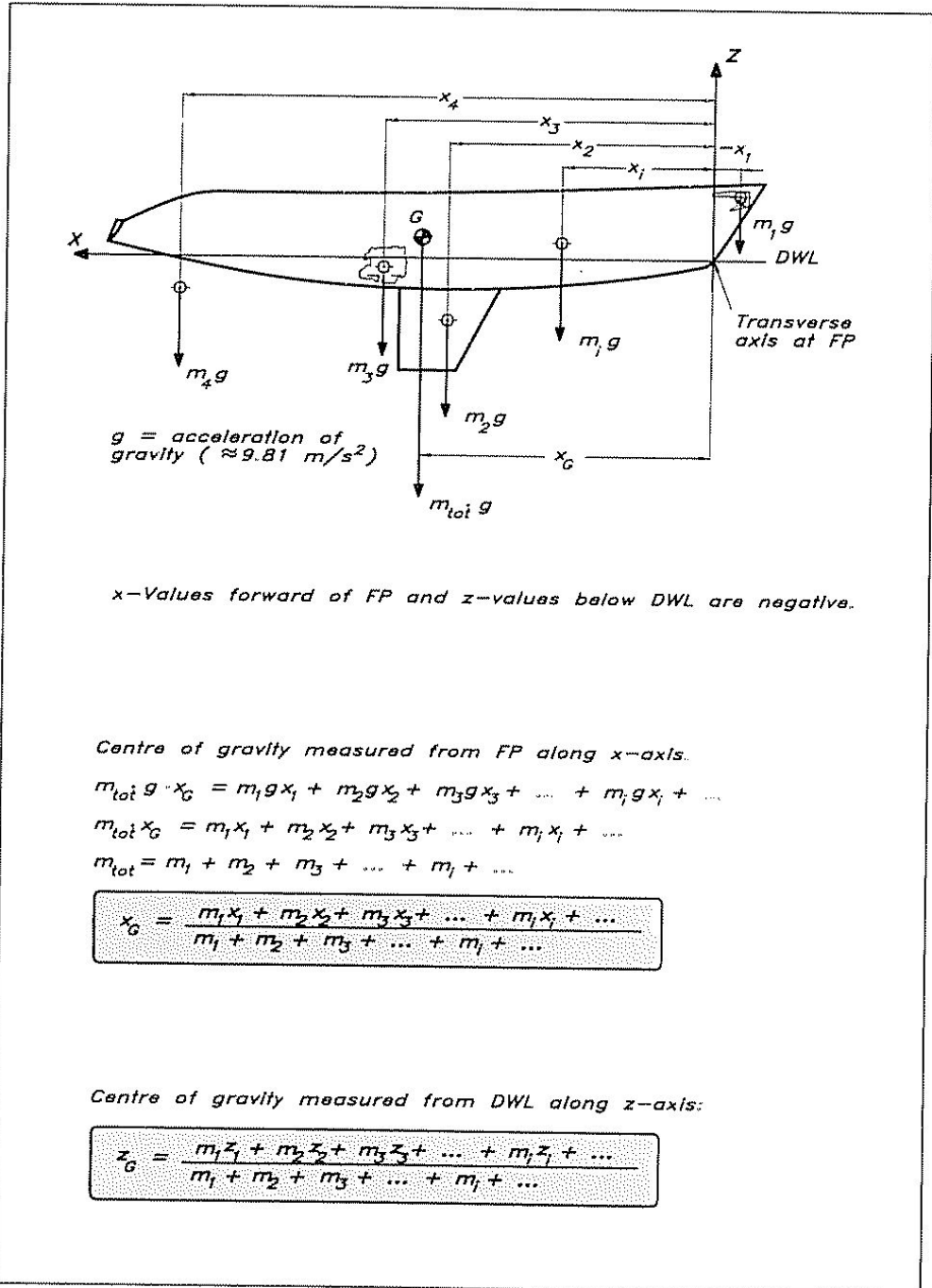
Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 10

Figura 21. Calculo resistencia por fricción



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 5

Figura 22. Método para hallar el centro de gravedad



Fuente: Lars Larsson and Rolf E. Eliasson. Principles of yacht desing. Segunda edición Capitulo 4

6.4 PROCEDIMIENTO PARA ENCONTRAR EL ANGULO DE TRIM DE EQUILIBRIO Y LA CORRESPONDIENTE RESISTENCIA Y POTENCIA

1. Primero determine los siguientes valores:

m: Masa desplazada (peso del bote).

LCG: Distancia desde el transom al centro de gravedad (Longitudinal Centre of Gravity).

VCG: Distancia desde la línea de base (quilla) al centro de gravedad. (Vertical Centre of Gravity).

b: Máxima manga entre chines (o entre spray rails).

ϵ : Inclinación del eje de la hélice relativo a la línea de base.

β : Angulo de la " V " del casco. (Tomar un promedio entre el ángulo en el transom y en el centro de gravedad).

f: Distancia entre la línea del eje de la hélice y el centro de gravedad.

V: Velocidad.

2. Calcule el coeficiente de velocidad C_V (Figura 16).

3. Calcule el coeficiente de levantamiento C_{LO} (fuerza de sustentación) definido en la figura 16 (use la ecuación que incluye m y g). La ecuación de la figura 16 es para cascos planos, lo cual dará el C_{LO} , pero para cascos en " V " esto será el $C_{L\beta}$.

4. Calcule el correspondiente C_{LO} con la formula para $C_{L\beta}$ (figura 17). Por prueba y error encuentre el C_{LO} que da el $C_{L\beta}$ calculado en el paso 3.

5. Asuma un ángulo de trim " τ ", por decir 4° .

6. Calcule la relación λ , entre " L_{WL} " Longitud mojada (Wetted Length) y manga " b " (Ecuación para C_{LO} que incluye λ , C_V y τ , Figura 16). Por prueba y error encuentre el λ que da el C_{LO} calculado en el paso 4.

7. Calcule la longitud mojada promedio L_m , con la ecuación para λ en la figura 17 y calcule el numero de Reynolds R_n .

8. Calcule el coeficiente de fricción C_F usando la ecuación de la figura 21.

9. Determine el incremento en λ debido al roció, $\Delta\lambda$, y calcule R_f (figura 18).

10. Calcule el valor de la distancia ff para R_f relativa al centro de gravedad (figura 18).

11. Calcule la distancia del centro de presión desde el transom, L_{cp} , usando la ecuación de la figura 16 (L_W es igual a L_m para fondos en "V").

- 12.** Calcule la distancia para el centro de presión, e , como la diferencia entre LCG y L_{cp} .
- 13.** Calcule el valor del momento M bow-down con la ecuación de la figura 20.
- 14.** Es muy probable que el momento M calculado sea diferente de cero, así que el ángulo de trim " τ " debe ser cambiado para obtener el balance. Regrese al paso 5 y repita los cálculos con otro ángulo de trim.
- 15.** Calcule el ángulo de trim para que el momento sea cero por interpolación lineal (extrapolación) entre los dos momentos calculados. Use la ecuación de la figura 20.
- 16.** Calcule la resistencia a la fricción por interpolación lineal entre estos dos valores (figura 20).
- 17.** Calcule el valor de resistencia con la ecuación de la figura 20.
- 18.** Calcule la potencia efectiva con la formula de la figura 20.

7. OPTIMIZACION DEL TRANSOM DE UN BOTE EN PRFV CON 02 MOTORES FUERA DE BORDA

El diseño de una embarcación es un proceso iterativo que comienza con una fase inicial que define una geometría de la obra en función de unos factores de proyecto para los que se comprueba si se cumplen los condicionantes de coeficientes de seguridad o probabilidades de fallo. Si no es así, se modifican los valores geométricos hasta que se cumplen dichos requisitos. Las técnicas de optimización ofrecen la ventaja de que el resultado es el óptimo y la labor del proyectista consiste en establecer las restricciones a imponer al problema y definir la función a optimizar.

Las técnicas de optimización son herramientas de modelización muy potentes para el proceso de toma de decisiones. Para ello, es preciso identificar las decisiones que pueden tomarse, llevando a la identificación de las variables del problema concreto de estudio. Además, es fundamental determinar qué decisiones son admisibles y cuáles no. Cada una de ellas lleva asociado un coste/beneficio lo que equivale a determinar una función objetivo que asigne, a cada conjunto posible de valores de las variables de decisión, un valor coste/beneficio. Todo problema de optimización incluye cuatro elementos fundamentales que son:

- Datos
- Variables
- Restricciones
- Función objetivo

El problema de optimización queda definido con estos cuatro elementos. En el caso de una embarcación, entre los *datos* se encuentran la tipología y el

emplazamiento mientras las *variables* incluyen, entre otros, la geometría, los costes unitarios de los materiales y los parámetros de los modelos estadísticos. Las *restricciones* pueden ser normas de buena práctica, ecuaciones de verificación de modos de fallo o relaciones geométricas y la *función objetivo* suele ser de tipo coste.

7.1 ASPECTOS BASICOS DE OPTIMIZACION

Llamamos optimización al acto de obtener el mejor resultado posible dadas ciertas circunstancias. No existe ningún método de optimización que pueda resolver eficientemente todo tipo de problemas y de ahí que se hayan desarrollado diversos métodos a lo largo de los años.

La optimización en ingeniería tiene enorme aplicabilidad en muchas ramas del conocimiento, por lo tanto, se requieren buenos conocimientos de programación, así como conocimientos básicos de cálculo y de trigonometría.

A los métodos de optimización se les conoce también como técnicas de programación matemática y se les suele estudiar en investigación de operaciones. La investigación de operaciones es una rama de las matemáticas que se ocupa de métodos y técnicas aplicables a problemas de toma de decisiones, así como del establecimiento de las mejores soluciones posibles (o sea, las óptimas), la figura 23, muestra una clasificación de métodos de optimización.

Las técnicas de *programación matemática* son útiles para encontrar el mínimo de una función de varias variables sujeta a un conjunto de restricciones. Las técnicas *estocásticas* pueden usarse para analizar problemas descritos por un conjunto de variables aleatorias con una distribución de probabilidad conocida.

Los métodos *estadísticos* nos permiten analizar datos experimentales y construir modelos empíricos para obtener la representación mas precisa posible del

problema real, los primeros métodos de optimización se remontan a la época de Isaac Newton (1643-1727), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) y Augustin-Louis Cauchy (1789-1857).

Figura 23. Clasificación métodos de optimización

TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICAS	TECNICAS ESTOCASTICAS	METODOS ESTADISTICOS
Métodos de calculo	Teoría de decisión estadística	Análisis de regresión
Cálculo de variaciones	Procesos de Harkov	Análisis de clusters, reconocimiento de patrones
Programación no lineal	Teoría de colas	Diseño de experimentos
Programación geométrica	Teoría de renovación	Análisis discriminatorio (análisis de factores)
Programación cuadrática	Métodos de simulación	
Programación lineal	Teoría de confiabilidad	
Programación dinámica		
Programación entera		
Programación estocástica		
Programación separable		
Programación multiobjetivo		
Métodos de redes: CPM y PERT		
Teoría de juegos		
Recocido simulado		
Algoritmos genéticos		
Redes Neuronales		

Fuente: Dr. Carlos A. Coello Coello, Optimización en Ingeniería

A mediados del siglo XX, con el advenimiento de las computadoras digitales se hizo posible la implementación de los algoritmos de optimización y se estimuló el

desarrollo de nuevos métodos. Esto marco el inicio de una época increíblemente productiva en la cual surgido un volumen muy considerable de publicaciones sobre optimización. Esto produjo también el surgimiento de varias áreas bien definidas en teoría de la optimización.

La segunda mitad del siglo XX se caracterizo por el advenimiento de las *heurística* tales como el recocido simulado, los algoritmos genéticos y las redes neuronales.

El recocido simulado imita el proceso de enfriamiento de los sólidos.

Los algoritmos genéticos son técnicas de búsqueda y optimización basadas en la selección natural y la genética.

Las redes neuronales son técnicas de clasificación basadas en el uso de modelos de celdas simples (llamadas “neuronas”) interconectadas entre si.

En el sentido más amplio del término, la optimización puede aplicarse para resolver cualquier problema de ingeniería. Algunos ejemplos de aplicaciones son los siguientes:

- Diseño de estructuras para aviación y el espacio con un peso mínimo.
- Determinación de trayectorias optimas de vehículos espaciales.
- Diseño de estructuras civiles tales como marcos, cimentaciones, puentes, torres, chimeneas, y presas, con un costo mínimo.
- Diseño sísmico de estructuras (con cargas aleatorias).
- Diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado.

7.2 OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO

Muchos problemas de diseño de embarcaciones involucran múltiples objetivos para la selección del mejor diseño, tal como el inevitable equilibrio entre desempeño y costo. El diseño marino requiere de la consideración cuidadosa de este tipo de criterios y la experiencia de los diseñadores de embarcaciones hace

difícil tomar la decisión de equilibrio en el diseño. Métodos tradicionales de optimización numérica fueron desarrollados para un único criterio de optimización, función objetivo o funciones de costos.

Estos primeros métodos de optimización han tenido algún éxito en decisiones destacadas de diseño, pero han sido significativamente menos efectivas en la solución de conceptos amplios y problemas iniciales de diseño que abarcan múltiples criterios de conflictos. Y esta es precisamente el área donde los mayores beneficios pueden ser alcanzados por una optimización formal.⁴

El problema de optimización multiobjetivo abarca criterio $K \geq 1$ y puede ser formulado en la forma:

$$\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_k(x)]$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

sujeto a las limitaciones de la igualdad y desigualdad

$$h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, I$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J$$

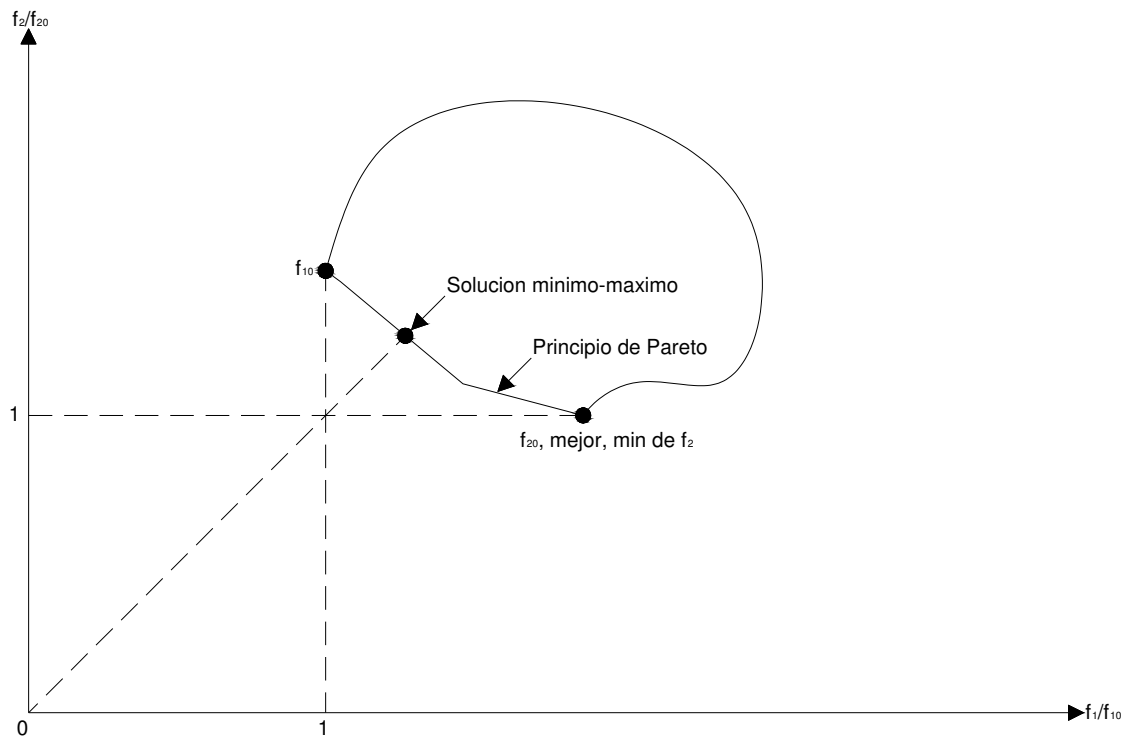
donde el criterio múltiple de optimización k desde $f_1(x)$ hasta $f_k(x)$ dependen de los parámetros de diseño desconocidos N en el vector x. En general, estos problemas no tienen una solución sencilla dado que existen conflictos entre el criterio de optimización K.

La forma tradicional para resolver este tipo de problemas con los primeros métodos numéricos que pueden manejar solo un criterio era usar una función de suma ponderada de costos para convertir el vector F en una relación escalar de F en función de los costos. Hay también un número de soluciones escalares

⁴ MICHAEL G. PARSONS. Applications of optimization in early stage ship desing

definidas, tal como el mínimo-máximo y mas cercano a la solución utópica, lo cual puede ser usado si una definición particular se refleja en un propósito de diseño.

Figura 24. Principio de Pareto entre soluciones para f_{10} y f_{20}



Cuando se presentan múltiples criterios, la definición más común de un óptimo es el principio de Pareto, el cual fue desarrollado por el Italiano-Fances V.Pareto. El principio de Pareto que resulta en la reducción al mínimo de dos criterios $f_1(x)$ y $f_2(x)$ se ilustra esquemáticamente en la figura 24. Esta figura muestra dos criterios donde se localizan los mejores y mínimos valores para esos criterios. El principio de Pareto se extiende entre la solución que da el mejor rendimiento para el primer criterio, f_{10} , hasta la solución que da el mejor rendimiento para el segundo criterio, f_{20} . La solución min-max se encuentra en una línea trazada a

45º desde el origen. Esta solución se considera más eficiente cuando la pérdida de un criterio es el principio del incremento del otro criterio.

7.3 ALGORITMOS GENETICOS

Debido al carácter no lineal, discontinuo y fluctuante del espacio de diseño de estructuras compuestas, la utilización de métodos estocásticos de aproximación (entre ellos algoritmos genéticos) resulta más apropiada. Los algoritmos genéticos (AG) son métodos adaptativos, utilizados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basado en el principio de supervivencia del más apto (Gestal, M., 2007). En AG, cualquier solución a un problema puede ser representada asignando valores a una serie de parámetros (genes).

El conjunto de los parámetros se representa a través de una cadena de valores denominada cromosoma, el cual contiene toda la información necesaria para construir una solución real al problema. Los algoritmos genéticos trabajan sobre una población inicial de individuos creados de manera aleatoria. Cada uno de ellos representa una posible solución al problema y tienen asociado una medida de la potencialidad del individuo como solución. Sobre esta población actúan operadores genéticos de selección, cruce y mutación. Los primeros permiten seleccionar individuos de la población con mejores cualidades para cruzarse y procrear nuevos individuos. A través de este proceso los individuos menos adaptados son desechados.

La operación de cruce recombina aleatoriamente dos cromosomas intercambiando entre ellos alguna porción de la cadena. Finalmente, los operadores de mutación producen modificaciones aleatorias en los cromosomas buscando generar individuos mejor adaptados. De esta manera se obtiene una nueva población de nuevas soluciones. Sobre esta nueva población son repetidos los procesos de

selección, cruce y mutación obteniendo nuevas soluciones con mejor ajuste (mejor adaptadas). Usualmente el proceso es terminado una vez se haya alcanzado cierto número límite de generaciones (Wisniewski, 2004).

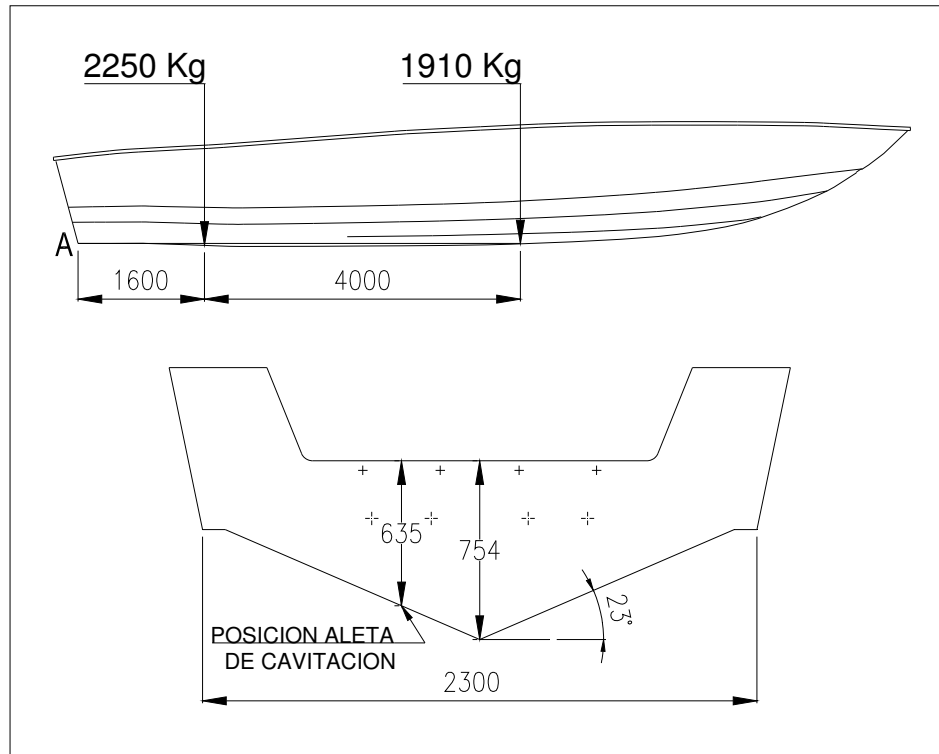
7.4 OPTIMIZACION TRANSOM FABRICADO EN PRFV

La sección de popa donde se ubican los motores fuera de borda es llamada transom o espejo (parte inferior figura 25), en esta zona es donde se aprecia la fuerza máxima producida por los motores, por ende su parte estructural generalmente fabricada en PRFV y madera, debe ser diseñada para soportar esta fuerza la cual es máxima cuando el motor ofrece toda su potencia, se tomara como punto de referencia el momento donde el bote inicia el proceso de planeo, es decir donde la potencia del motor es máxima pero la velocidad es baja y no se producen fuerzas hidrostáticas en el fondo del casco, en el anexo C, se pueden apreciar imágenes del proceso de fabricación de un transom.

Para realizar un análisis de las fuerzas y deflexiones en el transom, debemos calcular la fuerza en esta sección producida por una condición de trabajo específica en un bote, en la figura 25, se muestra un bote de 36 pies, el cual tiene instalados dos motores fuera de borda de 200 HP que a máxima potencia permite alcanzar velocidades de 40 nudos. Es importante saber que por norma el factor de seguridad para esta relación bote-motor debe ser mínimo de 4.

La función objetivo de esta optimización será la disminución de mano de obra para la fabricación del transom que cumpla con factor de seguridad acorde con las restricciones técnicas y criterios normativos establecidos. Para ello se analizarán las secuencias de laminación desde la técnicamente mas simple hasta la laminación actual y se determinará el punto óptimo implementando el principio de Pareto.

Figura 25. Bote 36 pies con 02 motores de 200 HP



7.5 CALCULO DE LA FUERZA DE EMPUJE PRODUCIDA EN LA HELICE

Utilizando el procedimiento descrito en el numeral 6.4, se calcula la resistencia al avance producida por la configuración bote-motor, la fuerza de empuje en la hélice del motor debe vencer esta resistencia al avance por tal motivo se asumirá que la fuerza en la hélice es igual a la resistencia en el avance.

Calculo del centro de gravedad:

De acuerdo a la ecuación de la figura 22, tenemos:

$$X_G = \frac{(2250 \cdot 1.6) + (1910 \cdot 5.6)}{(2250 + 1910)} = 3.44 \text{ m}$$

De igual forma pero con las distancias verticales obtenemos la posición Y_G del centro de gravedad el cual da $Y_G = 0.756 \text{ m}$.

1. Datos suministrados del bote:

m: 4160 kg - Masa desplazada (peso del bote).

LCG: 3.44 m - Distancia desde el transom al centro de gravedad (Longitudinal Centre of Gravity).

VCG: 0.756 m - Distancia desde la línea de base (quilla) al centro de gravedad. (Vertical Centre of Gravity).

b: 2.3 m - Máxima manga entre chines (o entre spray rails).

ϵ : 3° - Inclinación del eje de la hélice relativo a la línea de base.

β : 20° - Angulo de la " V " del casco. (Tomar un promedio entre el ángulo en el transom y en el centro de gravedad).

f: $0.756 - (0.754 - 0.635) = 0.637 \text{ m}$ - Distancia entre la línea del eje de la hélice y el centro de gravedad.

V: 20.6 m/s - Velocidad.

2. Calcule el coeficiente de velocidad C_v (Figura 16).

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{g \cdot b}} = \frac{20.6}{\sqrt{9.8 \cdot 2.3}} = 4.34$$

3. Calcule el coeficiente de levantamiento C_{LO} (fuerza de sustentación) definido en la figura 16 (use la ecuación que incluye m y g). La ecuación de la figura 16 es para cascos planos, lo cual dará el C_{LO} , pero para cascos en " V " esto será el $C_{L\beta}$.

$$C_{Lo} = \frac{m \cdot g}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot b^2} = \frac{4160 \cdot 9.8}{0.5 \cdot 1025 \cdot 20.6^2 \cdot 2.3^2} = 0.035$$

Nota: Recuerde que esto será tomado como el valor de $C_{L\beta}$.

ρ (Densidad) agua salada a 20°C $\approx 1025 \text{ Kg/m}^3$

4. Calcule el correspondiente C_{LO} con la formula para $C_{L\beta}$ (figura 17). Por prueba y error encuentre el C_{LO} que da el $C_{L\beta}$ calculado en el paso 3.

$$C_{L\beta} = C_{Lo} - 0.0065 \cdot \beta \cdot C_{Lo}^{0.6}$$

Probando con un $C_{LO} = 0.059$

$$C_{L\beta} = 0.059 - 0.0065 \cdot 20 \cdot 0.059^{0.6} = 0.0352$$

5. Asuma un ángulo de trim " τ ", por decir 4°.

6. Calcule la relación λ , entre " L_{WL} " Longitud mojada (Wetted Length) y manga " b " (Ecuación para C_{LO} que incluye λ , C_V y τ , Figura 16). Por prueba y error encuentre el λ que da el C_{LO} calculado en el paso 4.

$$C_{Lo} = \tau^{1.1} \cdot \left(0.012 \cdot \lambda^{0.5} + 0.0055 \cdot \frac{\lambda^{2.5}}{C_v^2} \right)$$

Probando con un $\lambda = 1.08$

$$C_{Lo} = 4^{1.1} \cdot \left(0.012 \cdot 1.08^{0.5} + 0.0055 \cdot \frac{1.08^{2.5}}{4.34^2} \right) = 0.0589$$

7. Calcule la longitud mojada promedio L_m , con la ecuación para λ en la figura 17 y calcule el número de Reynolds R_n .

$$\lambda = \frac{L_m}{b}$$

$$L_m = \lambda \cdot b = 1.08 \cdot 2.3 = 2.484m$$

$$R_n = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{20.6 \cdot 2.484}{1 \times 10^{-6}} = 51.2 \times 10^6$$

Nota: ν (Viscosidad cinemática) agua salada a 20°C $\approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

8. Calcule el coeficiente de fricción C_F usando la ecuación de la figura 21.

$$C_F = \frac{0.075}{(\text{Log}R_n - 2)^2} = \frac{0.075}{(\text{Log}51.2 \times 10^6 - 2)^2} = 2.3 \times 10^{-3}$$

9. Determine el incremento en λ debido al rocío, $\Delta\lambda$, y calcule R_f (figura 18).

Con $\tau = 4^\circ$ y $\beta = 20^\circ$, nos vamos al gráfico y encontramos que $\Delta\lambda \approx 0.37$

$$R_f = C_F \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot (\lambda + \Delta\lambda) \cdot \frac{b^2}{\cos \beta} = 2.05 \times 10^{-3} \cdot 0.5 \cdot 1025 \cdot 20.6^2 \cdot (1.08 + 0.37) \cdot \frac{2.3^2}{\cos 20^\circ}$$

$$R_f = 4083.14 N$$

10. Calcule el valor de la distancia ff para R_f relativa al centro de gravedad (figura 18).

$$ff = VCG - \frac{b}{4} \cdot \tan \beta [m] = 0.756 - \frac{2.3}{4} \cdot \tan 20 = 0.547 m$$

11. Calcule la distancia del centro de presión desde el transom, L_{cp} , usando la ecuación de la figura 16 (L_w es igual a L_m para fondos en "V").

$$\frac{L_{cp}}{L_w} = 0.75 - \frac{1}{\frac{5.21 \cdot C_V^2}{\lambda^2} + 2.39}$$

$$L_{cp} = (L_w) \left[0.75 - \frac{1}{\frac{5.21 \cdot C_V^2}{\lambda^2} + 2.39} \right] = (2.484) \left[0.75 - \frac{1}{\frac{5.21 \cdot 4.34^2}{1.08^2} + 2.39} \right] = 1.83 m$$

12. Calcule la distancia para el centro de presión, e , como la diferencia entre LCG y L_{cp} .

$$e = LCG - L_{cp} = 3.44 - 1.83 = 1.61m$$

13. Calcule el valor del momento M bow-down con la ecuación de la figura 20.

$$M_h = g \cdot m \left[\frac{e \cdot \cos(\tau + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} - f \cdot \frac{\sin \tau}{\cos \varepsilon} \right] = 9.8 \cdot 4160 \left[\frac{1.61 \cdot \cos(4 + 3)}{\cos 3} - 0.637 \cdot \frac{\sin 4}{\cos 3} \right]$$

$$M_h = 63333.23Nm$$

$$M_f = R_f \cdot \left[ff - e \cdot \tan \varepsilon - \frac{f}{\cos \varepsilon} \right] = 4083.14 \cdot \left[0.547 - 1.61 \cdot \tan 3 - \frac{0.637}{\cos 3} \right]$$

$$M_f = -710.5Nm$$

$$M = M_h + M_f = 63333.23 - 710.5 = 62622.73Nm$$

14. Como el M calculado dio positivo, se debe encontrar un ángulo τ para el cual el momento sea negativo y así poder utilizar la interpolación lineal.

Si asumimos un $\tau = 2^\circ$ y repitiendo los pasos desde el 5 hasta el 14, encontramos que:

$$R_f = 9764.6 N$$

$$M_h = -64262.4 Nm$$

$$M_f = -78.12 \text{ Nm}$$

$$M = M_h + M_f = -64262.4 - 78.12 = -64340.52 \text{ Nm}$$

15. Calcule el ángulo de trim "τ" para que el momento sea cero por interpolación lineal (extrapolación) entre los dos momentos calculados. Use la ecuación de la figura 20.

$$\tau_o = \tau_1 - \frac{M_1 \cdot (\tau_2 - \tau_1)}{M_2 - M_1} = 4 - \frac{62622.73 \cdot (2 - 4)}{-64340.52 - 62622.73} = 3^\circ$$

16. Calcule la resistencia a la fricción por interpolación lineal entre estos dos valores. (figura 20).

$$R_{fo} = R_{f1} + \frac{R_{f2} - R_{f1}}{\tau_2 - \tau_1} \cdot (\tau_o - \tau_1) = 4083.14 + \frac{9764.6 - 4083.14}{2 - 4} \cdot (3 - 4) = 6923.87 \text{ N}$$

17. Calcule el valor de resistencia con la ecuación de la figura 20.

$$R = [g \cdot m \cdot \sin \tau_o + R_f] \cdot \frac{\cos(\tau_o + \varepsilon)}{\cos \varepsilon} [N] = [9.8 \cdot 4160 \cdot \sin 3 + 6923.87] \cdot \frac{\cos(3 + 3)}{\cos 3}$$

$$R = 9007.9 \text{ N}$$

18. Calcule la potencia efectiva con la formula de la figura 20.

$$P_E = V \cdot R [W]$$

$$P_E = 20.6 \cdot 9007.9 = 185562.74W = 248.8HP$$

Debemos tener en cuenta lo siguiente, existen pérdidas en la hélice del motor por efectos de deslizamiento que equivale aproximadamente a un 20% en pérdida de potencia, además el motor está diseñado para ofrecer su máxima potencia con gasolina extra, las pruebas se realizaron con gasolina corriente para disminuir los costos de operación, la pérdida en potencia por usar gasolina corriente es aproximadamente del 10%. Debido a esto encontramos que la máxima potencia aportada por cada motor es:

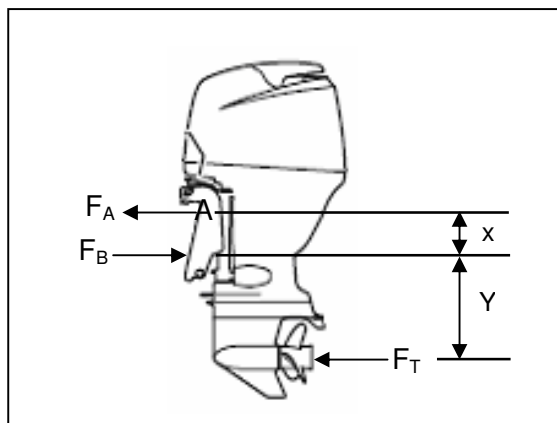
$$200 \text{ HP} - 40 \text{ HP} - 20 \text{ HP} = 140 \text{ HP}$$

$$\text{Potencia total} = 140 \text{ HP} \times 2 = 280 \text{ HP}$$

7.6 CALCULO DE FUERZAS EN LOS PUNTOS DE ANCLAJE DEL MOTOR

Con el valor de la fuerza de empuje en la hélice y las distancias suministradas en la figura 26, encontramos por análisis de estática las fuerzas producidas en el transom por uno de los dos (02) motores de 200 HP fuera de borda.

Figura 26. Fuerzas en motor fuera de borda



DATOS INICIALES:

$F_T = 4500 \text{ N}$, por motor (Calculada en la sección 7.5).

$F_A = ?$

$F_B = ?$

$X = 203 \text{ mm}$

$Y = 648 \text{ mm}$

Peso del motor: 270 kg , equivale a $270 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 2646 \text{ N}$

El motor esta fijado al transom por cuatro tornillos, es decir que cada uno soporta una fuerza vertical de $2646 \text{ N} / 4 = 661.5 \text{ N}$

Haciendo sumatoria de momentos en "A" tenemos:

$$\sum M_A = 0$$

$$(4500 \times 851) - (F_B \times 203) = 0$$

$$F_B = 18864.5 \text{ N} \text{ (Por tener dos tornillos se divide esta fuerza entre dos)}$$

(Es decir en la zona B se tienen dos fuerzas de 9432.25 N)

Haciendo sumatoria de fuerzas en "X" tenemos:

$$\sum F_X = 0$$

$$4500 + (-18864.5) + F_A = 0$$

$$F_A = 14364.5 \text{ N} \text{ (Por tener dos tornillos se divide esta fuerza entre dos)}$$

(Es decir en la zona A se tienen dos fuerzas de 7182.25 N)

7.7 CALCULOS DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN EL TRANSOM

Cada material estará representado por las siguientes letras:

M = Tela mat **R** = Tela roving **W** = Madera

Las propiedades mecánicas de estos materiales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales a utilizar en análisis de transom

MATERIAL	MODULO DE ELASTICIDAD (N/mm ²)	RELACION DE POISSON	RESISTENCIA A LA FLEXION (N/mm ²)	ESPESOR (mm)
TELA MAT (450 gr/m ²)	4900	0.34	98	1
TELA ROVING (800 gr/m ²)	7840	0.15	117.6	1
MADERA (CEDRO)	8918	0.33	73.5	38.1

Fuente: F.Parrilla c. Resinas poliéster, plásticos reforzados. – Tesis C. Quintero P. Manual practico sobre poliéster (plásticos) reforzado con fibra de vidrio (PRFV). – Internet.

El casco tiene 15 mm de espesor y su secuencia de laminación es:

CASCO: M-R-M-R-M-R-M-R-M-R-M-R-M

A continuación se muestran las imágenes del análisis realizado al transom utilizando el programa ANSYS, los resultados obtenidos para las diferentes secuencias de laminación, están consolidados en la tabla 5.

Nota: en las imágenes de resultados DMX = Deformación máxima y SMX = Esfuerzo máximo.

Figura 27. Geometría sección del casco a analizar

ANSYS

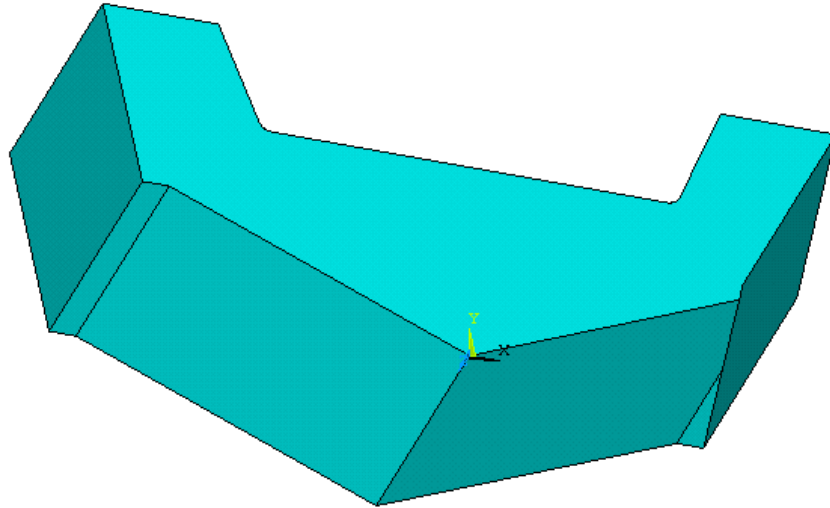


Figura 28. Enmallado geometría y fuerzas aplicadas en transom

ANSYS

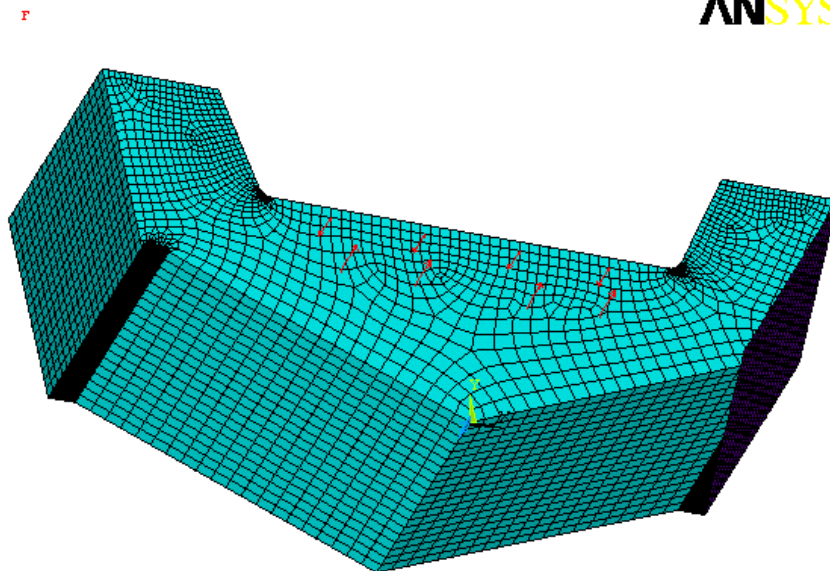


Figura 29. Secciones donde el desplazamiento se limita a cero

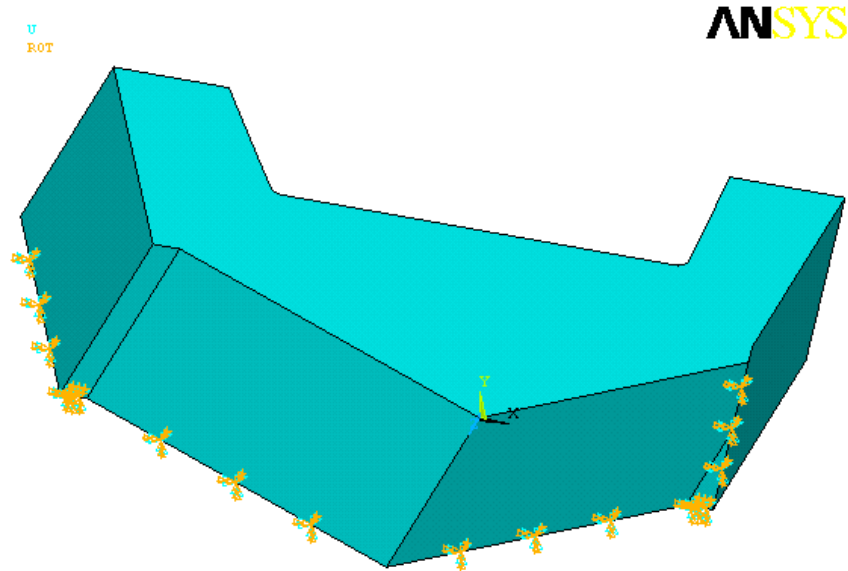


Figura 30. Resultados secuencia laminación MWM

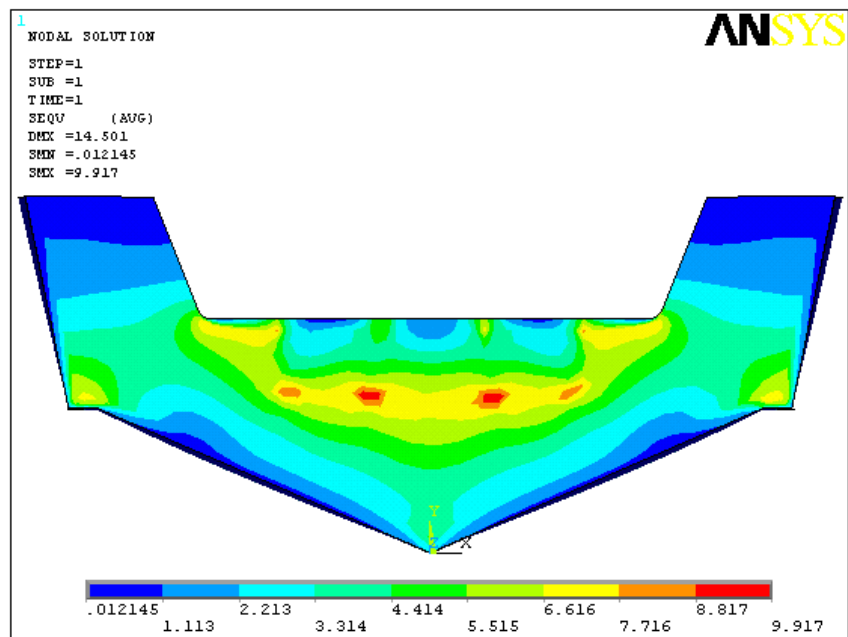


Figura 31. Resultados secuencia laminación MRMWM

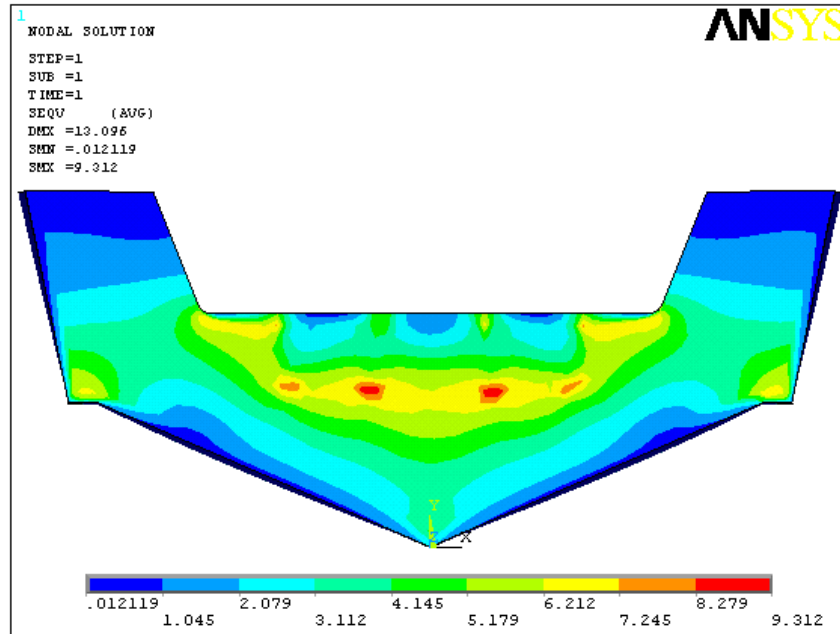


Figura 32. Resultados secuencia laminación MRMRMWM

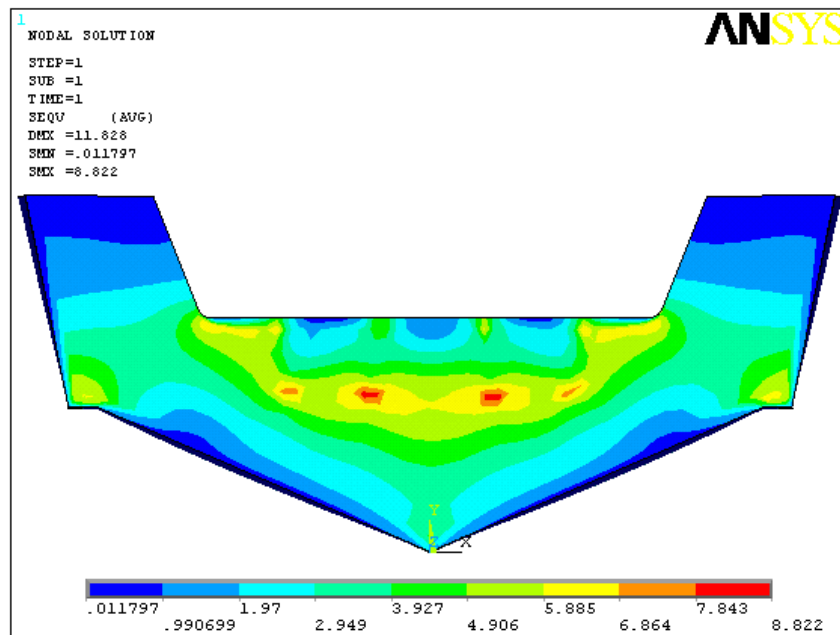


Figura 33. Resultados secuencia laminación MRMRMRMWM

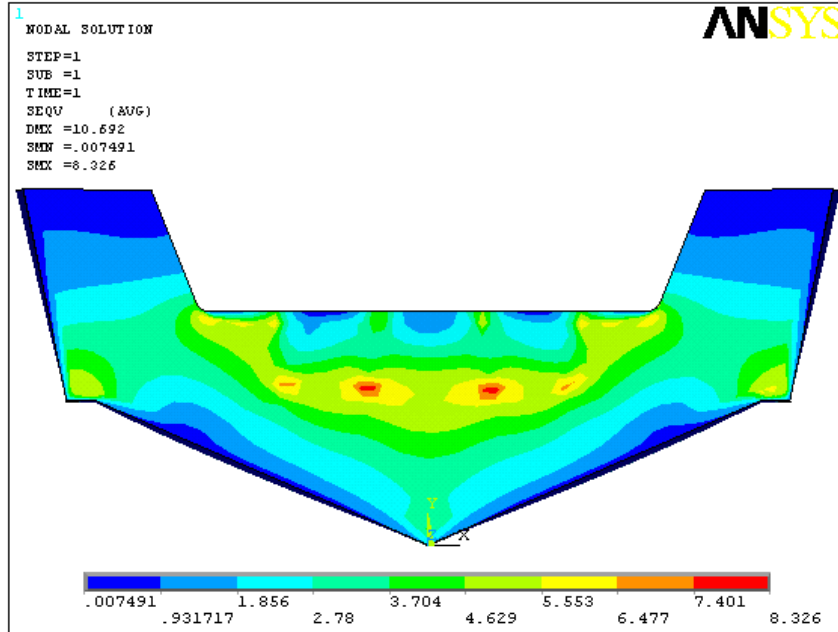


Figura 34. Resultados secuencia laminación MRMRMRMRMWM

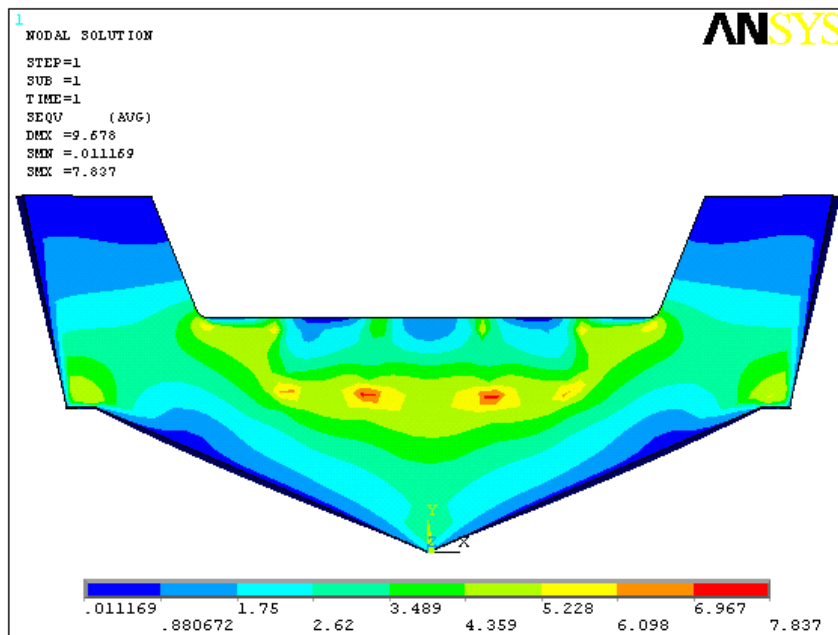


Tabla 5. Resumen análisis de resultados numéricos transom

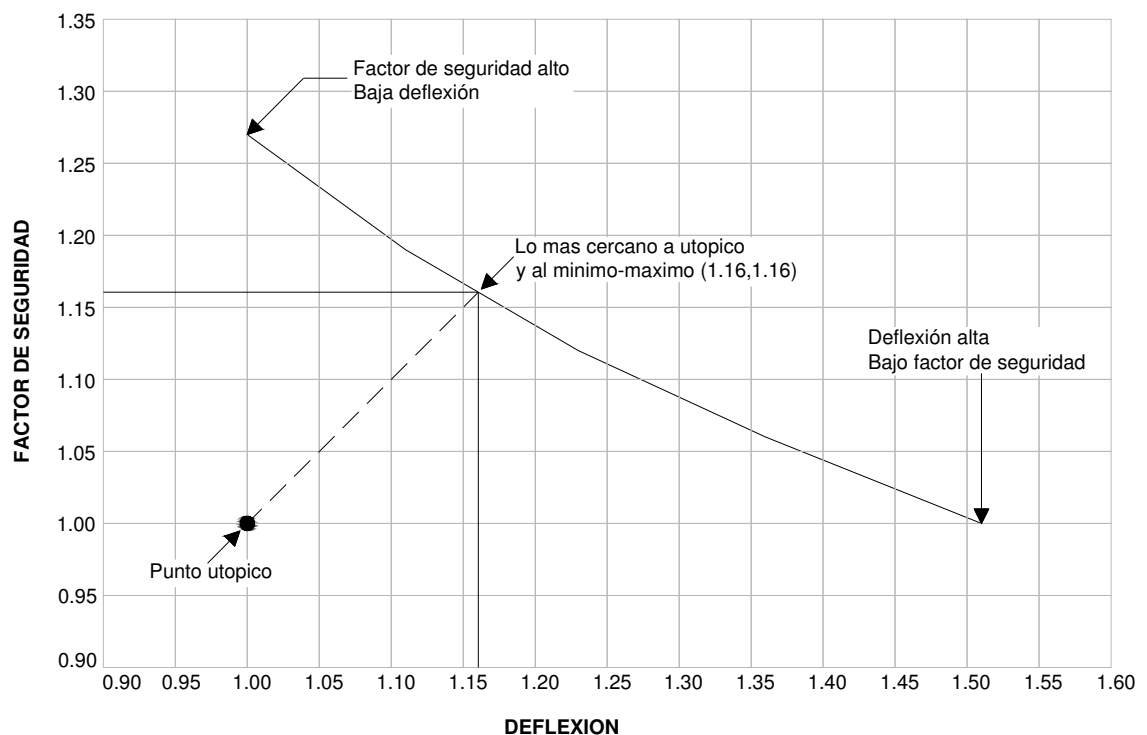
CASO	SECUENCIA LAMINACION TRANSOM	ESFUERZO MAXIMO OBTENIDO (MPa)	DEFLEXION MAXIMA OBTENIDA (mm)	FACTOR SEGURIDAD (ESFUERZO FLEXION MATERIAL / ESFUERZO OBTENIDO)
1	<i>MWM (MINIMA TECNICAMENTE)</i>	9.9	14.5	$73.5 / 9.9 = 7.42$
2	<i>MRMWM</i>	9.3	13	$73.5 / 9.3 = 7.9$
3	<i>MRMRMWM</i>	8.8	11.8	$73.5 / 8.8 = 8.35$
4	<i>MRMRMRMWM</i>	8.3	10.7	$73.5 / 8.3 = 8.8$
5	<i>MRMRMRMRMWM (ACTUAL)</i>	7.8	9.6	$73.5 / 7.8 = 9.4$

Tabla 6. Parametrización de resultados y mano de obra secuencias de laminación

CASO	MANO DE OBRA (HORAS)	DEFLEXION MAXIMA (PARAMETRIZADA)	FACTOR SEGURIDAD (PARAMETRIZADO)
1	8	1.51	1
2	12	1.36	1.06
3	16	1.23	1.12
4	20	1.11	1.19
5	24	1	1.27

Con estos resultados y parametrizando los valores (ver tabla 6), procedemos a realizar un grafico de Factor de Seguridad Vs deflexión máxima (ver figura 35), y utilizando el principio de pareto se determina el factor de seguridad optimo, el cual podremos enfrentar contra los datos de la tabla 6, donde se muestra la mano de obra en horas dependiendo de la secuencia de laminación aplicada, la mano de obra consta básicamente de corte de telas, fabricación plantilla en triplex, alistamiento madera, pulir superficies en el casco para pegar las telas, aplicación de telas con resina, tiempo de gel (tiempo secado mezcla tela y resina) y proceso de pintura.

Figura 35. Factor de seguridad Vs Deflexión



En la figura 35, encontramos que el valor mas cercano al utópico es 1.16, en la tabla 6, este valor se encuentra entre 1.12 y 1.19, técnicamente no es posible una

secuencia de laminación que permita un valor exacto de 1.16, debido a que los incrementos se realizan en capas de tela mat y roving, por tal motivo podemos tomar el valor de 1.12 como el valor optimo, el cual equivale a la secuencia de laminación *MRMRMWM* (caso 3), factor de seguridad 8.35 y mano de obra de 16 horas.

Si comparamos la laminación optima Vs laminación actual encontramos que la reducción en el factor de seguridad es de un 11%, y sigue siendo mayor al requerido por norma ($Fr = 4$). Sin embargo la reducción de tiempo en mano de obra es de 33%, lo cual produce un impacto considerable en los costos de producción.

CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo podemos concluir lo siguiente:

Las técnicas de optimización son una herramienta primordial para desarrollar proyectos enfocados en mejorar los actuales y futuros diseños en la ingeniería moderna, tal como se aprecia en el capítulo 7, donde se utiliza el principio de Pareto para optimizar el transom de un bote con motores fuera de borda.

La informática se ha convertido en una herramienta primordial para todos los diseñadores de embarcaciones, se pueden realizar modelos para determinar como se van a comportar bajo una situación dada, y así tomar la decisión de modificar o aceptar el diseño realizado para luego ser construido, pero es importante aclarar, que estos programas son de gran utilidad siempre y cuando los parámetros ingresados por el diseñador sean los adecuados y se sepan analizar e interpretar los resultados obtenidos.

La fabricación y desarrollo de embarcaciones en PRFV, esta cada día tomando mas fuerza y por tal motivo las empresas dedicadas para tal fin, constantemente ofrecen productos no solo con mejoras en su desempeño (navegación), sino también con mejoras para la comodidad de sus tripulantes.

Al momento de fabricar, modificar o realizar transformaciones se deben tener en cuenta las normas, recomendaciones, procedimientos establecidos y realizar las

pruebas pertinentes, a fin proporcionar las mínimas condiciones de seguridad y evitar posibles accidentes.

El tipo de Bote vs. Motor a utilizar para una actividad determinada, es una decisión muy importante que implica una gran responsabilidad tanto del diseñador del bote, como del fabricante del motor, debido a que se podría beneficiar o perjudicar económicamente al usuario por los costos bajos o altos de operación.

La información desarrollada en este trabajo será de gran ayuda para aquellas personas que están trabajando o que apenas se inician al campo náutico, ya que podrán tener una idea general de los aspectos importantes a los que se van a enfrentar.

El área náutica tiene una proyección muy importante en nuestro país, principalmente por nuestra situación geográfica, por ello son solicitados con mas frecuencia Ingenieros Mecánicos que puedan aportar sus conocimientos al mejoramiento y desarrollo de productos como los botes en PRFV.

RECOMENDACIONES

Es importante implementar y continuar con el desarrollo de lo expresado en este trabajo por ello recomendamos lo siguiente:

Verificar antes de realizar alguna modificación estructural a su embarcación, que esta ante una empresa responsable y calificada para este tipo de trabajos, no busque solo precios bajos, trate de buscar un equilibrio entre precio y calidad.

Comprobar periódicamente (puede ser cada año) por personal calificado, el estado del casco y realizar pruebas bote/motor, para determinar si estos están operando de forma adecuada y así ofrecer seguridad y costos bajos de operación a sus usuarios.

Incorporar en el plan de estudios de las universidades, asignaturas enfocadas a las nociones básicas del área náutica, para incentivar a la realización de proyectos de investigación que puedan ser de interés a las empresas del sector náutico.

Establecer un mejor control por parte del gobierno colombiano a las embarcaciones que circulan por nuestros mares, muchas personas las utilizan como medio de transporte (entre ellos turistas) sin saber que están exponiendo sus vidas, debido a que estas embarcaciones estructuralmente no son seguras.

BIBLIOGRAFIA

DAVE GERR. The elements of boat strength for builders, designers and owners. Mc Graw Hill. United States of America 2000.

BENDEZU REYES, José Humberto. Los plásticos reforzados en fibra de vidrio (PRFV), sus aplicaciones y desarrollo en la industria nacional. Universidad nacional mayor de san marcos. Lima-Perú. 2002.

LARS LARRSON Y ROLF E ELIASSON. Principles of yacht design. Second edition. Mc Graw Hill, Gran Bretaña 2000.

FRANCISCO PEREZ, LUIS. Notas sobre el comportamiento en la mar de embarcaciones de planeo. 3er simposio de diseño e ingeniería naval. Cartagena. 29-31 Agosto de 2007.

RICHARD MEDINA, MARCOSSALAS RICHARDLUCO Y VOLKER BERTRAM. Análisis de estructuras navales mediante el método de elementos finitos. Síntesis Tecnológica, Vol. 2 N° 1, noviembre 2005, pp. 27-36. Universidad austral de chile.

ABS (American Bureau of Shipping). www.eagle.org

MORALES ARCINIEGAS, José Felipe. Modelo de cálculos estructurales para un modelo de síntesis para optimización de diseños conceptuales de embarcaciones de alta velocidad en materiales compuestos. Colombia. 2008.

QUINTERO PORTOCARRERO, Carlos Andrés: Manual practico sobre poliéster (plásticos) reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Colombia 2007

F. PARRILLA C. Resinas poliéster, plásticos reforzados. 13ª Edición. La ilustración s.a México 1993.

M. C. CASTILLO, M. A. LOSADA, E. CASTILLO Y R. MÍNGUEZ. Técnicas de optimización en ingeniería marítima.

DR. CARLOS A. COELLO COELLO, Optimización en Ingeniería.

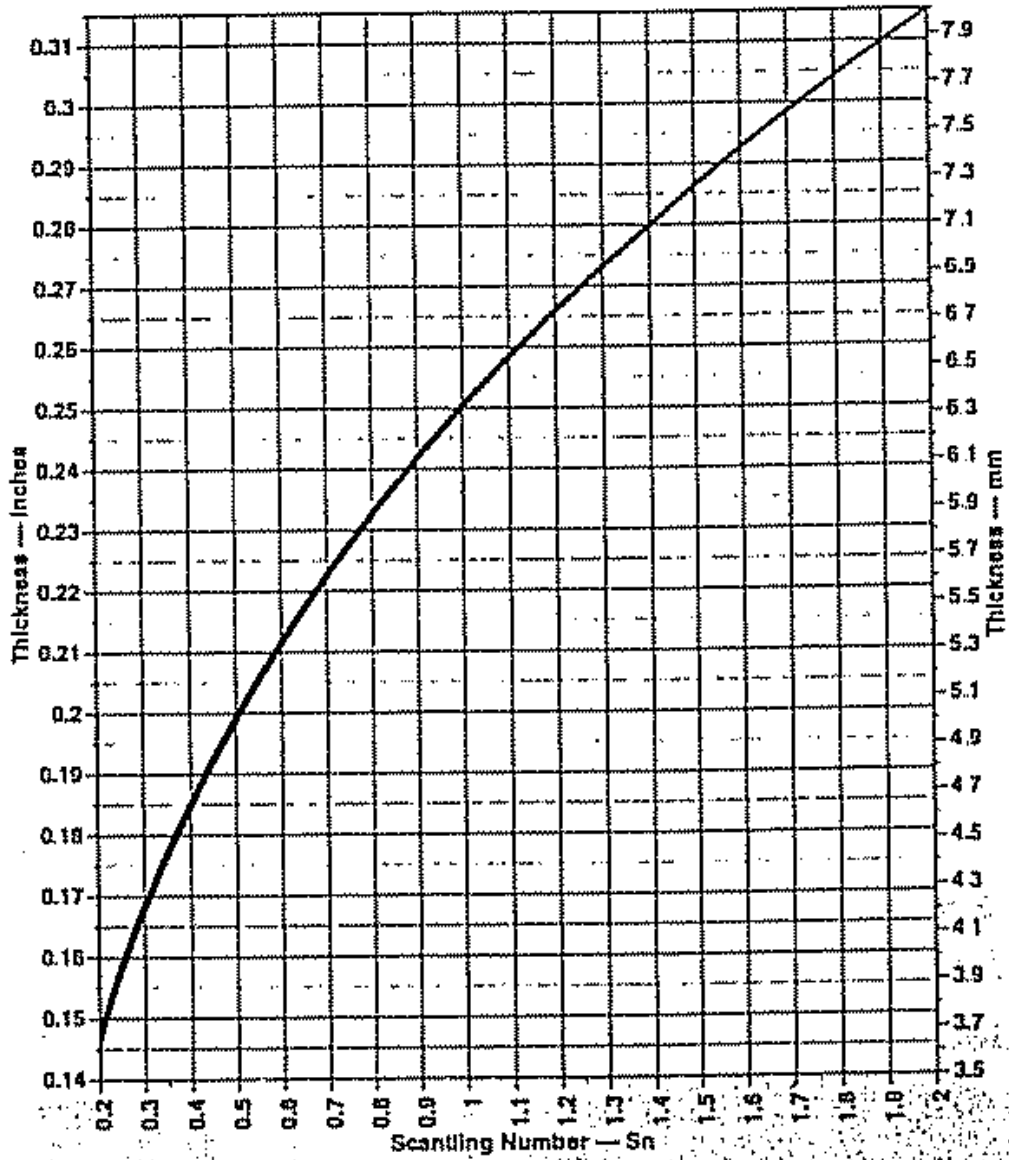
J.USECHE V. Optimización Estructural de Paneles Navales Fabricados con Materiales Compuestos Laminados.

MICHAEL G. PARSONS. Applications of optimization in early stage ship desing.

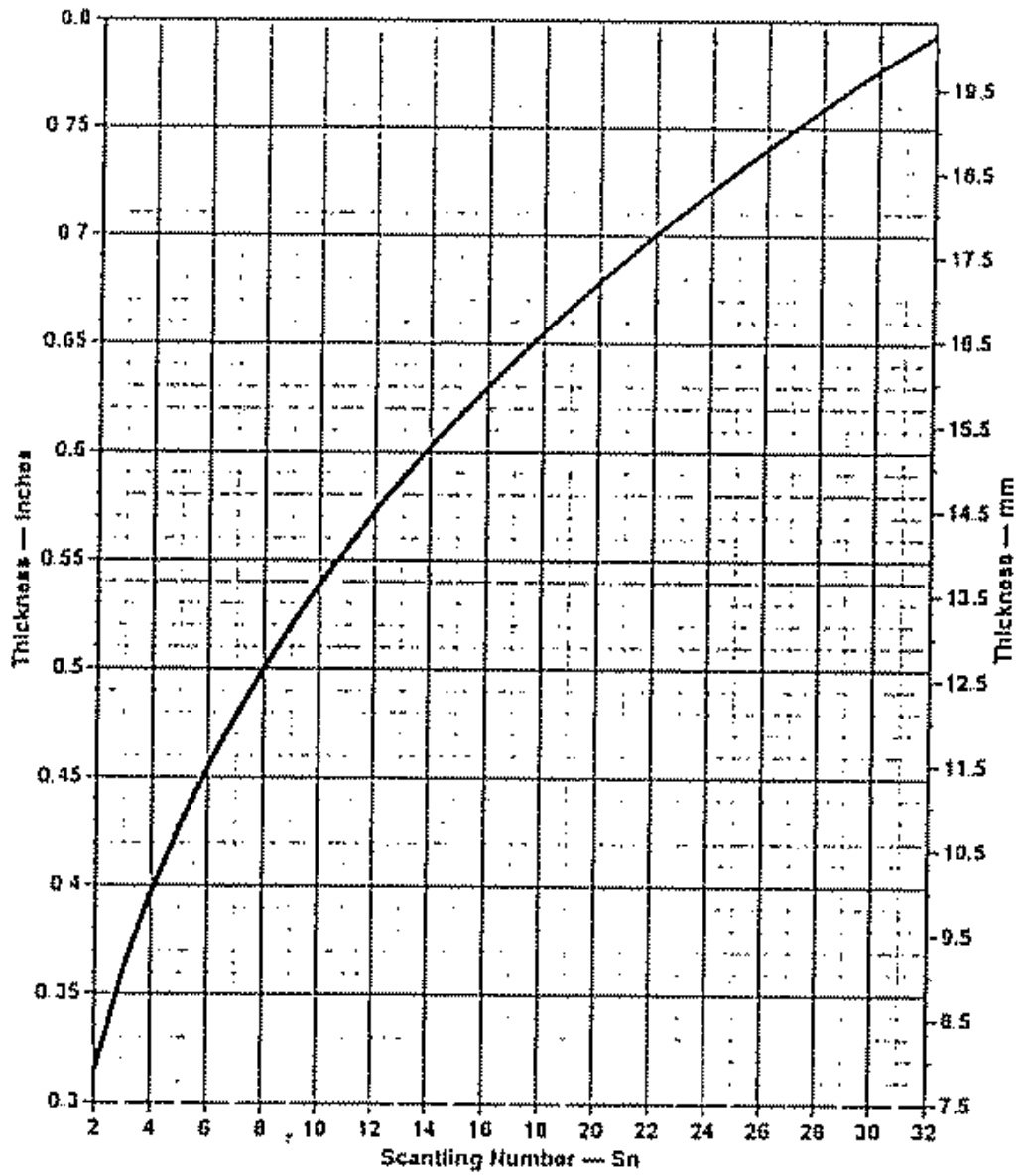
PETER A. SILVIA / ROBERT J. SCOTT. Small craft engineering – structures, Publication No. 121, University of Michigan, College o Engineering, 1971.

ANEXOS

ANEXO A: Gráficos número de Scantling

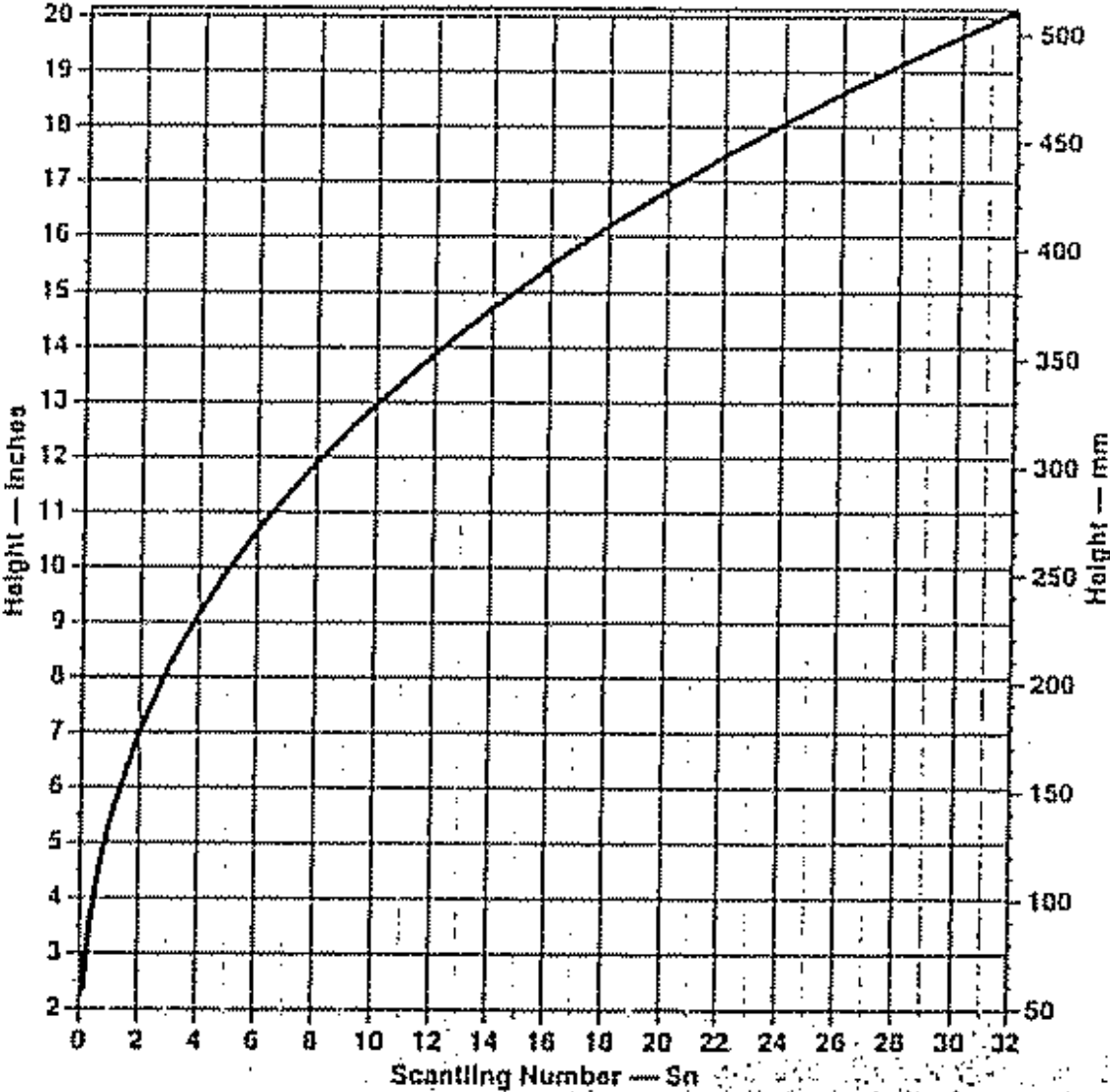


*Solid-Glass Hull Thickness (Lower Topsides)
Small Boats*



*Solid-Glass Hull Thickness (Lower Topsides)
Large Boats*

Bottom Laminate Height



Bottom Laminate Height (BLH) Above Waterline

ANEXO B: Imágenes bote de planeo



ANEXO C: Imágenes proceso fabricación transom

Plantilla en triplex con la geometría del transom



Aplicación de telas mat y roving (numero de telas dependen del análisis estructural)



Espesor telas aplicadas sobre plantilla en triplex



Aplicación de madera y masilla



Aplicación de últimas telas de refuerzo



Espesor capas de tela y madera

