

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



ANÁLISIS Y CÁLCULO DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL
DEL CASCO DEL YATE VELERO UNI

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO NAVAL

JOSÉ LUIS MANTARI LAUREANO
PROMOCIÓN 2004 – I

LIMA – PERÚ
2008

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico:

Al Ingeniero Frans Willems, quien en vida fue uno de los mejores profesores de la carrera de ingeniería naval, que con muchos deseos me impulsó y colaboró en la elaboración de esta tesis.

A mi nueva familia (Lizbeth, Cielo e Italo), por el calor de todos los días, sobretodo en esos días de frío.

A mis Padres (Ing. Jesús Mantari y Aida Laureano), por su deseo de ver culminada esta tesis.

ÍNDICE

PRÓLOGO.	1
1. CONSIDERACIONES GENERALES.	5
1.1 Introducción.	5
1.2 Objeto y Objetivo de análisis.	7
1.3 Metodología.	8
1.4 Alcance.	9
1.5 Características del Yate Velero UNI.	9
2. CARGAS GLOBALES Y LOCALES EN UN YATE VELERO SEGÚN REGLAS Y LA BUENA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA.	12
2.1 Introducción.	12
2.2. Cargas globales en el Yate Velero UNI.	14
2.2.1. Cargas de oleaje y arboladura.	14
2.2.1.1 Cargas de oleaje.	15
2.2.1.2 Cargas de arboladura.	16
2.2.2 Influencia de las cargas globales sobre el casco.	18
2.3. Cargas locales.	18
2.3.1 Cargas hidrostáticas.	20

2.3.2 Cargas hidrodinámicas.	21
2.3.3 Influencia de las cargas locales sobre el casco.	22
2.3.4 Estudios experimentales de varadas y encalladuras.	24
2.3.5 Distribución transversal de cargas.	26
3. DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZOS DEL YATE VELERO UNI.	28
3.1 Introducción.	28
3.2 Sistema de refuerzos.	29
3.2.1 Sistema de refuerzo transversal.	29
3.2.2 Sistema de refuerzo longitudinal.	30
3.2.3 Sistema de refuerzo mixto.	30
3.3 Consideraciones previas a la disposición de los refuerzos.	31
3.4 Areas de concentración de cargas globales y locales de un yate velero de similares características al Yate Velero UNI.	34
3.5 Disposición de refuerzos.	42

4. INVESTIGACIÓN TEÓRICA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS CON ESPECIAL ÉNFASIS EN PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRF).	46
4.1 Introducción.	46
4.2 Materiales compuestos.	48
4.2.1. Matrices poliméricas.	50
4.2.1.1 Matrices termoestables (Durómeros).	50
❖ Resina poliéster.	50
❖ Resina viniléster.	52
❖ Resina epoxi.	53
❖ Resinas fenol.	54
4.2.1.2 Matrices termoplásticos.	57
4.2.2. Refuerzos.	57
4.2.2.1 Fibra de vidrio.	58
4.2.2.2 Fibra de carbono.	59
4.2.2.3 Fibras orgánicas.	60
4.2.3. Geometría de los refuerzos.	61
4.2.3.1 Fieltros (Mats).	62
4.2.3.2 Tejidos (Woven Rovings).	63
4.2.3.3 Ensamblados.	64
4.2.3.4 Trenzados.	64
4.2.3.5 Mallados y encadenados.	65
4.2.4. Materiales de núcleo (Construcción tipo sándwich).	65

4.2.4.1 Madera de balsa.	66
4.2.4.2 Espumas termoestables.	67
4.2.4.3 Espumas de PVC (Cloruro de polivinilo).	67
4.2.4.4 Nido de abeja.	68
4.2.4.5 Espuma de PMI.	69
4.3 Parámetros adicionales de un laminado.	71
4.4 Comparación entre un laminado simple y un laminado tipo sándwich.	75
4.4.1 Transferencia de carga.	76
4.4.2 La importancia de la unión.	77
4.4.3 Resistencia y rigidez.	77
4.4.4 Diseño estructural usando laminado sólido simple.	80
4.4.5 Diseño estructural usando construcción sándwich.	82
4.4.6 Ventajas y desventajas de un laminado sólido simple y un laminado tipo sándwich.	83
4.5 Laminado húmedo.	85
4.6 Fatiga.	86
4.7 Aplicaciones navales.	88
4.8 Notas finales.	91

5. CALCULO ESTRUCTURAL SEGÚN ISO N° 12215-5, ABS Y LA BUENA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA.	94
5.1 Introducción.	94
5.2 Cálculo de la resistencia longitudinal o global del Yate Velero UNI.	95
5.2.1 Sección crítica del Yate Velero UNI.	96
5.2.2 Módulo de sección total requerido en el Yate Velero UNI.	99
5.2.3 Módulo de sección total del Yate Velero UNI.	100
5.3 Cálculo de la resistencia local del Yate Velero UNI.	108
5.3.1. Las reglas de estandarización ISO N°12215.	108
5.3.1.2 Estructura ISO N° 12215.	109
5.3.1.2 Definiciones del casco, según las reglas ISO N° 12215.	113
5.3.1.3 Laminado básico.	117
5.3.2. Cargas de diseño según las reglas ISO N° 12215-5.	118
5.3.2.1 Límites de aplicación de las reglas ISO N° 12215-5.	119
5.3.2.2. Presión relativa de diseño en el fondo del casco del yate velero.	119
5.3.2.2.1 Presión de diseño en el fondo del casco del yate velero propulsado a motor.	120
5.3.2.2.2 Presión de diseño en el fondo del casco del yate velero propulsado a vela.	125
5.3.2.3. Presión relativa de diseño en el costado del casco del yate velero.	126

5.3.2.3.1 Presión de diseño en el costado del casco del yate velero propulsado a motor.	127
5.3.2.3.2 Presión de diseño en el costado del casco del yate velero propulsado a vela.	128
5.3.2.4 Presión relativa de diseño de cubierta del yate velero.	129
5.3.2.5 Presión relativa de diseño de mamparos del yate velero.	133
5.3.3. Cálculo del escantillonado del yate velero.	139
5.3.3.1 Cálculo de paneles.	139
5.3.3.2 Cálculo de refuerzos internos.	147
5.4. Cálculo del timón.	153
5.4.1 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según la buena práctica de la ingeniería.	153
5.4.2 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según reglas ABS.	157
5.4.3 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según reglas ISO N° 12215-8.	159
5.5. Cálculo de la quilla.	165
5.5.1 Cálculo de las cargas locales producidas por la quilla-lastre sobre la estructura del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.	165
5.5.2 Cálculo de las cargas locales producidas en una varada o encalladura sobre la estructura del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.	170
5.6. Cálculo del soporte del mástil.	176

5.6.1 Cálculo del soporte del mástil del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.	177
5.6.2 Cálculo del soporte del mástil del yate velero, según la ISO 12215-9 [30] y la buena práctica de la ingeniería.	178
6. COSTOS.	184
6.1 Introducción.	184
6.2. Costos de construcción del yate velero.	184
6.2.1. Costos de construcción del yate velero.	187
6.2.1.1 Materiales.	187
6.2.1.2 Mano de obra.	196
6.2.2. Costos indirectos.	196
CONCLUSIONES.	198
RECOMENDACIONES.	201
OBSERVACIONES.	203
ANEXOS.	208
BIBLIOGRAFÍA.	228

PRÓLOGO

En el presente trabajo se muestra el análisis y cálculo de la resistencia estructural del Yate Velero Insignia de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. Este trabajo abarca el análisis y cálculo estructural del Yate Velero UNI (15.3 m de eslora, aparejos keche, quilla tipo aleta), debido a que en el diseño preliminar [1] no se realizaron los procedimientos comúnmente usados en la fase preliminar de un proyecto [29].

El Yate Velero es diseñado para construirse con fibra de vidrio, material no muy difundido en nuestro medio. La fibra de vidrio es un material de gran importancia, no sólo en el campo de la Ingeniería Naval, sino también en muchas otras áreas de la ingeniería, debido a las múltiples ventajas que este material proporciona en cuanto a disponibilidad y maniobrabilidad, ya que uno mismo puede obtener una estructura en fibra de vidrio con la resistencia requerida.

El tema elegido surge de la necesidad de acrecentar nuevas técnicas a nuestra formación profesional, tanto en lo que respecta al análisis y cálculo de la estructura de un yate velero, así como a la selección del tipo de fibra de vidrio, núcleo y resina.

El Primer Capítulo contempla las consideraciones generales. En este capítulo se muestra un panorama completo de la tesis: la introducción, el objetivo y objeto de

análisis, la metodología usada, el alcance general del proyecto y adicionalmente presentamos las características generales del Yate Velero UNI.

En el Segundo Capítulo se exponen las condiciones generales de análisis y cálculo; los principales fenómenos naturales que dan origen a las cargas globales (las cargas de arboladura y cargas debido a las condiciones a las que es sometida una embarcación en la mar, es decir, las condiciones de arrufo y quebranto); así como también las influencias que estas cargas producen en el casco. Complementando este capítulo se exponen, de manera detallada, la influencia de las cargas locales (hidrostáticas e hidrodinámicas), estudios experimentales de varadas o encalladuras y la distribución de fuerzas transversales.

El Tercer Capítulo completará el análisis realizado en el capítulo anterior. En este capítulo se hallará la disposición del sistema de refuerzos del Yate Velero UNI (con el uso literatura especializada referida al tema y mediante una disposición preliminar del tipo de estructuras que tendrá el yate velero), así como también el tipo de sistema de refuerzos con que contará.

En el Cuarto Capítulo se realizó un estudio de investigación teórico detallado de los materiales compuestos, con especial referencia a la fibra de vidrio, material con que el armador - Dirección de Escuela de Ingeniería Naval y la Universidad Nacional de Ingeniería - solicitó se diseñase el Yate Velero Insignia de nuestra casa de estudios superior "la UNI".

Tener bien en claro la intensidad de las cargas en las áreas de la superficie del casco e interiores, el tipo de sistema de refuerzos, la disposición preliminar de refuerzos y la resistencia de los materiales a usar, significa tener una buena proyección para el cálculo estructural del Yate Velero UNI. En el Quinto Capítulo se calculó la resistencia longitudinal o global, para tal fin se halló la sección crítica del Yate Velero UNI, el momento flector en dicha sección y el módulo de sección requerido en el casco, considerando las cargas mencionadas en el capítulo 2. Así mismo, se realizó el cálculo estructural local mediante las reglas de estandarización ISO N° 12215-5 [24], la ABS [5] y la buena práctica de la ingeniería. Adicionalmente, se realizó un análisis y cálculo analítico detallado del timón y la quilla (en condiciones de varada o encalladura). Con la finalidad de cubrir ciertos vacíos en las reglas de estandarización se realizó el cálculo del timón según la buena práctica de la ingeniería, las reglas ABS y las reglas ISO N° 12215-8 [27].

En todo estudio de Ingeniería siempre es necesario realizar un análisis de costos y este proyecto no es la excepción. El análisis no se realizó pretendiendo abarcar, en detalle, temas relacionados a los costos, sino más bien se realizó un análisis breve cuya finalidad es la de dar una idea general de las implicancias económicas de un proyecto de este tipo.

Finalmente, encontramos las conclusiones, recomendaciones, anexos y la referencia bibliografía.

Aprovecho estas líneas para hacer de conocimiento que la culminación de esta tesis no hubiese sido posible sin la colaboración desinteresada de las personas que mencionaré, líneas abajo.

Doctor Alberto Coronado Matutti (Mi asesor de tesis)

Ing. Frans Willems (Mi asesor de tesis, hasta antes de su deceso)

Ing. Dennys De La Torre Cortez (Por el apoyo bibliográfico y la iniciativa)

Ing. Juan Vallejos Quispe (Por el apoyo bibliográfico)

CAPÍTULO 1

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1 Introducción.

Intuitivamente, tanto los constructores navales como los náuticos, saben que las embarcaciones de sólida construcción poseen una resistencia estructural a toda prueba. Es por ello que casi nunca se intenta controlarla por medio del cálculo. La práctica ha demostrado que el casco de una embarcación posee en si mayor resistencia estructural que un buque, si ambos están varados al centro [10]. El casco de una embarcación puede quedar totalmente en seco, mientras que, el casco del buque probablemente se quiebre en dos. Entonces cabe preguntar ¿Hay realmente alguna necesidad de calcular la resistencia de una embarcación menor?

Por siglos las embarcaciones se han construido con el uso de las reglas de escantillado que se basan en datos prácticos, reglas técnicas, suposición y suerte, sin los cálculos reales de resistencia estructural [2]. Las fuerzas del viento y de la mar son iguales hoy que entonces, así que las razones para la necesidad de calcular la resistencia de embarcaciones se deben justificar adecuadamente.

Para comenzar, las embarcaciones modernas, a partir de los años 90, tienen instalados los aparejos a mayor altura, comparadas con las embarcaciones de hace apenas 50 años [2]; la arboladura de aluminio, los stays inoxidable, los obenques y las velas de fibras sintéticas entregan más energía y no necesitan ser reforzadas desde que han demostrado ser resistentes [2], pero éstas conducen altas cargas de aparejo que deben ser absorbidas por el casco. Otro factor que apunta en esta dirección es el de poder construir embarcaciones que sean técnica y económicamente competitivas con las que se hacen en otros países, de manera que la estrategia, consecuentemente, sea la de optimizar los índices que hacen poco competitiva una embarcación, como son: **el peso, la distribución de refuerzos, el acabado, etc.**

Con la fabricación de embarcaciones en serie el costo de producción es cada vez más importante [26]. Puesto que el costo se relaciona directamente con el peso de

la embarcación, la importancia de evitar construir embarcaciones demasiado pesadas juega un papel cada vez más preponderante. Por otra parte, el rendimiento (buscado casi siempre), que es inversamente proporcional al peso, ha incitado el desarrollo de embarcaciones cada vez más ligeras.

La Universidad Nacional de Ingeniería muy conciente de lo que significa un proyecto de Ingeniería de tal envergadura apuesta por la realización completa del proyecto y es así que en esa tarea se involucró no sólo un grupo de alumnos, sino también parte de la comunidad de docentes y autoridades de la UNI. En particular, en esta oportunidad se presenta el proyecto de tesis titulado: “ANÁLISIS Y CÁLCULO DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL CASCO DEL YATE VELERO UNI”, el cual es parte fundamental del proyecto global.

1.2 Objeto y objetivo de análisis.

Como objeto de análisis se eligió las líneas de forma, curvas hidrostáticas, plano vélico y acomodaciones del Yate Velero Insignia de la Universidad Nacional de Ingeniería [1]. El objetivo fundamental de la presente tesis es analizar y calcular la resistencia estructural del casco del Yate Velero UNI.

1.3 Metodología.

El análisis y cálculo estructural del Yate Velero UNI, así como de cualquier otro artefacto naval con similares características, es muy complejo, por lo cual es necesario el uso de reglas de estandarización, normas de sociedades de clasificación y la buena práctica de la ingeniería.

Conociendo las características generales del yate velero, se estudiarán y calcularán las cargas a las cuales está sometido. Este conocimiento nos permitirá distribuir coherentemente los refuerzos y finalmente servirá para calcular el escantillonado de Yate Velero UNI. La ISO no ajena a ello, creó una regla de estandarización para yates veleros de esloras menores de 24m “ISO STANDARD 12215 [24]”. La mayor parte de esta regla de estandarización fue elaborada, pero todavía hay temas en proceso de elaboración, es por ello que adicionalmente utilizaremos las reglas de estandarización de la sociedad de clasificación “ABS”, así como también la buena práctica de ingeniería. Se eligió la ISO N° 12215 por una sencilla razón: si un proyecto de diseño de gran envergadura quisiera acceder a la Comunidad Europea, necesariamente deberá estar estandarizada por la ISO EUROPEA y este proyecto no es una excepción.

1.4 Alcance.

La presente tesis abarca todo lo relacionado con el análisis y cálculo del escantillonado del casco del Yate Velero Insignia de la Universidad Nacional de Ingeniería, que incluye: estudio completo de cargas que soporta un yate velero; distribución de refuerzos; estudio de los materiales compuestos; cálculo del escantillonado de los refuerzos y paneles de fondo, costado y cubierta; cálculo de mamparos; cálculo de timón; cálculo de la quilla; análisis somero de costos de producción y finalmente las conclusiones, observaciones y recomendaciones.

1.5 Características del Yate Velero UNI “EDUARDO DE HABICH”.

Luego de realizar una revisión general del objeto de estudio (la tesis de ingeniería De La Torre [1]), los parámetros de performance y especificaciones más importantes del yate velero [13], se resumen en la Tabla 1.1. En el análisis preliminar de estabilidad dinámica, la nave se orienta a realizar travesías en la mar, como lo demuestra el elevado índice de estabilidad dinámica “STIX”, la misma que clasifica al yate a vela en la categoría “A” [1].

Elemento	Valor	Unidades
Eslora total (L_{OA}) o Eslora del casco (L_H)	15.3	m
Eslora de flotación (L_{WL})	13.6	m
Manga máxima (B)	4.3	m
Manga de flotación (B_{WL})	4	m
Puntal de la embarcación o puntal del casco (D_c)	2.3	m
Calado del casco (T_c)	0.85	m
Relación L_{WL}/B_{WL}	3.4	-
Área de la superficie de flotación (A_{WL})	35.88	m ²
Toneladas por centímetro de inmersión (TPC)	0.367	Tons
Lastre	6000	kg
Desplazamiento en condición de máxima carga (Δ)	19740	kg
Desplazamiento en condición de media carga	18242	kg
Desplazamiento en condición de carga ligera	15895	kg
Área de superficie de carena	40.9	m ²
Volumen de carena	19.26	m ³
Área triángulo de proa	56.1	m ²
Área vela mesana	47.6	m ²
Área vela principal	18.3	m ²
Capacidad de petróleo	605	kg
Capacidad de agua	1514	kg
Potencia motriz	76	HP
Velocidad máxima	8.9	nudos
Velocidad de crucero	8.2	nudos
Tripulantes	10	-
Autonomía	10	días
Coefficiente de bloque (C_b)	0.365	-
Coefficiente prismático (C_p)	0.59	-

Tabla1.1 Especificaciones y parámetros de performance más importantes del Yate Velero UNI [1,13].

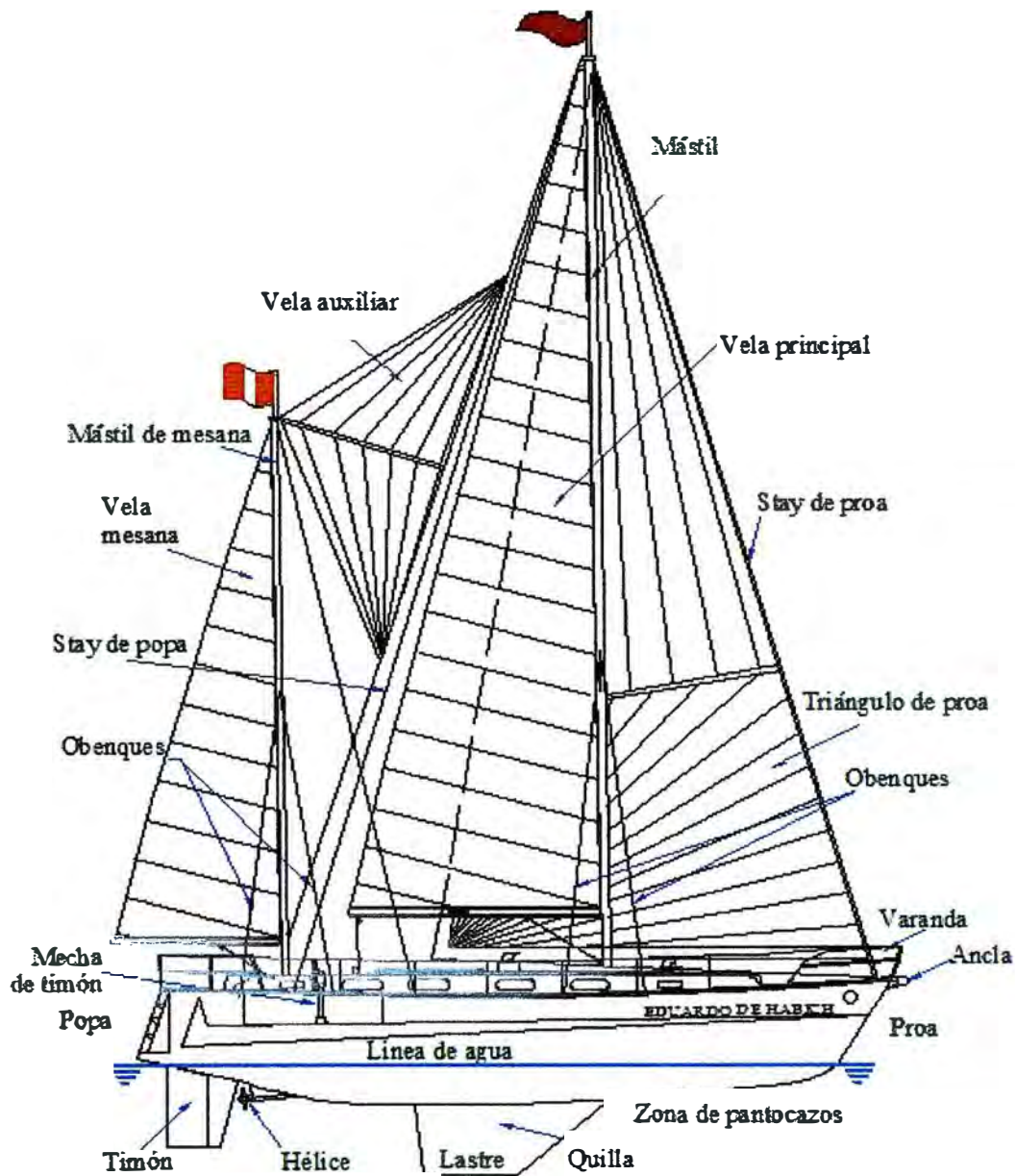


Fig. 1.1 Yate Velero Insignia UNI “Eduardo de Habich” [1]

CAPÍTULO 2

CARGAS GLOBALES Y LOCALES

2.1 Introducción.

Cargas de aparejos más grandes en magnitud (un aumento de velocidad implica mayor propulsión y un aumento de ésta requiere mayor área vélica, por consiguiente aparejos más grandes) y un armador competitivo deben ser tomados en cuenta al analizar la estructura del casco de un yate velero cada vez más y más ligero. Esto significa un pequeño margen de error y consecuentemente alta precisión en los cálculos de resistencia estructural. Hay factores con altas demandas estructurales y que ameritan estudios rigurosos, por ejemplo, el desarrollo de quillas de aleta cada vez más cortas (que aumentan la tensión en el empalme de quilla/casco) y el desarrollo de timones apoyados solamente en sus propios ejes de pala. En este capítulo no pretendemos mostrar todas las demandas estructurales de las cargas en general, pero sí seguir el curso que nos conlleve al cumplimiento de nuestro objetivo.

Antes de estudiar y/o calcular los requerimientos de resistencia uno debe conocer las cargas y ésta es quizás la parte más incierta de todos los análisis [2]. Los cargamentos se pueden dividir en dos partes: cargas globales y cargas locales.

Las cargas globales afectan a la embarcación en su totalidad, por ejemplo, cuando el yate velero se propulsa por su motor, es evidente que las cargas de las olas que pasan a través de la embarcación la someterán globalmente; por otro lado, si la embarcación navega propulsada por su velas sobre un curso sin olas, es obvio que las cargas de aparejo demandaran resistencia en toda la embarcación; en el curso de navegación de una embarcación existe un efecto combinado de ambos tipos de cargas, así, especial consideración se deberá tener al calcular el escantillonado. El cálculo estructural debido a estas cargas globales puede calcularse utilizando la teoría elemental de vigas.

Las cargas locales se pueden dividir en cargas de tres tipos, las cargas hidrostáticas, las cargas hidrodinámicas y las cargas producidas por equipos y accesorios de la embarcación, por ejemplo, chainplate, quilla, timón, winches, etc.

2.2 Cargas Globales en el Yate Velero UNI.

Un tipo principal de cargas globales, referente a embarcaciones y a yates grandes, es el momento flector en las condiciones de arrufo y quebranto: el quebranto se da cuando la cresta de la ola está en el centro y el arrufo cuando el seno de la ola está en el centro con las crestas en la proa y la popa (ver Fig. 2.1). Los cálculos de quebranto/arrufo no se realizan normalmente en los yates de esloras debajo de aproximadamente 30m (Fig.2.1). La embarcación Insignia de la UNI es un yate velero, esto quiere decir que tiene comportamiento como una embarcación a motor (yate) y como un velero propiamente dicho; es evidente que en el libre navegar de un yate velero no solo se soportan las cargas de aparejo debido a los vientos, sino también las cargas de oleaje debido al mar.

2.2.1 Cargas de oleaje y cargas de arboladura.

Para poder tener una idea más clara de la influencia de cada carga y de los requerimientos de resistencia que éstos producen, se dividió el estudio en dos partes, en la primera parte se calculó los requerimientos de resistencia debido al mar (analizando nuestro objeto de estudio como si fuese un yate) y en la segunda parte se calculó los requerimiento de resistencia debido a las cargas de aparejos (arboladura de un velero).

2.2.1.1 Cargas de oleaje.

La ISO N° 12215 [24] y las reglas para la construcción y clasificación de yates de competencia en la mar ABS [5], cubren la estandarización de embarcaciones de hasta 24 m y no requieren los cálculos de momento de flexión ni resistencia de la viga-casco, pero las reglas ABS para los yates de placer a motor estipula un mínimo módulo de sección (MS_{ola}) en el centro de la viga-casco, al cuidado de las olas. Este mínimo módulo de sección, representado en la ecuación (2.1), varía en función de la eslora, la manga y el coeficiente de bloque. La ecuación, propuesta por la ABS, es válida para los yates menores que 45 m, construido en fibra de vidrio y con velocidades menores de 25 nudos. La manga (B) de la embarcación no debe ser mayor de 2 veces el puntal de la embarcación (D_c). Los parámetros de la ecuación (2.1) se muestran en la Tabla 1.1, según las reglas ABS, el coeficiente de bloque de la embarcación, C_b , debe tener valores típicos que están en el intervalo de 0.35 a 0.42. La mínima resistencia a la rotura, en tensión o compresión, es σ_u (un valor típico es 150 N/mm^2 [2], el valor que se utilizó en el cálculo del escantillonado se definió en el capítulo 4, ver Tabla 4.8).

$$SM_{ola} = 0.01 L^2 B (12.7 - 0.14L) (C_b + 0.7) 80 \frac{400}{\sigma_u} \quad (2.1)$$

Donde :

$$L = \left(\frac{L_{OA} + L_{WL}}{2} \right), \quad B = B_{MAX}, \quad C_b \in [0.35; 0.42], \quad \sigma_u \in \left[115 \frac{N}{mm^2}, 150 \frac{N}{mm^2} \right]$$

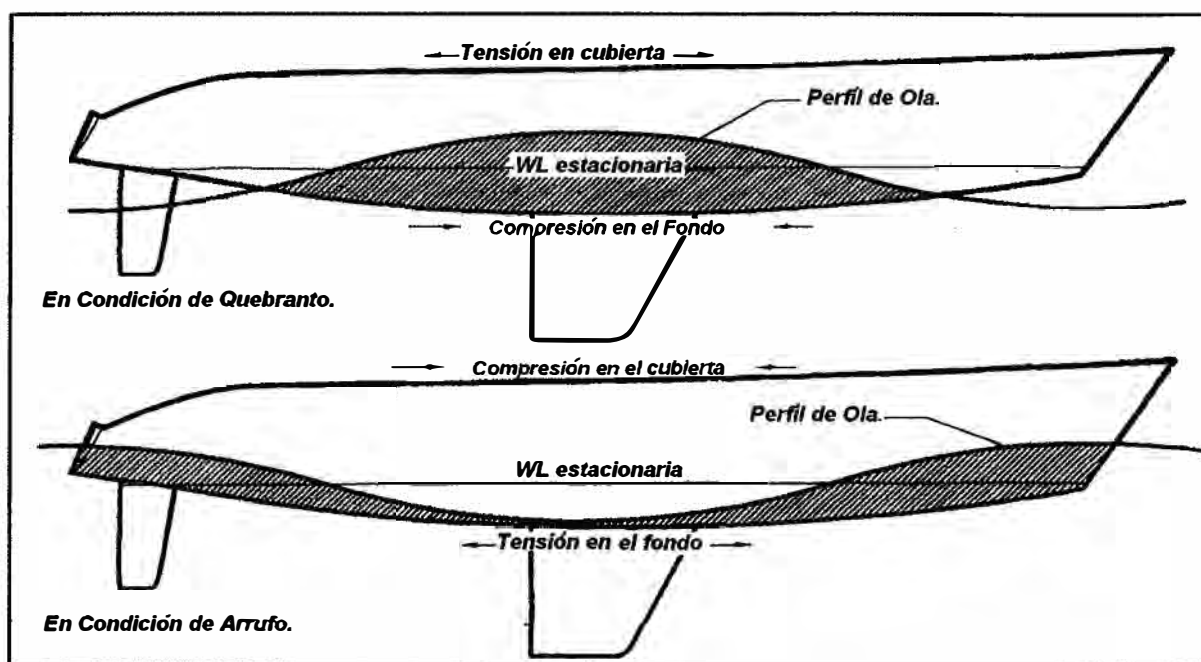


Fig.2.1 Condiciones de arrufo y quebranto de la viga-casco.

En vista de que el Yate Velero UNI tiene un coeficiente de bloque de 0.365, se procedió con los cálculos. Los resultados indican que se requiere un mínimo módulo de sección en el caso de 21780 cm^3 , al cuidado de las cargas de oleaje.

2.2.1.2 Cargas de arboladura.

Otros factores que producen deformaciones, por consiguiente, requerimientos adicionales en el casco, son las cargas de los aparejos en embarcaciones a vela. Las cargas vienen de la tensión de los obenques al barlovento (Fig. 2.2.) y de la tensión en los stays de proa y popa (Fig.2.3.). El primero se produce directamente por el momento de adrizamiento y el segundo cuando la embarcación tiene la necesidad de realizar avance recto para conseguir el mejor funcionamiento de las velas.

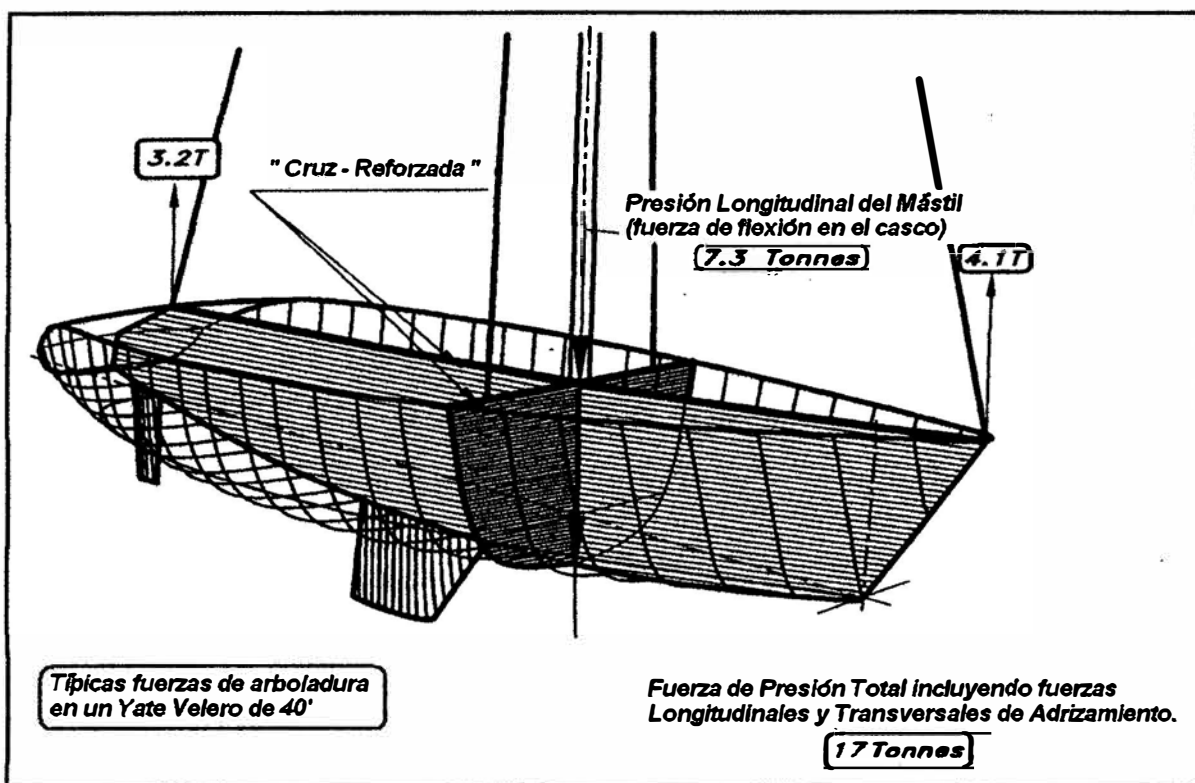


Fig.2.2. Fuerzas Longitudinales del Aparejo [2].

2.2.2 Influencia de las cargas globales sobre el casco.

Sobre un yate a vela normalmente lastrado, la presión acumulada al pie del mástil, que vienen de los stays, obenques y de la tensión de driza puede alcanzar un valor del doble del desplazamiento del barco (ver Fig. 2.2). Los cargamentos de los obenques son de la misma magnitud del desplazamiento, las cargas de driza son aproximadamente el 15% del desplazamiento y los cargamentos de los stays son del 85% del desplazamiento. Así en un análisis de flexión longitudinal la tensión a considerar, usada por la buena práctica de la ingeniería [4] (incluso estipulada en la reglas de escantillonado de la ABS [5]), es aproximadamente el 85%-90% del desplazamiento.

2.3 Cargas locales.

Las cargas locales, como se mencionó anteriormente, se pueden dividir en cargas hidrostáticas, hidrodinámicas y cargas puntuales producidas por chainplates, quilla, timón, winches, barraganetes, etc. La Fig. 2.3 muestra la carga puntual producida por el peso de la orza sobre la quilla y finalmente sobre la unión quilla-casco y la Fig. 2.4 muestra la carga local externa producida en una varada o encalladura.

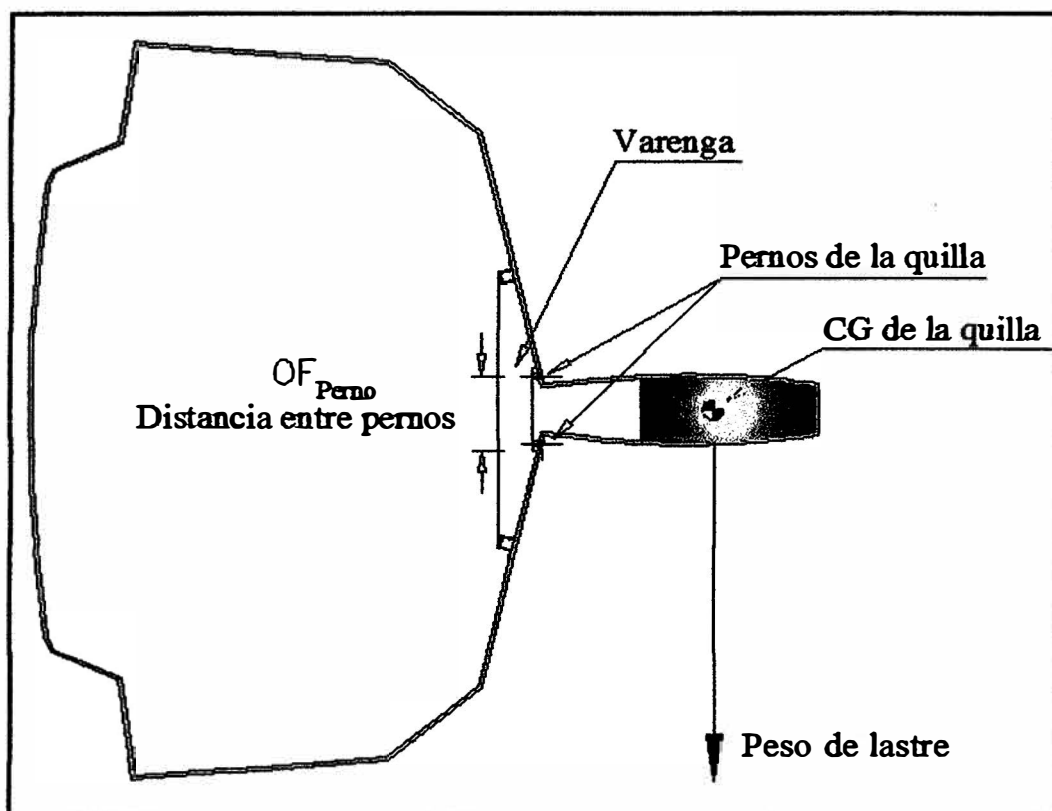


Fig. 2.3. Carga inducida en la quilla por las orza [4]

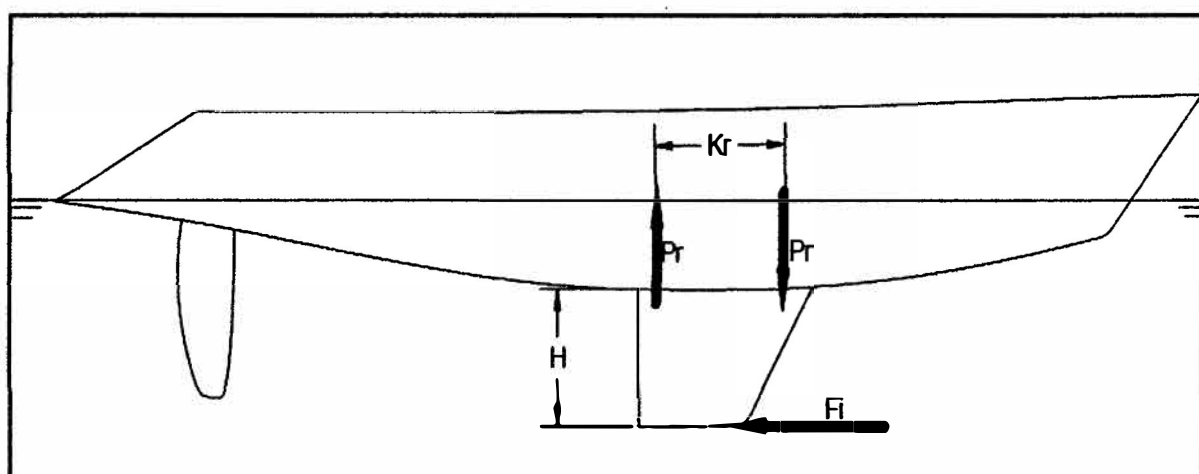


Fig. 2.4. Carga local externa "F1" a causa de una encalladura o varada [4].

Es evidente que, si no se consideran condiciones críticas de cargas locales como las que se muestran en las Figs. 2.3 y 2.4, se subestimaría el escantillonado del casco, quilla y accesorios de empalme quilla-casco. Por ello, teniendo en cuenta las cargas locales que producen estas condiciones críticas, se realizó un análisis más profundo con la finalidad de cubrir los requerimientos de resistencia a toda

prueba, dicho análisis se adjuntó al capítulo que corresponde al cálculo de cargas de diseño y escantillonado del Yate Velero UNI (Capítulo 5).

2.3.1 Cargas Hidrostáticas.

Para establecer una carga de diseño en Ingeniería Naval, normalmente se comienza por analizar las cargas hidrostáticas. El caso más simple es cuando la embarcación está en reposo y en posición vertical en aguas tranquilas. Entonces la altura hidrostática para el cálculo de la presión es, simplemente, la altura del cuerpo sumergido. Ésta es la dimensión T_c (Tabla 1.1). Para una embarcación navegando en un tren de olas no es exagerado asumir que la cresta pueda alcanzar la línea de arrufo, y así que la presión estática se convierta en la medida de D_c , ver Fig. 2.5. A.

Cuando el curso es escorado en una condición en que prácticamente el pie de la baranda se hunde, la altura sumergida para el cálculo de la presión es aproximadamente la mitad del puntal D_c , ver Fig. 2.5. B. En la determinación de la presión hidrostática la ISO utiliza $3T_c$ (T_c en posición vertical), que en una embarcación normal excede a D_c , así hay un factor de seguridad de aproximadamente 3 constituidos en la presión hidrostática, como se puede ver en la ecuación (5.15). Este último fue de mucha importancia en los cálculos, pues

permitió entender los parámetros y factores de seguridad que se usan en las cargas de diseño para el cálculo del escantillado, ver Capítulo 5.

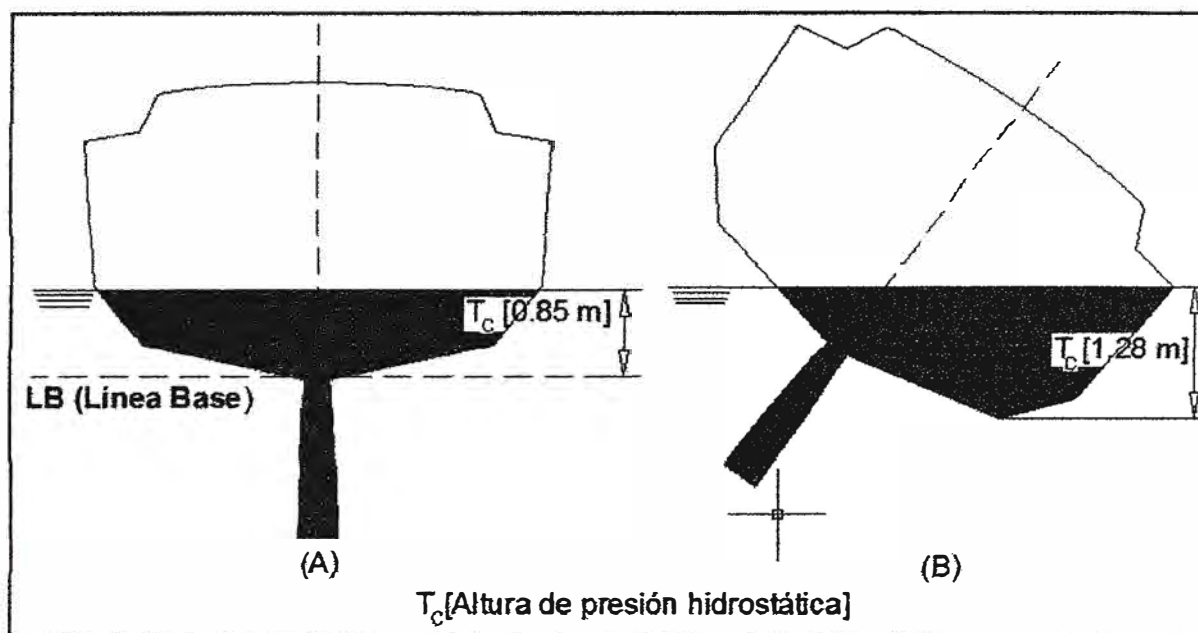


Fig. 2.5. Presiones Hidrostáticas [2,4].

2.3.2 Cargas Hidrodinámicas.

Las reglas ISO N° 12215 [24] considera la velocidad como función absoluta de la eslora de flotación en yates veleros, esto significa que la ISO asume un cociente “velocidad/eslora de flotación” constante. El cargamento adicional, producido por este cociente, se agrega a la presión hidrostática junto con una altura constante de presión para llegar a una presión básica de fondo, $P_{bm \text{ base}}$, como se muestra en la ecuación (5.15).

2.3.3 Influencia de las cargas locales sobre el casco.

Una embarcación moviéndose en la mar está sujeta a por lo menos un factor de carga importante, como el pantocazo. Varias pruebas y medidas se han hecho para determinar estas cargas, especialmente en embarcaciones de planeo a motor, donde están los más severos efectos de pantocazo. Uno de los mejores métodos reconocidos que referencia a las cargas de pantocazo fue realizado por Heller, S.R. y Jasper, N.H. [18,19], y este método, usado por las normas de la ISO [24] para embarcaciones a motor y embarcaciones rápidas a vela, da un buen ajuste para embarcaciones de alta velocidad. La ecuación (5.6), descrita en el capítulo 5, da la presión de fondo $P_{bm \text{ base}}$. Como se puede ver, la ecuación está en función de un término que incluye al desplazamiento dividido por la eslora y la manga, es decir una presión hidrostática. A esta presión hidrostática entonces se agrega un factor dinámico de carga, n_{cg} . Este factor, representado en la ecuación (5.7), depende de la eslora, manga, astilla muerta, categoría de diseño, velocidad y desplazamiento de la embarcación.

Para embarcaciones a vela la aproximación es levemente diferente. Comenzando con la altura de presión de diseño previamente conseguida, se da un “factor-pantocazo” modificador dependiendo del fondo de la embarcación donde estamos haciendo nuestros cálculos. Los yates a motor también se sujetan al

“factor-pantocazo longitudinal” pero aquí éste se incorpora en la fórmula original de la presión (véase el Fig.2.6).

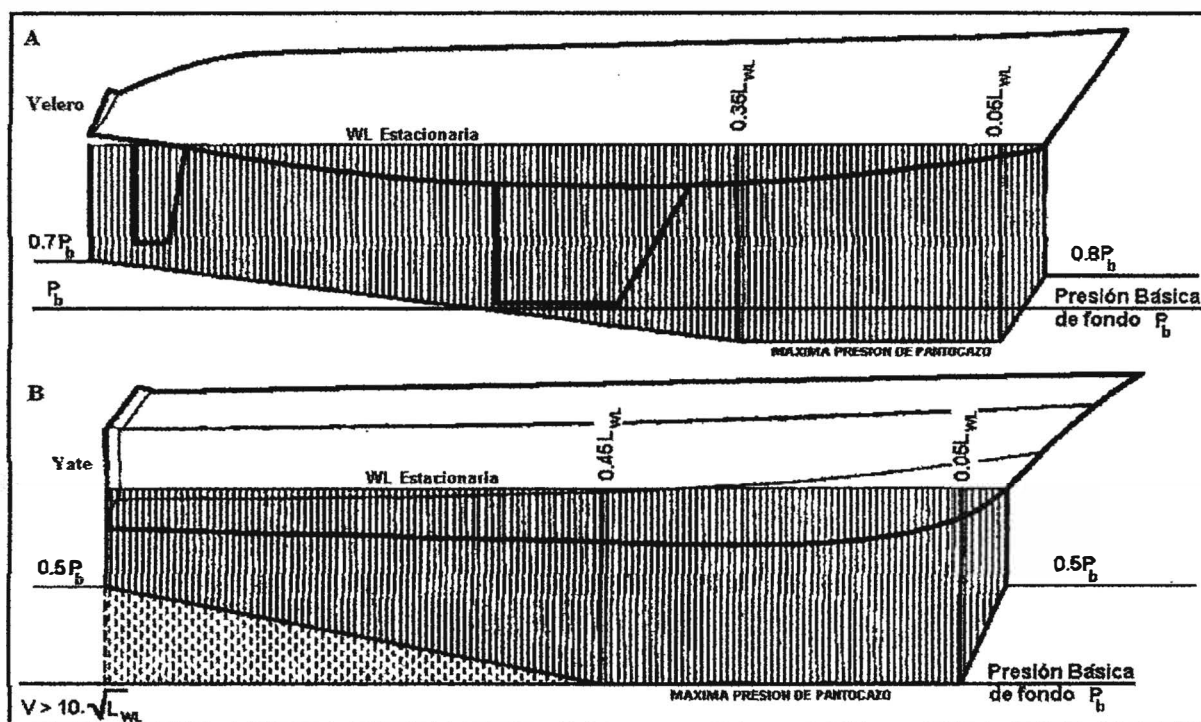


Fig.2.6. Cargas hidrodinámicas longitudinales [5].

El trabajo de Heller, S.R. y Jasper, N.H. [18,19] permite la distribución de la presión a lo largo de la eslora de la embarcación, en esta distribución se puede observar que el área principal de pantocazo está en la parte delantera de embarcación, ver Fig.2.6. Sin embargo, por precaución, en las embarcaciones pequeñas y rápidas donde en un mar fuerte la embarcación entera podría quedar en el aire y aterrizar en la parte más a popa del fondo, es conveniente dejar el área de alta presión ampliada hasta la zona del espejo de popa, ver Fig.2.6. B.

2.3.4 Estudios experimentales de varadas y encalladuras.

Sobre la embarcación a vela el profesor P. N. Joubert ha calculado las presiones en el fondo para seis yates a vela que han sido dañados por las fuerzas del mar pero han sobrevivido para ser analizados (Fig. 2.7). Las embarcaciones fueron [2]:

1. Odin, un yate de acero 39 pies de eslora, colapsaron las planchas de fondo en una travesía de mal tiempo (velocidad del viento 25 m/s). El área deformada fue en la parte delantera del mástil sobre el costado entre la quilla y la línea de agua.
2. Pacha, un yate de aluminio de 54 pies de eslora, colapsó una gran parte del fondo en un área que va desde la roda hasta la sección del mástil y desde la quilla hasta la línea de agua.
3. Boomerang VII, un yate de PVC (sándwich construcción) de 42 pies de eslora, fue deslaminado en un área que va desde la roda hasta la sesión media y desde la parte superior de la quilla hasta una cierta distancia del costado superior.
4. Destiny II, una embarcación de madera enchapada de 42 pies de eslora, chocó transversal en su fondo, donde se ubicaba un mamparo estructural.
5. Magic Pudding, un yate de madera moldeado en frío, se rompió de la misma manera como la embarcación 4.

6. Maery Blair, un yate de aluminio de 41 pies de eslora, fue dañado de la misma manera como el yate 2.

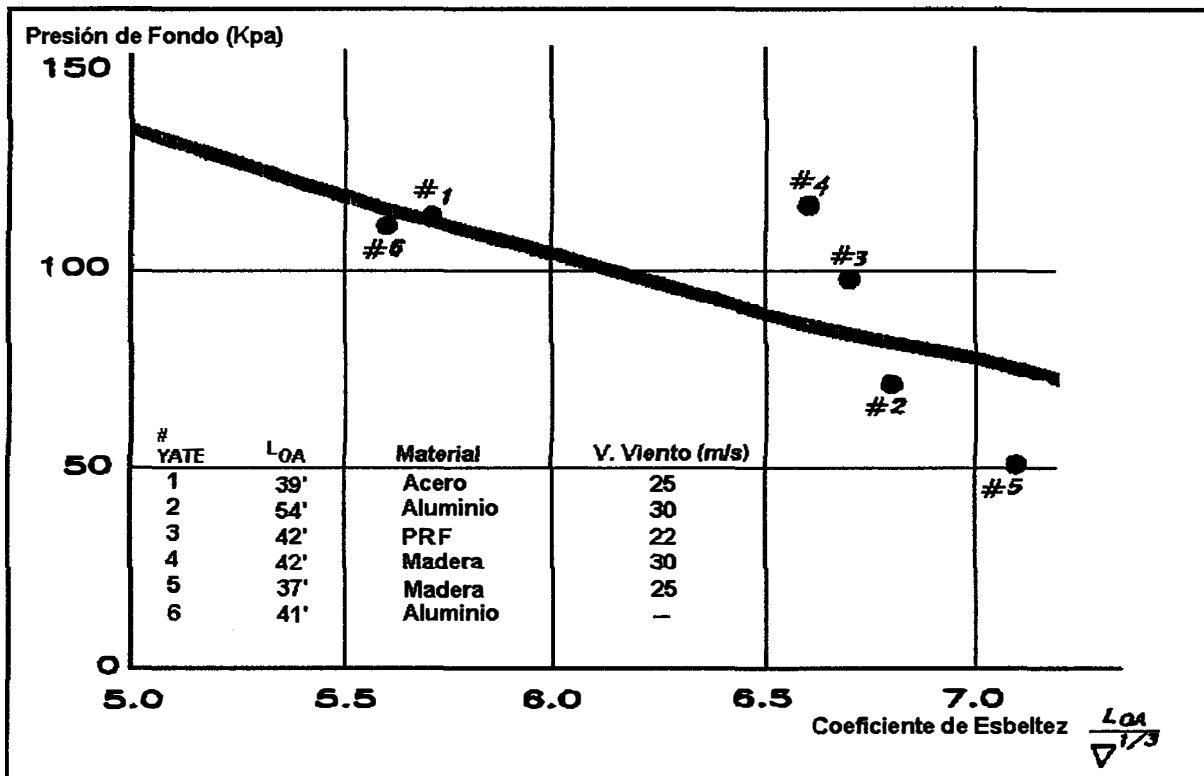


Fig.2.7. Presiones de falla calculadas en yates siniestrados, a causa de las cargas de pantocazos. (P. N. Joubert).

Todas estas deformaciones, delaminaciones y roturas se desarrollaron cuando las embarcaciones navegaban en viento. La causa de las fallas fueron las fuerzas de pantocazo, que son el producto de la caída libre de los yates desde una cresta hacia un seno de ola (una caída de aproximadamente 3 m).

Las cargas de presión en los cascos de yates han sido calculadas “en un sentido inverso” conociendo el tipo de construcción de cada embarcación. La Fig.2.7 muestra el resultado de la presión básica de fondo en función del cociente de esbeltez ($L_{OA}/(\text{Desplazamiento})^{1/3}$), de los cinco yates desplomados estudiados por el profesor P. N. Joubert. En nuestro caso, el Yate Velero UNI con un coeficiente de esbeltez de 5.7 tiene una presión básica de fondo de aproximadamente **105 kPa**, al cuidado de las cargas locales y globales de fondo (ver Capítulo 5); con aproximadamente el mismo coeficiente de esbeltez el yate Odin soportó una presión básica de fondo de aproximadamente **110 kPa** antes de desplomarse (Ver Fig. 2.7). Así, comparativamente, cálculos realizados según las reglas ISO N° 12215-5 [24] y estudios teóricos-estadísticos del profesor P. N. Joubert dan coherencia al desarrollo del estudio.

2.3.5 Distribución transversal de carga.

Hay una diferencia entre el yate y el yate velero, en lo que respecta a la distribución transversal de carga. Una embarcación a vela, que en algunos casos tiene sus costados sumergidos totalmente, se carga más en las planchas laterales o de costado comparado con una embarcación planeadora que está supeditada más a los pantocazos en su fondo.

En una embarcación a vela la presión de costado disminuye, desde la presión total del fondo en la línea de flotación a cero alrededor de 1.5 la altura del francobordo (Ver Fig. 2.8). En una embarcación a motor la presión de costado según las reglas ISO N° 12215 [24] es el 20% de la presión del fondo, más una altura de presión estática mínima correspondiente a la mitad del puntal del casco ($0.5 D_C$).

Las presiones del diseño de la cubierta y superestructura son función de la eslora de la embarcación y de una constante. Daremos más detalles, en lo que concierne a presiones de diseño, al realizar el cálculo del escantillonado del Yate Velero UNI (ver Capítulo 5). La Fig.2.8 muestra las distribuciones transversales típicas de carga para yates veleros y yates a motor.

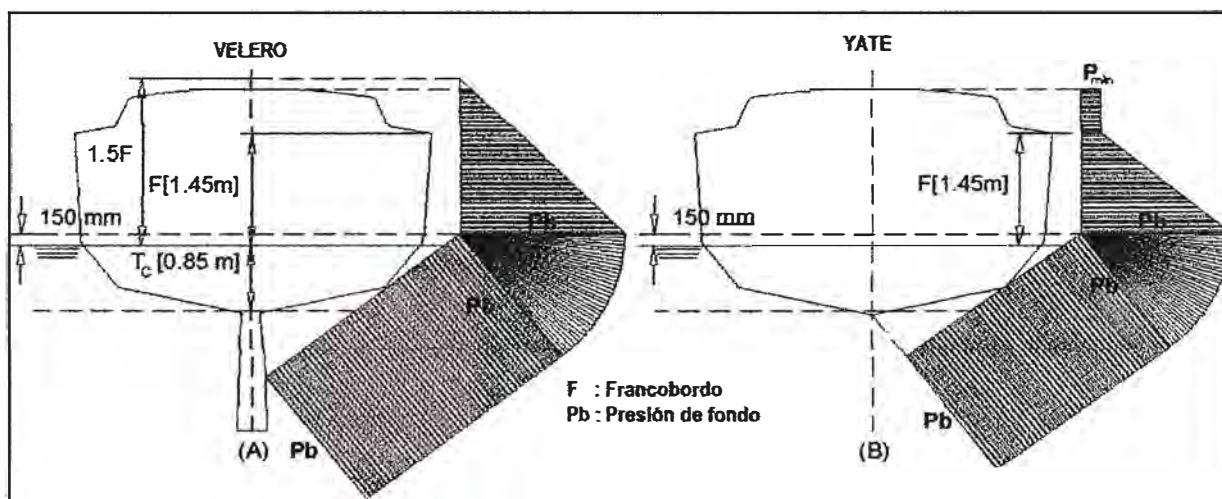


Fig.2.8. Típica Distribución transversal de cargas [2,4].

CAPÍTULO 3

DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZOS DEL YATE VELERO UNI.

3.1 Introducción.

Para calcular la resistencia estructural de una embarcación se debe conocer cómo están dispuestas sus estructuras internas, como por ejemplo: dónde están los mamparos, cual es el disposición de las cuadernas, longitudinales, refuerzos de fondo, cuadernas y cualquier otro elemento estructural interno. Es imposible asegurar, mediante el cálculo, la resistencia estructural sin conocer dichos detalles. Preferentemente, se debe calcular cada refuerzo y luego observarlos como un conjunto y descubrir la mejor forma para construir el casco completo [14]. Evidentemente, algunas áreas son más recargadas que otras, por eso es

importante hacer un reconocimiento de la distribución de cargas típicas en la embarcación que se desea construir y elegir el sistema de refuerzos adecuados.

3.2 Sistema de refuerzos.

En términos generales, existe una gran variedad de maneras de reforzar una embarcación, según sea su tamaño, pero es claro que su estructura fundamental obedece a tres tipos de sistemas de refuerzo: sistema de refuerzo transversal, sistema de refuerzo longitudinal y sistema de refuerzo mixto [23].

3.1.1. Sistema de refuerzo transversal.

Las embarcaciones de madera aún se siguen construyendo utilizando este sistema de construcción, porque para conseguir la estanqueidad de las costuras del forro exterior, mediante el calafateo, necesitan que el esqueleto transversal esté estrechamente unido por los tablones de forro. De igual manera, el sistema de refuerzos transversal era idóneo para soportar los grandes esfuerzos de “pandeo” generadas por las cargas globales de arboladura de las embarcaciones.

3.1.2. Sistema de refuerzo longitudinal.

Con las embarcaciones y buques de acero, disminuyeron los esfuerzos por pandeo y su importancia. Con el aumento de esloras, predominan los esfuerzos longitudinales, todo esto unido a otra serie de circunstancias hace que la estructura básica vaya de acuerdo con el esfuerzo principal, que es longitudinal por lo predominancia de la eslora, manteniendo una cierta resistencia transversal.

3.1.3. Sistemas de refuerzo mixto.

Al garantizar la resistencia estructural de una embarcación, por uno de los sistemas de refuerzos anteriores, también se debe tener en cuenta los propósitos de compartimentaje y comercio (estiba) de la nave [23]; estos influyen fundamentalmente y de manera decisiva en la disposición de los refuerzos sin tener otra opción que usar un sistema de refuerzos mixto

En Yate Velero UNI, siendo fundamental la influencia de los aparejos en la resistencia longitudinal (en la sección crítica) y los pantocazos en la resistencia transversal (entre el mamparo de pique de proa y la sección crítica), lo ideal es usar un sistema de construcción mixto.

3.3 Consideraciones previas antes de realizar la disposición de los refuerzos del Yate Velero UNI.

El estudio de deformaciones hechas por la Royal Institute of Technology (KTH) en Estocolmo[2], sobre diferentes métodos de reforzamientos de un casco (Fig.3.1), demuestra que es muy importante tener suficientemente reforzado la zona de proa. El casco estudiado es el mismo en todos los casos, con diferente número de cuadernas en la zona de proa. Los cascos son reforzados básicamente con un espaciamiento interior de cuadernas. El casco C tiene espaciamientos de cuadernas solamente, mientras que el casco de D tiene dos palmejares adicionales por lado. Además de esto el casco E tiene una cuaderna ubicado a popa y cerca del mástil, y el casco F tiene tres cuadernas en la parte de proa.

Las áreas sombreadas en la Fig.3.1 representan la deformación del casco cuando están sujetadas a cargas de pantocazo. Como se puede ver, la diferencia entre los cascos reforzados con un espacio de cuadernas y el que adicionalmente tiene los palmejares no es grande. La razón de esto es que careciendo de refuerzos transversales los palmejares tienen una luz demasiado larga para conservar con eficacia las deflexiones en un nivel razonable.

Introduciendo una cuaderna en la parte de proa, las deformaciones disminuyen drásticamente, y aumentando el número a tres el buque comienza a parecer una embarcación (casco F en el Fig.3.1). Esta capacidad de resistir presiones de pantocazos por el casco F muestra aproximadamente un mismo comportamiento que se obtiene tradicionalmente con un casco con cuadernas reforzadas transversalmente.

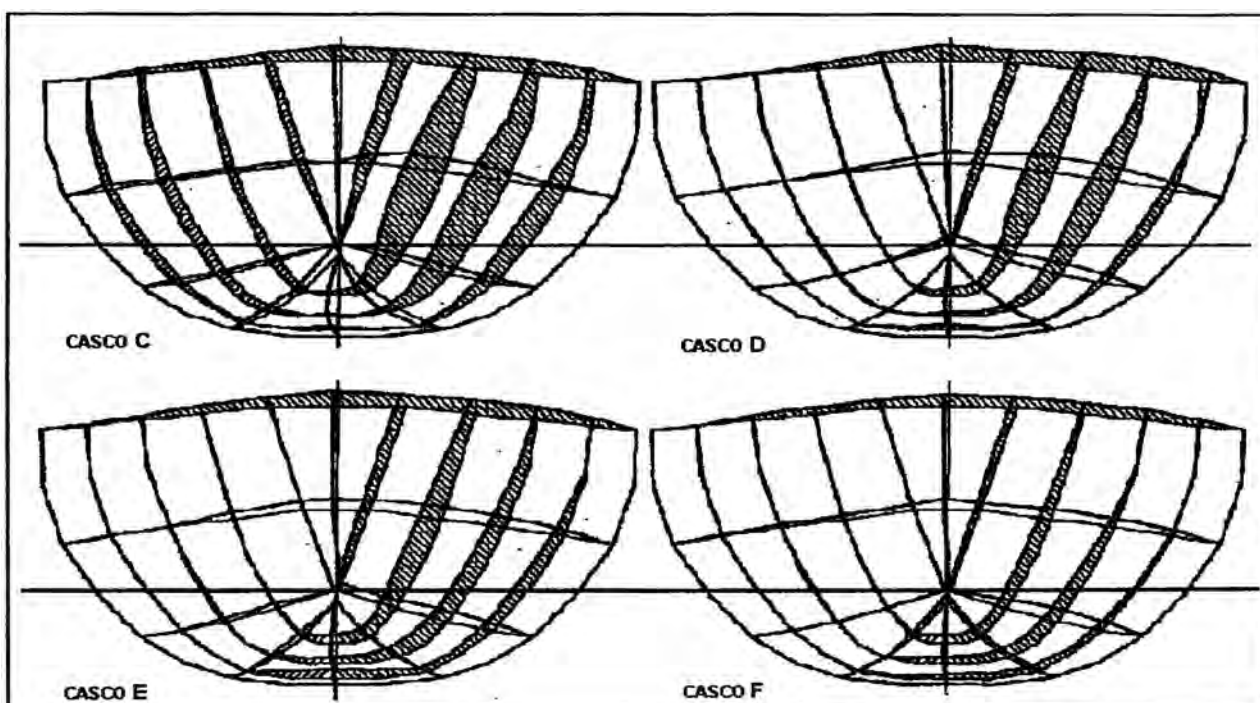


Fig.3.1. Deformaciones debido a pantocazos o cargas de sacudida (Hunyadi & Hedlund)[2].

Con propósito de minimizar costos al construir un casco, el Royal Institute of Technology (KTH) (Fig.2.4.) [2] también modeló 2 tipos diferentes de buques con la finalidad de calcular deformaciones longitudinales debidas a las cargas de aparejo. El buque “A” fue reforzado por cuadernas, espaciadas cada 2 metros,

pero sin ningún refuerzo longitudinal en el fondo, y el buque “B” fue reforzado con cuadernas y por una rejilla resistente (con varengas y refuerzos longitudinales). En ambos casos el casco fue de fibra de vidrio y construidos con laminados tipo sándwich, con una base de PVC de 40 milímetros y capas del cristal de una matriz de vinilo-poliéster. Como se puede ver claramente, no son suficientes las cuadernas para absorber las cargas longitudinales de aparejo, por eso son necesarios refuerzos longitudinales. El ejemplo mostrado fue para un espacio entre cuaderna, un mayor acercamiento, implicará más refuerzo al sistema estructural del casco y cubierta, es decir un tipo monocasco de estructura. Con este acercamiento habría más resistencia en el forro exterior, con menos refuerzos y paneles más grandes. La orientación de la fibra es crucial con el acercamiento a un monocasco, como consecuencia un análisis de magnitud y dirección de las fuerzas implicadas son necesarias. El tamaño de las embarcaciones desempeña obviamente un papel importante. Las embarcaciones pequeñas son casi auto resistentes, como lo mencionamos anteriormente (ver Capítulo 2), mientras que las más grandes necesitan una cierta clase de refuerzos, por lo menos en áreas especialmente cargadas como por ejemplo: alrededor de la quilla, mástil, chainplates, etc.

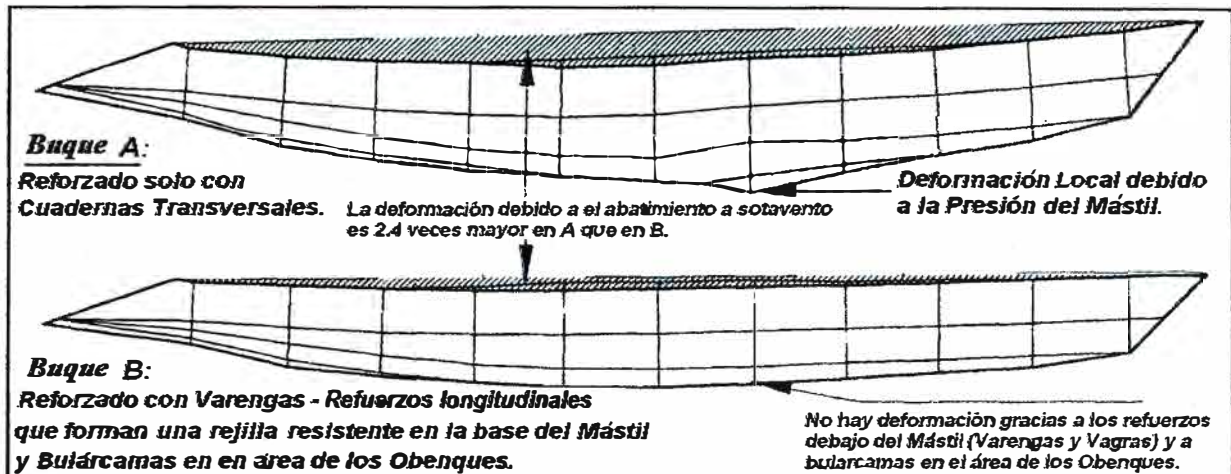


Fig.3.2. Deformaciones longitudinales debido a las cargas del aparejo [2].

Los dos estudios realizados por el Royal Institute of Tecnology (KTH) nos permitieron: salvaguardar la decisión de usar un sistema mixto de refuerzos, tener claro el tipo de refuerzos a usar y conocer las regiones de riesgo en un yate velero. Pero para disponer los refuerzos con más propiedad, aún necesitamos saber como se concentran las cargas globales y locales en un yate velero similar al nuestro.

3.4 Áreas de concentración de cargas globales y locales de un yate velero de similares características al Yate Velero UNI.

Los cargamentos y direcciones de la Fig.3.3 fueron causados por un golpe de viento por el lado de barlovento. Las flechas sombreadas muestran las cargas globales impuestas a la viga-casco por las fuerzas de aparejo. Éstos aumentan

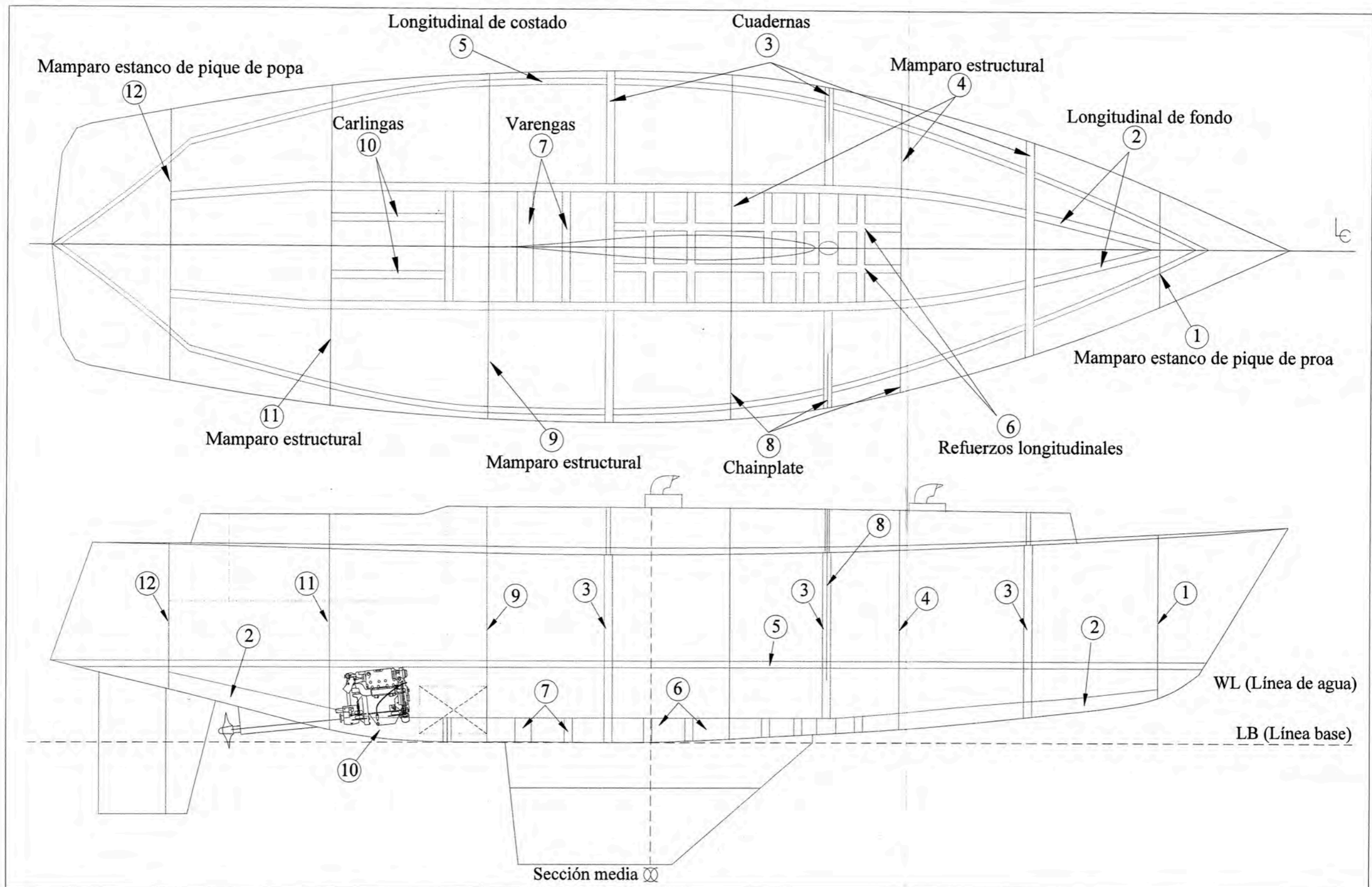
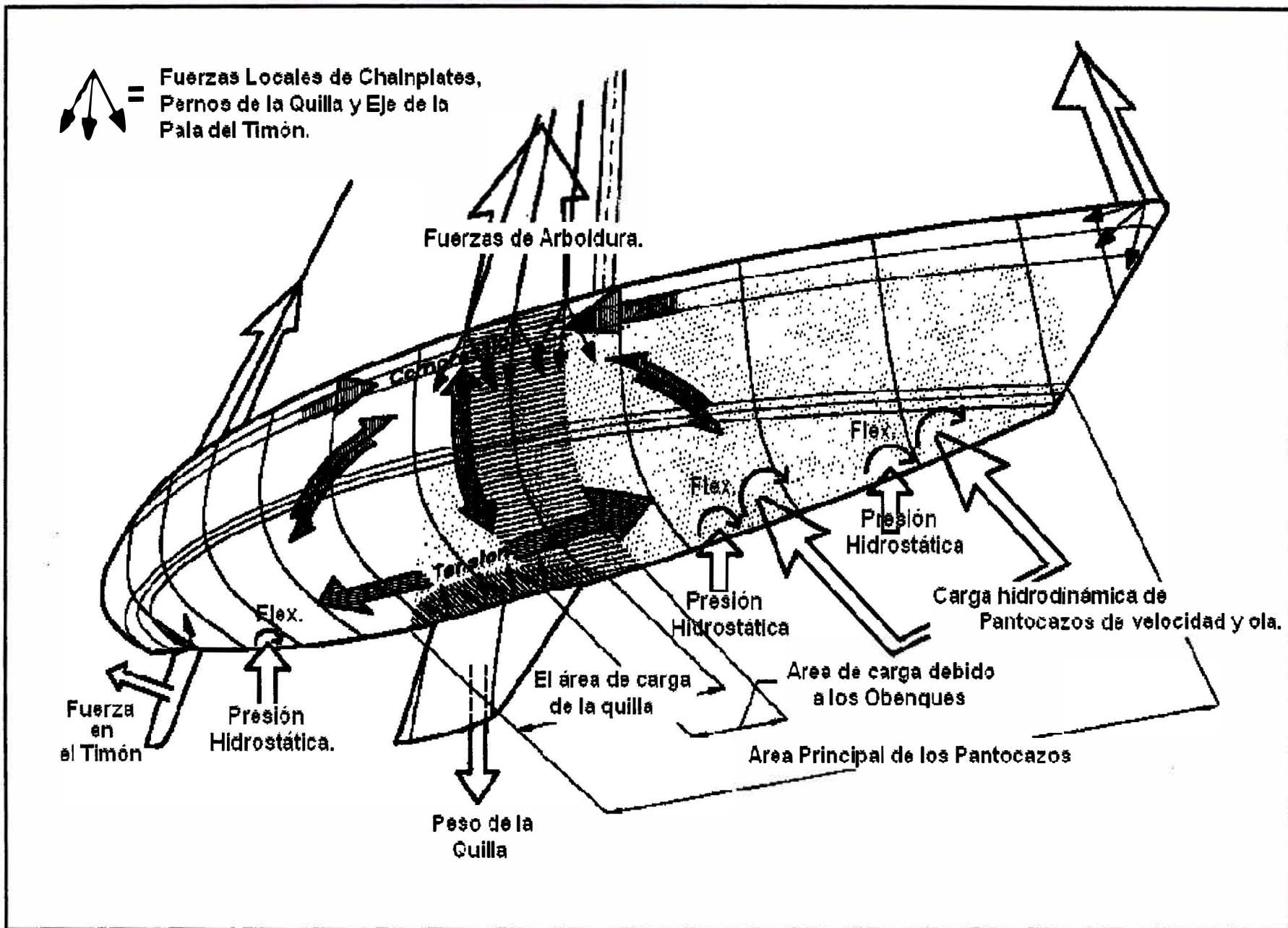


Fig.3.5 Disposición de refuerzos del Yate Velero UNI.

cuando el yate está en la condición de arrufo, que se da al viajar en aguas tranquilas. Como se puede ver, la viga-casco está sujeta a flexión, la misma que genera fuerzas de compresión a lo largo y en el borde de la cubierta, tensión a lo largo del fondo y fuerzas de corte en la parte alta de los costados. Más aún, hay tensión transversal en el área del anillo de refuerzo (zona de refuerzo a causa de los efectos de los obenques). La navegación en los mares accidentados y agitados puede también inducir al casco a una condición de quebranto, eso no significa un cambio del momento de flexión (las fuerzas del aparejo son demasiado grandes, no dejaran que eso suceda), pero habrá compresión y tensión que someterá al casco al riesgo inherente de fatiga en un largo funcionamiento [2].

Adicionalmente, se tienen las cargas locales como la presión hidrostática y la presión hidrodinámica que intentan pandear los paneles y doblar los refuerzos. Estas presiones son las más importantes al calcular el escantillonado de los paneles y refuerzos. Según lo mostrado previamente, la resistencia global de la embarcación está garantizada si ésta se dimensiona para soportar cargas hidrostáticas e hidrodinámicas, por lo menos si no es una embarcación de tipo “extremo”. Otras cargas locales que se deben tener en consideración son las que provienen de las uniones entre accesorios de los obenques y stays, los pernos de la quilla, el eje del timón, los winches y otras estructuras de la cubierta.

Fig.3.3 Fuerzas sobre un Yate Velero [2].



La Fig. 3.4 muestra una embarcación, dividida en “áreas de interés” (con ubicación e intensidad de cargas), similar al Yate Velero UNI. Un **análisis cualitativo** de los resultados de intensidad y ubicación de las diferentes áreas cargadas, será de gran utilidad en la disposición, dimensionamiento y construcción de los refuerzos de nuestro yate velero; es así que en los subsiguientes párrafos describiremos cada área de interés a detalle (las numeraciones de los siguientes párrafos obedecen a las enumeraciones mostradas en la Fig. 3.4):

1. Cargas locales de los accesorios, es decir, chainplate, accesorios de los stays, cornamusas, winches, bitas, etc. Para disminuir las cargas puntuales en el laminado, se deberán instalar pernos con arandelas grandes y en caso de un laminado sándwich, el núcleo será substituido por madera contrachapada, un núcleo de alta densidad o un laminado simple. La última opción, que podría parecer la solución más antigua, realmente tiene varias ventajas. Es recomendable, sin embargo, aumentar el espesor del laminado y no dejarlo solo como un laminado combinado interior y exterior. Un incremento de aproximadamente 40 % no estaría fuera de orden [2].

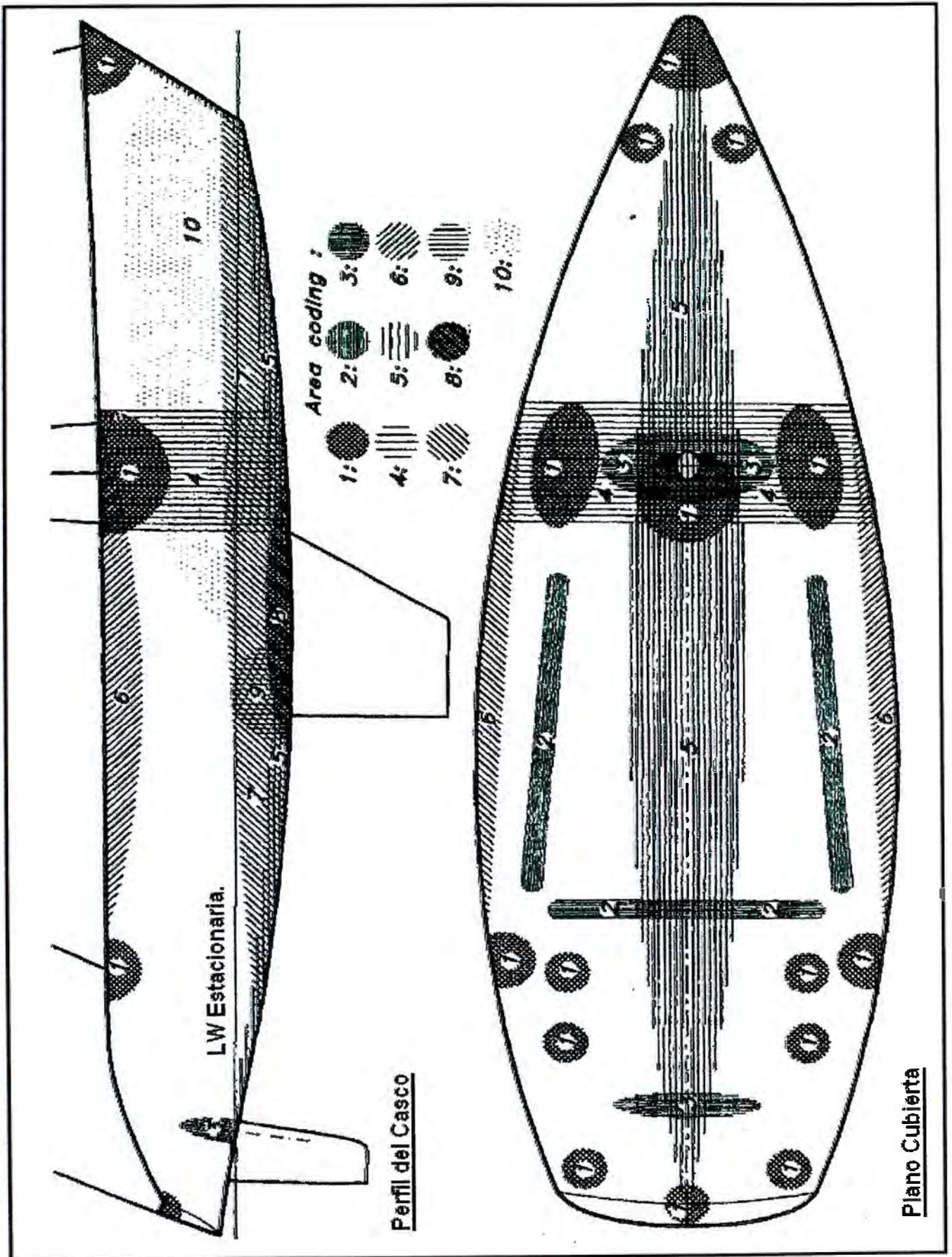


Fig.3.4 Áreas cargadas de un yate velero similar al Yate Velero UNI [2].

2. Básicamente los mismos comentarios que en el área 1 son válidos, excepto porque estas áreas (2) involucran capas direccionadas; con una distribución de carga más dispersa, la carga sobre los pernos locales son significativamente menores. Un incremento en espesor de laminado de 25% sería suficiente [2].

3. Estas áreas son cargadas por las fuerzas transversales del mástil y del timón. El laminado debe ser capaz de soportar la presión del borde, por lo que es necesario usar un núcleo duro o un laminado simple bien reforzado.

4. Éste es un área fuertemente cargada por las fuerzas de arboladura (obenques y mástil). La sección entera en esta área debe ser excepcionalmente rígida y resistente a las fuerzas torsionales, para no colapsar transversalmente. Para alcanzar esto, el número de cuadernas debe ser el adecuado, tiene que instalarse un mamparo estructural o una bulárcama lo suficientemente resistente para soportar y distribuir las cargas.

5. Las fuerzas longitudinales de arboladura y de las olas significan que la cubierta podría necesitar ser reforzada con esloras para soportar la compresión. Las exigencias en el fondo (cargas de quilla y pantocazos) la hacen suficiente fuerte para absorber las fuerzas de flexión globales en la mayoría de los casos, pero hay todavía el riesgo de que la cubierta no sea capaz de resistir las fuerzas resultantes de compresión si el módulo de sección de la viga del buque es bajo o el aparejo es excepcionalmente grande. En nuestro caso el módulo de sección supera ampliamente lo requerido, ver Capítulo 2.

6. Ésta es un área muy tensa debido a las cargas pulsantes, que son producto del navegar del yate velero sobre las olas. Podría ser necesaria una consideración especial respecto a las características de compresión/tensión del laminado, pero es más probable que la conexión débil sea el empalme casco cubierta, que debe ser lo suficientemente fuerte para no moverse o pandearse y así evitar filtración. Cuando la unión no es cubierta con fibra de vidrio, sino sólo fija con pernos y un compuesto colchado, es recomendable usar una platina de aluminio sobre el borde de la cubierta, lo cual rigidizará la sección del borde a fin de que no se abra bajo la carga. Otra manera de obtener el mismo efecto es diseñar el borde de la cubierta como tapa-sombrero.

7. Los paneles de fondo en esta área, es decir en la proa, la sección media y gradualmente a proa de la popa soportan una de las cargas más grandes, con respecto a las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas. Esto pone una demanda en los paneles a ser más fuertes y rígidos que en el resto del fondo.

8. Es un área que es cargada a causa de la quilla. Las demandas en esta área requieren que el laminado deba ser lo suficientemente grueso para soportar presiones locales altas de los pernos de la quilla. Transversalmente esta área debe ser lo bastante rígida tal que no permita que la quilla actúe como un péndulo al golpear en un mar grueso (con oleaje).

9. El área en la parte de popa de la quilla es la más vulnerable a la varada o encallamiento. La fuerza en varada suele extenderse por un área más grande que el empalme mismo entre la quilla/casco.

10. Es el área principal donde los pantocazos causan efecto y ponen demandas muy grandes de resistencia y rigidez en los paneles. Las

fuerzas de las olas son mucho más grandes que al navegar en aguas tranquilas (ver también Fig. 3.4).

3.5 Disposición de Refuerzos del Yate Velero UNI.

La Fig.3.5 muestra la disposición de refuerzos del Yate Velero UNI, el cual fue reforzado según las recomendaciones descritas en este capítulo. Básicamente, el yate velero fue reforzado por un sistema de refuerzos mixto, con longitudinales, cuadernas y mamparos estancos, etc., todos al cuidado de las cargas globales y locales, ver capítulo 2. Según la Fig. 3.5 y empezando de proa, tenemos lo siguiente:

1. Un mamparo estructural estanco de colisión, quien consolida con eficacia el área de pantocazos. La construcción de este mamparo es de tipo sándwich.
2. Longitudinales de fondo, del mamparo estanco de colisión al mamparo estanco más a popa. Las varengas están conectadas con estas longitudinales en sus extremos.
3. Cuadernas a popa de la sección media, que sirve como punto de apoyo a los longitudinales de fondo y costado, además están al cuidado de las cargas de pantocazos.

4. Mamparo estructural de construcción sándwich, para consolidar la rigidez torsional de la viga-casco y ser lo suficientemente rígido para resistir las fuerzas transversales del aparejo.
5. Longitudinales de costado, refuerzan la embarcación a lo largo de su eslora. Sus puntos de soporte son los mamparos estancos estructurales.
6. Refuerzos longitudinales “carlingas del mástil” entre el mamparo 3 y la cuaderna más a popa, para distribuir la carga del mástil longitudinalmente sobre un número determinado de varengas.
7. Un sistema de refuerzos de fondo (varengas) para distribuir fuerzas del mástil y las cargas trasversales y longitudinales de la quilla, por ejemplo, las producidas por una varada o encalladura.
8. Laminado adicional “chainplate” sobre los mamparos estructurales “4” (ver Fig. 3.5) y la cuaderna más a popa, en el área de los obenques.
9. Mamparo estructural de construcción sándwich, para consolidar la rigidez en popa, además sirve como punto de apoyo para las longitudinales de fondo y costado.

10. Refuerzos longitudinales “carlingas” que actúan como bases del motor y soportan las cargas de tensión y compresión, según sea el peso, número de apoyos y giro del motor.

11. Un mamparo estructural tipo sándwich que contiene al cojinete de empuje del eje propulsor que, junto con la cubierta de motor, comunica la sala de máquinas con las acomodaciones.

12. El mamparo estanco de pique de popa, posee una estructura tipo sándwich. Este mamparo refuerza la popa y evita que se doble o flexione por las fuerzas del timón.

CAPÍTULO 4

INVESTIGACIÓN TEÓRICA DE LOS MATERIALES USADOS EN LA INDUSTRIA NAVAL CON ESPECIAL ÉNFASIS EN PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO (PRF).

4.1 Introducción

El uso de los materiales compuestos ha experimentado un gran auge en los últimos años, principalmente debido a sus características especiales en comparación con otro tipo de materiales. En efecto, sus características son bastante diferentes a los materiales simples isótropos normalmente utilizados con fines estructurales. Esto se debe a su composición a base de una matriz asociada a fibras tenaces que produce un material que supera las cualidades de sus constituyentes homogéneos por separado.

Las propiedades direccionales de los materiales compuestos implican alguna complicación en el proceso de cálculo, pero a la vez una ventaja, ya que se puede orientar la dirección de los refuerzos del PRF con la dirección de la carga y así obtener la optimización de la estructura. También es necesario tener en cuenta esta particularidad para evitar errores y catástrofes en estructuras de compuestos modernos donde se suele hacer un esfuerzo por adaptar la direccionalidad de las propiedades de los materiales a las solicitaciones de la estructura. Por estas razones, a la hora de analizar una estructura de material compuesto, es necesario adaptar los cálculos tradicionales a las particularidades de estos materiales [4].

La construcción de embarcaciones con fibra de vidrio muchas veces exige menos mano de obra, pero demanda destreza y conocimiento en su manufactura [21]. El elevado costo inicial del molde, no obstante, significa que es necesario hacer muchos ejemplares, para que el precio sea bajo [20]. Se realizó el estudio de investigación teórica de materiales compuestos con énfasis en fibra de vidrio, por dos razones fundamentales:

- a) Por ser el **material más usado en la construcción de yates** y yates veleros hoy en día [3,20].
- b) Por ser un **material no suficientemente investigado** ni desarrollado en nuestro medio (no hay data de cálculos de estructuras de naves flotantes).

4.2 Materiales compuestos

El término compuesto agrupa una gama diversa de materiales que va desde el simple adobe (barro reforzado con paja) que se utilizaba en la antigüedad para la construcción, hasta los modernos compuestos de matriz cerámica o metálica reforzados con fibras [4]. La clasificación topológica de los materiales compuestos es la siguiente: compuestos particulados, hojuelados, relleno tipo barra, **fibrosos** y **laminares** [4]. Siendo estos dos últimos los más importantes para nuestros fines.

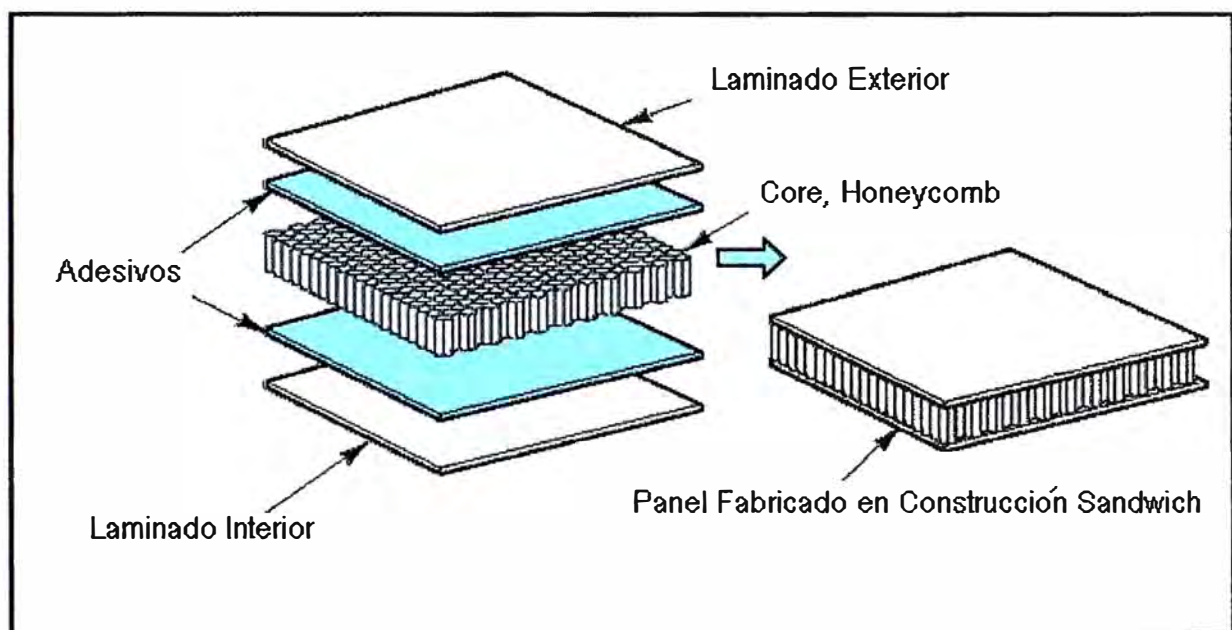


Fig. 4.1. Panel fabricado en construcción sándwich.

Se consideran compuestos fibrosos aquellos formados por una matriz reforzada por un material en forma de fibras, ya sean éstas cortas (discontinuas) o largas (continuas). Estas fibras son en general anisótropas y entre ellas podemos citar las fibras de vidrio, carbono y aramida. Las matrices utilizadas se pueden dividir

en cuatro tipos, matrices poliméricas, cerámicas, metálicas y de carbono. Como ejemplos de estos sistemas de matriz se puede citar resinas como el epoxi, cerámicas como el silicato de calcio-aluminio o metales como el aluminio.

Los compuestos laminares están constituidos por capas superpuestas de materiales iguales o diferentes. De esta forma podemos tener un compuesto laminar constituido por laminas de aluminio reforzado alternadamente con laminas de un compuesto fibroso carbono/carbono. Sin embargo, los casos más comunes de este tipo de compuesto son los de láminas de fibras largas sobre una matriz común.

Centrándose en los compuestos de matrices poliméricas, tendremos compuestos de matrices termoestables y matrices termoplásticos. También se puede encontrar gran cantidad de diferentes tipos de refuerzos, tanto en fibras largas como en fibras cortas.

4.2.1 Matrices poliméricas

Estas matrices se agrupan en termoestables (poliéster, viniléster, epoxi, etc.) y termoplásticos (polieterétercetona, acrilonitrilo-butadieno-estireno, etc.). Las matrices termoestables son irreversibles, a diferencia de las matrices termoplásticos, pero son más fáciles de usar en el proceso de manufactura.

4.2.1.1 Matrices termoestables (Durómeros)

Las matrices termoestables como el poliéster o el epoxi son las más comúnmente aplicadas en todos los campos. En particular en el campo naval son, junto con el viniléster, las más utilizadas.

❖ Resinas de poliéster

Las resinas de poliéster se conocen desde el año 1936 y son las resinas más ampliamente usadas como matrices [8]. Esto es debido a su costo moderado, facilidad de uso y aplicación, y buen comportamiento en el medio marino. Para obtener una resina de poliéster, básicamente y de una forma resumida, se necesita la concurrencia de varios compuestos orgánicos [8]. Dichos compuestos son:

El poliéster ortoftálico es una combinación de anhídrido maleico y ftálico con un glicol (generalmente glicol propileno). Es el más barato y el más usado en la construcción de embarcaciones pequeñas. Tiene una limitada estabilidad térmica y resistencia a la corrosión (ver Tabla 4.1 y Fig. 4.9).

El poliéster isoftálico contiene ácido isoftálico en lugar de anhídrido ftálico. Es más caro y se utiliza en embarcaciones de mayor rendimiento. Tiene mejores propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y al agua (ver Tabla 4.1 y Fig. 4.9).

En el bisfenol poliéster el ácido isoftálico o el anhídrido maleico es sustituido por bisfenol-A. Este poliéster proporciona resistencia química y resistencia al agua muy superior aunque a un precio mucho mayor.

❖ Resina viniléster

El viniléster es una resina de mejor calidad que el poliéster [2] y es químicamente similar al epoxi [4]. Su composición generalmente se basa en bisfenol-A y ácido metacrílico. Su comportamiento es cercano al poliéster [8], pues utiliza estireno

como diluyente reactivo y se solidifica en una reacción de polimerización exotérmica que involucra un catalizador peroxídico. Comparado con el poliéster, el viniléster ofrece mejores propiedades mecánicas a aproximadamente el doble de precio. La contracción durante el curado es mucho menor que en el poliéster lo que facilita la construcción [4]. Al igual que las resinas epoxi, su mejor capacidad de aislamiento del agua produce que en ocasiones se utilice como barrera externa para evitar la aparición de osmosis en compuestos navales [8].

❖ Resina epoxi

Las resinas epoxi (formuladas para la laminación), tienen un alto grado de deformación, que hacen posible la utilización de fibras de alta performance en el casco [2]. Son algunos de los materiales más efectivos en ingeniería, sirviendo como adhesivos, barreras anti-humedad, matrices estructurales, etc. [4].

Las fases del curado son muy parecidas a las del poliéster. El elemento endurecedor no actúa como el catalizador sino que es un ingrediente de la reacción química en la molécula resultante [8].

Las resinas epoxi tienen una absorción muy pobre de agua y una muy buena adherencia lo que las hace especialmente indicadas para el uso en gelcoat y pinturas [8].

En comparación con los poliésteres y vinilésteres, las epoxis presentan propiedades mecánicas mucho más elevadas, así como mayor resistencia química y mayor resistencia al agua. Para conseguir estas cualidades especiales se aplica calor a la materia prima y al proceso de laminado, lo que encarece el producto. En cuanto a la industria naval, la epoxi se utiliza en aplicaciones de alto rendimiento como embarcaciones de competición. Es también la resina que se utiliza casi con exclusividad cuando se trata de refuerzos de carbono [4].

❖ Resinas fenol

Los fenólicos son los más antiguos sistemas de resina. Se fabrican mediante una reacción exotérmica de condensación entre el fenol y el formaldehído en la que se libera agua. Esta reacción es iniciada por la adición de un catalizador ácido. La liberación de vapor de agua durante la reacción causa muchos problemas de agrietamiento y aparición de burbujas. Además la absorción de agua es tres veces superior a la del poliéster isoftálico. Otro problema común suele aparecer por la

presencia de ácido residual en la reacción. Todos estos inconvenientes restringen el uso de los sistemas fenólicos. Sin embargo, el buen comportamiento de esta resina en condiciones de incendio la hace favorable para su uso en mamparos interiores, cubiertas y mobiliario en el caso de estructuras marinas así como revestimientos interiores en la industria aeroespacial [4].

Material	Peso específico	Módulo elástico (GPa)	Ratio Poisson	Tensión admisible (MPa)	Deformación a rotura %	Compresión admisible (MPa)	Temperatura máxima de distorsión (C°)	Costo relativo
Poliéster ortoftálico	1.23	3.2	0.36	65	2	130	65	0.9
Poliéster isoftálico	1.21	3.6	0.36	60	2.5	130	95	1.0
Viniléster	1.12	3.4	-	83	5	120	110	1.8
Epoxi	1.2	3.0	0.37	85	5	130	110	2.3
Fenolito	1.15	3.0	-	50	2	-	120	0.8

Tabla 4.1 Propiedades típicas de resinas termoestables [4].

Material	Peso específico	Módulo elástico (GPa)	Tensión admisible (MPa)	Deformación a rotura %	Temperatura máxima de distorsión (C°)	Costo relativo
ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno)	1.05	3	35	50	100	1.1
PET (Polietileno tereftalano)	1.35	2.8	80	80	75	1.6
HDPE (Polietileno de alta densidad)	0.95	1	30	600-1200	60	1.0
PA (Poliamida nylon)	1.15	2.2	75	60	75	2
PC (Policarbonato)	1.2	2.3	60	100	130	2.3
PES (Polietersulfano)	1.35	2.8	84	60	203	6
PEI (Polieterimida)	1.3	3.0	105	60	200	7
PEEK (Polieter-eter ketona)	1.3	3.7	92	50	140	25

Tabla 4.2 Propiedades típicas de resinas termoplásticos [4].

4.2.1.2 Matrices termoplásticos

Este tipo de polímeros incluye una gran variedad de compuestos y prestaciones. Generalmente, vienen en forma de fibras cortas o esferas que se reblandecen a altas temperaturas. Algunos ejemplos son: poliestireno, polipropileno, polietileno, poliamida y nylon. El procesado de los termoplásticos se realiza por aplicación de presión y temperatura a láminas alternativas de fibras de refuerzo y termoplástico. Ésta es la técnica utilizada normalmente para el uso de fibras largas. Otra técnica de manufactura consiste en la mezcla de fibras tanto de refuerzo como de matriz; esta mezcla se calienta y se le da forma de lámina por medio de la presión o bien forma de perfil por medio de la extrusión [4].

4.2.2 Refuerzos

Se conoce como refuerzo a la parte generalmente no continua del compuesto. En el caso de compuestos laminares y fibrosos esto se refiere a las fibras que rodeadas por la matriz mejoran las rigidez y capacidad para soportar carga, actuando como limitadores de la propagación de grietas. Del mismo modo, la matriz permite a la fibra incluso rota recuperar su capacidad de soporte de carga a una corta distancia de la fractura. Los más comunes son la fibra de vidrio, de carbono y las fibras orgánicas como el kevlar o la spectra.

4.2.2.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio se usa en aproximadamente el 90 % de los plásticos reforzados que se producen [4]. Esto es fundamentalmente debido a su bajo costo y su relativa buena resistencia por unidad de peso. Estas fibras tienen una gran resistencia aunque su rigidez es más limitada.

Las fibras de vidrio son elaboradas a partir de vidrio fundido que se hace pasar a través de orificios a una temperatura aproximada de 1600°C [8]. Estos filamentos, de aproximadamente 8-14 micras [9], son entonces bañados en un agente que servirá de protección y para realizar enlaces moleculares con la matriz. A continuación se unen en fibras de unos 200 filamentos que serán las que conformen las diferentes estructuras de refuerzos. Estas fibras pueden ser cortadas directamente en longitudes que van desde los 5 a los 50 milímetros para su uso en procesos de moldeo por inyección o unidas en un fieltro con direcciones de fibras aleatorias. Sin ser cortadas se pueden unir en grupos de 100 o más fibras para formar hilos que serán los constituyentes de los tejidos de refuerzo y de los ensamblados unidireccionales o multiaxiales.

Las fibras de vidrio más utilizadas son de tipos “E” y ”S”. La fibra de vidrio más común es la fibra de tipo “E”. Esta fibra está compuesta principalmente por dióxido de silicio y óxidos de calcio, aluminio y boro [8]. Es la más barata y por esta razón la más utilizada. Por otra parte, la fibra de vidrio tipo “S” proporciona mejores propiedades, aunque a un precio más elevado. Este tipo de fibra es similar en composición a la fibra de vidrio tipo “E” aunque con menor número de impurezas y sin óxido de boro [4].

La gran resistencia de la fibra de vidrio viene dada por los enlaces covalente entre el silicio y los radicales de oxígeno. Los átomos se integran así en una estructura amorfa que crea una fibra isótropa.

4.2.2.2 Fibra de Carbono

La fibra de carbono es notablemente más cara que la fibra de vidrio. Como consecuencia su uso está más limitado a aplicaciones donde la disminución de peso es de gran importancia. Se presentan en distintas variedades dependiendo del contenido de carbono y del diámetro y número de sus filamentos. El origen de la fibra de carbono es el rayón, poliacrilonitrilo (PAN) y la brea. El proceso de generación de los filamentos involucra diferentes fases que requieren un

calentamiento a altas temperaturas (1200 a 2800 °C) [8]. Dependiendo de la temperatura se obtendrá fibras de alta resistencia (HT) o de alto módulo (HM) [8].

Para intentar compensar estas fibras, existe la denominada fibra de módulo intermedio (IM). Esta fibra combina parte de las propiedades de cada uno de los otros tipos y consigue prácticamente la misma resistencia que las fibras HT con un módulo ligeramente inferior al de las HM. Por otro lado, existe una variedad de fibra de carbono con un alargamiento a rotura del 2% que se denomina de alto alargamiento y tenacidad (HST). Este tipo de fibra es más adecuado para los casos en los que se requiera una mayor capacidad de trabajo admisible, es decir, una mayor resistencia a los impactos [4]. Las fibras de carbono se presentan en forma de tejidos o ensamblados para de esta forma aprovechar las propiedades direccionales del material.

4.2.2.3 Fibras Orgánicas

Recientemente se ha conseguido adaptar fibras orgánicas al uso como refuerzos. El principal problema para el uso de estas fibras es su baja adhesión a la matriz. Esto requiere tratamientos superficiales especiales para asegurar un suficiente traspaso de esfuerzos entre matriz y fibra. Las fibras de aramida y polietileno son

las más usadas generalmente, ambas poseen buena capacidad para recibir impactos [4].

Propiedades Típicas de Fibras de Refuerzo				
Material	Densidad (g/cm ³)	Modulo Elástico (GPa)	Tensión Admisible (GPa)	Deformación a Rotura %
Fibra de Vidrio E	2.6	72	3.4-3.5	3.3-4.8
Fibra de Vidrio R/S	2.5-2.53	86-87	4.4-4.6	4.2-5.4
Fibra de Vidrio C	2.45	71	3.1	3.5
Fibra de Carbono HT	1.75-1.8	228-238	2.7-3.5	1.2-1.4
Fibra de Carbono HST	1.78-1.83	230-270	3.9-7.0	1.7-2.4
Fibra de Carbono IM	1.73-1.8	280-400	3.4-5.9	1.1-1.9
Fibra de Carbono HM	1.79-1.91	350-490	2.0-3.2	0.4-0.8
Fibra de Aramida	1.39-1.44	58-80	2.8-3.0	3.3-4.4
Fibra de Aramida HM	1.45-1.47	120-186	2.8-3.4	1.9-2.4
Fibra de Polietileno	0.97	87-162	2.6-3.3	2.7-3.5

Tabla 4.3. Propiedades típicas de fibras de refuerzo [4].

4.2.3 Geometría de los Refuerzos

Las propiedades finales del material compuesto dependen, principalmente, de la relación volumétrica de sus constituyentes [2]. Sin embargo, éste no es el único factor. Es necesario tener también en cuenta la disposición espacial de los refuerzos [2]. Esta disposición viene determinada generalmente por la colocación geométrica de estos.

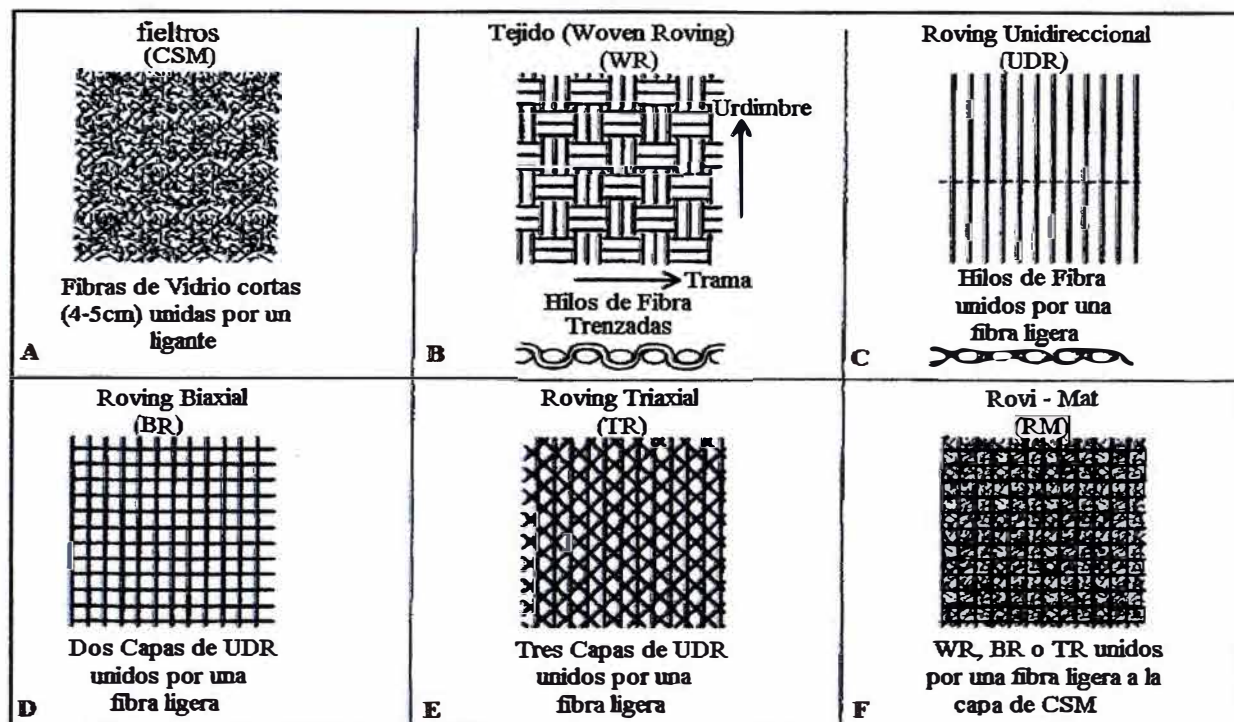


Fig. 4.2 Geometría de los refuerzos más conocidos (fibra de vidrio tipo “E”) [2].

4.2.3.1 Fielts (CSM)

Los fieltros son estructuras textiles no ordenadas ni intercaladas (ver Fig. 4.2.A). La unión entre estos se suele realizar mediante un ligante especial [2]. Cuando estos fieltros tienen algunas fibras en la dirección perpendicular al plano se denominan hilvanados. Para su fabricación se utilizan tanto fibras cortadas como fibras continuas. El material principal usado, por su bajo costo, es la fibra de vidrio. En los fieltros la distribución de fibras es aleatoria y por lo tanto producen compuestos bidimensionalmente isótropos [4]. Por esta razón, no se consiguen valores de rigidez elevados y estos materiales tienden a ser usados en piezas de bajo valor añadido.

4.2.3.2 Tejidos (Woven Rovings)

En este caso, las fibras se ordenan en forma de tejidos. Normalmente se trata de estructuras planas en las que se entrecruzan dos sistemas de fibras: trama y urdimbre (ver Fig. 4.2.B). Se forman mediante la colocación paralela de la urdimbre, entre la que se entrecruza la trama. Así, la mitad de la trama queda sobre la urdimbre y la otra mitad debajo. De esta forma, las direcciones de resistencia se hallan principalmente a 0° y 90° con respecto a la urdimbre (ver Fig.4.3).

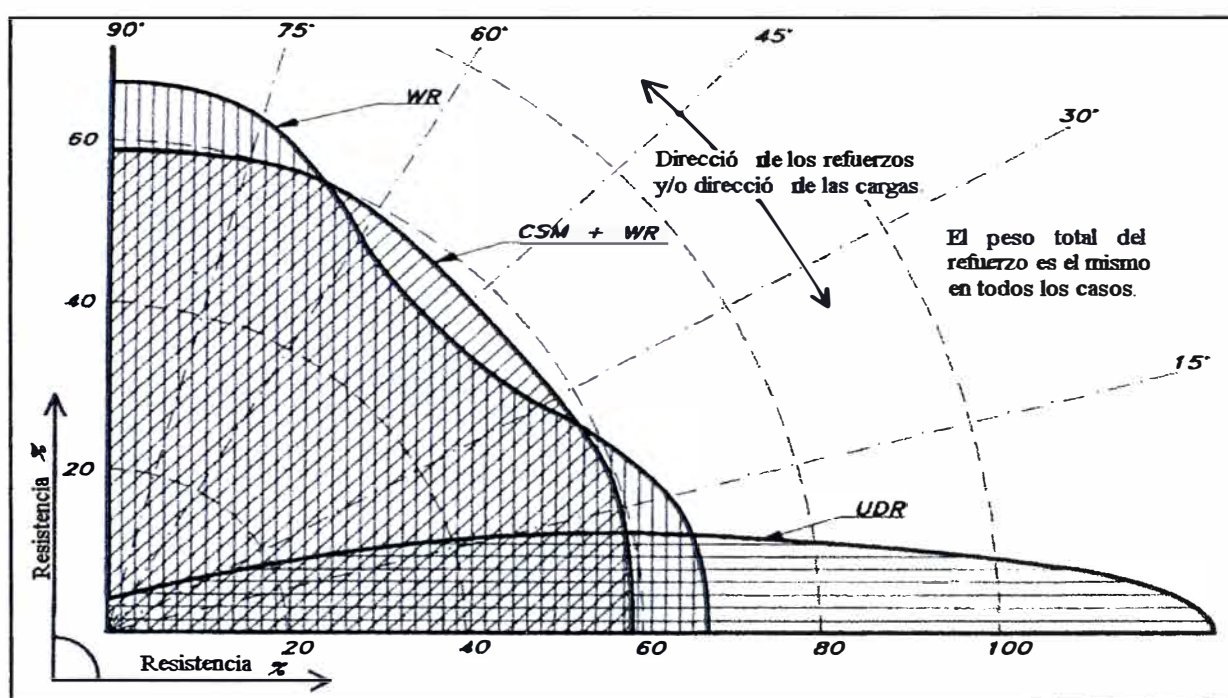


Fig. 4.3. Resistencia a la flexión y dirección de los refuerzos [2,6].

4.2.3.3 Ensamblados

Los ensamblados son estructuras planas que consisten en la superposición de sistemas de fibras paralelas con o sin fijación de los puntos de cruzamiento [4]. Pueden tener en cada capa distinto espesor y orientación, e incluso ser de distinto material. La fijación de una capa a otra suele realizarse con fibras ligeras. Cuando estas estructuras constan de una sola capa con las fibras en la misma dirección se denominan unidireccionales (ver Fig. 4.2.C-D).

4.2.3.4 Trenzados

Las estructuras trenzadas son diferentes. Si en los tejidos hay un sistema de fibras paralelas a la dirección de la pieza y otro perpendicular, en los trenzados las fibras forman un ángulo con esa dirección (ver Fig. 4.2.E-F). En el caso de los trenzados cilíndricos existe una ventaja evidente con respecto a la geometría entrelazada, ya que se puede adaptar a la simetría de una pieza de revolución y el ángulo que forma la fibra puede ajustarse para atender las solicitaciones. Este tipo de refuerzo suele utilizarse en aplicaciones como la fabricación de raquetas de tenis, palos de golf, etc. [4].

4.2.3.5 Mallados y Encadenados

Son formas textiles planas que se fabrican mediante el mallado o encadenamiento de una fibra o sistema de fibras con otra u otros mediante una máquina de confección. A las mallas utilizadas en la fabricación de materiales compuestos se les suele denominar tejidos multiaxiales. Éstos son textiles, pues una máquina de tejer mantiene las fibras una posición exacta. Con esto, se refuerza predominantemente las direcciones elegidas.

4.2.4 Materiales de Núcleo (Construcción tipo Sándwich)

Otro tipo de materiales comúnmente utilizados en los compuestos laminares son los núcleos. Por núcleo se entiende el material intermedio, de grosor generalmente mayor que las capas exteriores en la construcción de tipo sándwich. Su función es mantener las capas separadas para mejorar su inercia del mismo modo que el alma de una viga en I mantiene separadas las alas (Ver Fig. 4.4). Existen gran variedad de materiales susceptibles de ser usados como núcleo en función de la aplicación requerida, los más conocidos se mostrarán en los siguientes párrafos.



Fig. 4.4. Comparación entre una viga “I” versus una construcción sándwich.

4.2.4.1 Madera de Balsa

La madera de balsa tiene una estructura celular cerrada consistente en celdas alargadas en la dirección del espesor (la longitud de la celda es aproximadamente dieciséis veces el diámetro del mismo). Su densidad cambia según su variedad y va desde 100 a 250 kilogramos por metro cúbico [4]. Además presenta una buena capacidad de adhesión a las capas, pero tienen la particularidad de absorber más resina de lo estrictamente necesario [8]. Sus características de rigidez y resistencia son similares a los núcleos de estructura nido de abeja. La resistencia estática de la madera de balsa es mayor que la de la espuma de PVC [2], sin embargo su capacidad para absorber energía es menor. La resistencia a los impactos a nivel local es muy buena porque los esfuerzos son transmitidos eficazmente entre las capas del núcleo.

4.2.4.2 Espumas Termoestables

Ciertos plásticos termoestables son aptos para la fabricación de espumas. Estas espumas son muy ligeras (32 kilogramos por metro cúbico) y resisten al agua, los microorganismos y el envejecimiento. Los plásticos más comúnmente usados son la celulosa de acetato (CCA), el poliestireno y el **poliuretano**. Estas espumas tienen propiedades mecánicas bastante pobres, además, el poliestireno es atacado por la resina de poliéster. Adicionalmente, no se pueden formar en superficies complejas. Por estas razones no se suelen usar como material estructural, aunque si puede aparecer como material de aislamiento o flotación [4].

4.2.4.3 Espumas de PVC (Cloruro de Polivinilo)

En general estas espumas están disponibles en densidades que van desde 50 a 200 kilogramos por metro cúbico [8]. Las espumas de PVC son fabricadas combinando copolímero de polivinilo con estabilizadores, plastificadores, compuestos de **cruzamiento** y agentes de soplado [4]. La mezcla es calentada bajo presión para iniciar la reacción de cruzamiento y más tarde sumergida dentro de tanques de agua caliente para expandirla hasta la densidad deseada. Los diámetros de las celdas que se forman van desde 0.254 milímetros hasta 2.5 milímetros (comparado con los 0.033 milímetros de diámetro para las celdas de

madera de balsa) [4]. El material resultante es un termoplástico que permite su adaptación a curvaturas dobles.

También existen espumas de PVC **lineales**. Esto es, espumas que tienen una estructura molecular lineal pero no con enlaces cruzados entre moléculas. En general, estas espumas tienen un comportamiento estático menos favorable pero su capacidad de absorción de impactos sin rotura catastrófica es mayor [4].

Existe otro tipo de espuma similar basada en acrilonitrilo de estireno (SAN). Si bien esta espuma no está formada por PVC su comportamiento es similar a éstas. Esta espuma tiene una capacidad estática similar a la de la espuma de PVC cruzada y una capacidad de absorber impactos similares a la del PVC lineal.

4.2.4.4 Nido de Abeja

El nido de abeja no es un material en si mismo, sino que el término se refiere a una forma de estructurar diversos materiales con la geometría de los panales que construyen las abejas. Los materiales más utilizados para ello son: aluminio, fibra

de vidrio impregnada en resina fenólica, polipropileno y papel de aramida impregnado en resina fenólica. Su densidad varía desde 16 hasta 96 kilogramos por metro cúbico. El tamaño de las celdas va desde 3 milímetros hasta 9 milímetros aproximadamente [4]. Las propiedades físicas varían casi de forma lineal con la densidad. Es posible construir paneles extremadamente ligeros con este tipo de núcleo, pero también son difíciles de formar en curvaturas complejas.

4.2.4.5 Espuma de PMI

Existe también una espuma formada a partir de polimetacrilímid (PMI). Esta espuma presenta mejores propiedades que la espuma de PVC. También requiere menor presión para conseguir una buena adhesión a las pieles. Pero su principal ventaja es que soporta altas temperaturas de curado, lo que la hace muy recomendable para su uso con preimpregnados.

Un interesante cuadro comparativo cualitativo fue propuesto por Larson L. y Eliasson R.E. [2]. En este cuadro (Tabla 4.4.) se menciona un tipo de núcleo adicional (Plywood), que por sus propiedades relativamente desventajosas no se tomó en cuenta en los párrafos anteriores.

Demandas	Plywood	Madera Balsa	Poliuretano	PVC lineal	PVC entrecruzado
Peso ligero	-1	2	2	2	2
Absorción de agua	0	-1	0	2	2
Resistencia al corte	2	2	0	1	1
Fatiga	2	2	-1	2	2
Resistencia al impacto	2	1	-1	1	0
Adhesión	2	2	1	0	2
Resistencia al calor	2	2	1	1	1
Insolación térmica	1	2	2	2	2
Resistencia al fuego	-1	-1	0	2	2
Durabilidad	-1	-1	2	2	2
Resistencia al agua	0	0	0	1	2
Reparación	0	0	0	0	0
Economía	0	2	1	0	0
Total	8	12	7	16	18

Tabla 4.4. Cuadro comparativo cualitativo entre los principales materiales de núcleo, según la demanda [2]. Los valores que se muestran en el cuadro corresponden a: -1 (pobre), 0 (adecuado), 1 (bueno) y 2 (excelente).

Material	Densidad (kg/m ³)	Módulo Cortante (MPa)	Cortante Admisible (MPa)	Tensión Admisible (MPa)	Compresión Admisible (MPa)
Madera de Balsa	112	120	2.17	9.12	8.19
	145	151	2.81	12.3	11.9
PVC Entrelazado	75	11		1.21	1.1
	80	30	1	1.79	1.17
	96	45	1.5	2.48	1.79
PVC Lineal	80	20	1.17	1.38	0.86
SAN	55	12	0.56	0.81	0.4
	80	20	0.98	1.39	0.79
	210	35	1.75	2.27	1.45
PMI	75	30	1.28	2.74	1.47
	111	49	2.35	3.40	2.94
Nido de Abeja Fenólico/Polipropileno	96/77	41/-	1.38/1.1	-	7.76/1.5

Tabla 4.5. Propiedades típicas del material de núcleo (core) [4].

4.3 Parámetros adicionales de un laminado

Uno de los parámetros más importantes, con respecto a las propiedades de resistencia del laminado, es el contenido de fibra, expresado a menudo en porcentaje de peso del laminado total (véase las Fig. 4.5 y Fig. 4.6). En general, el más alto contenido de fibra que puede alcanzar un laminado muy resistente es cuanto más humedecida sea la fibra por la resina y por tanto ésta no sea escasa. En la práctica, no es realista contar con un contenido de fibra de más de 37% ni por debajo de 27% cuando se usa un proceso de laminado manual húmedo con un laminado de fieltros (CSM) [2]. Con un combinado de fieltros y tejidos, en el laminado, el contenido de la fibra varía generalmente desde 35% hasta 45% y con el material multidireccional (en vez del tejido) hasta 55% [2].

Para calcular las características de resistencia de un compuesto de fibras de vidrio (fieltros-tejidos) podemos utilizar las características de sus constituyentes por separado, es decir, fieltros y tejidos. Las características combinadas pueden aproximarse calculando el peso medio de los respectivos refuerzos y evaluándolos en la ecuación (4.1) [2].

$$P_c = P_m \cdot X_m + P_r \cdot (1 - X_m) \quad (4.1)$$

Donde:

P_C : Propiedades del compuesto tejidos-feltros.

P_m : Propiedades del fieltro (CSM), con el mismo contenido de fibra que el compuesto mezclado, Fig. 4.5.

P_r : Propiedades del tejido (WR), con el mismo contenido de fibra que el compuesto mezclado, Fig. 4.6.

X_m : Relación CSM/(CSM + WR) en el compuesto.

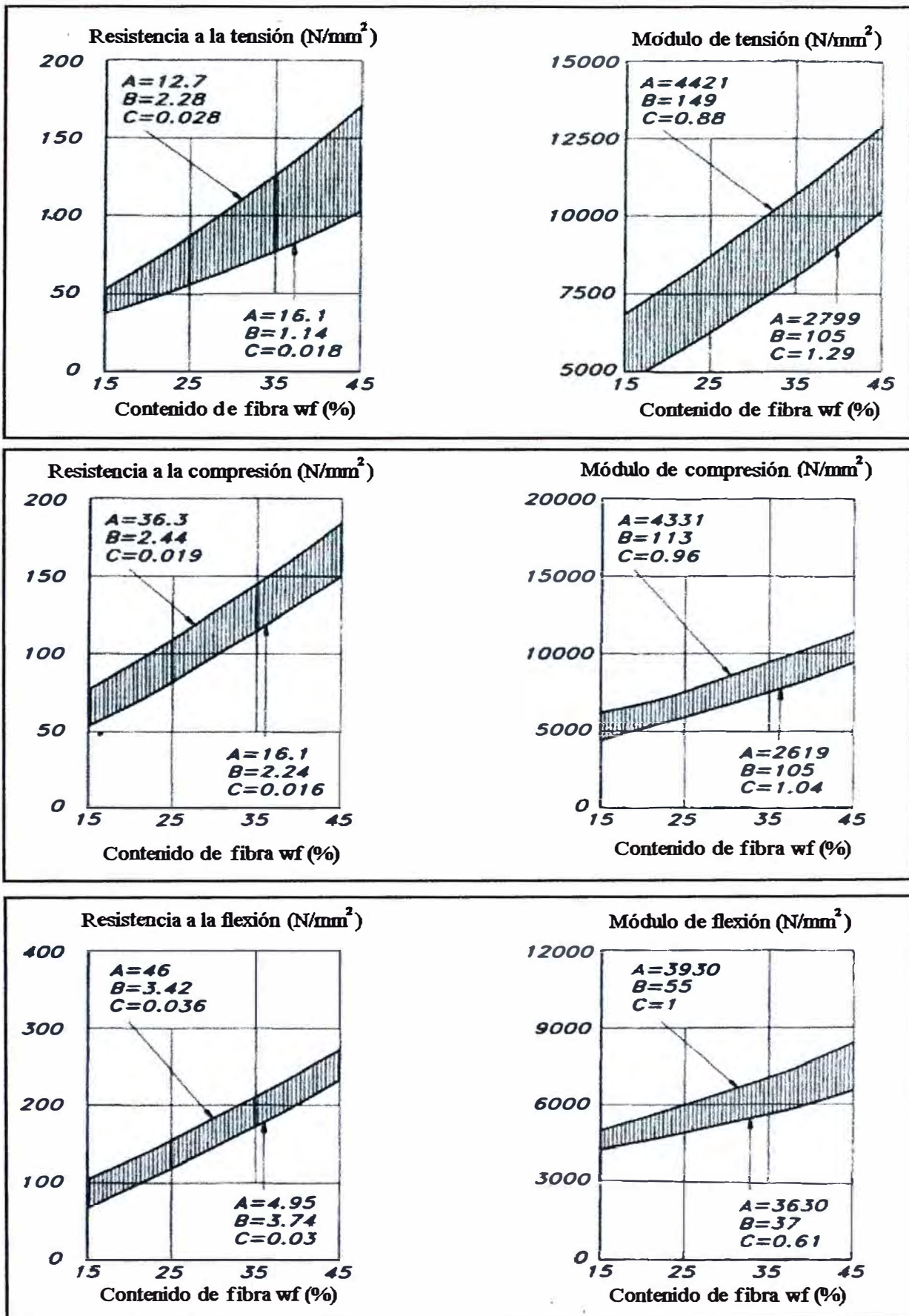


Fig. 4.5. Propiedades del compuesto Poliéster-filtros (Caprino y Teti) [2]. Todas las curvas se rigen por la ecuación general: $A + B.wf + C.wf^2$

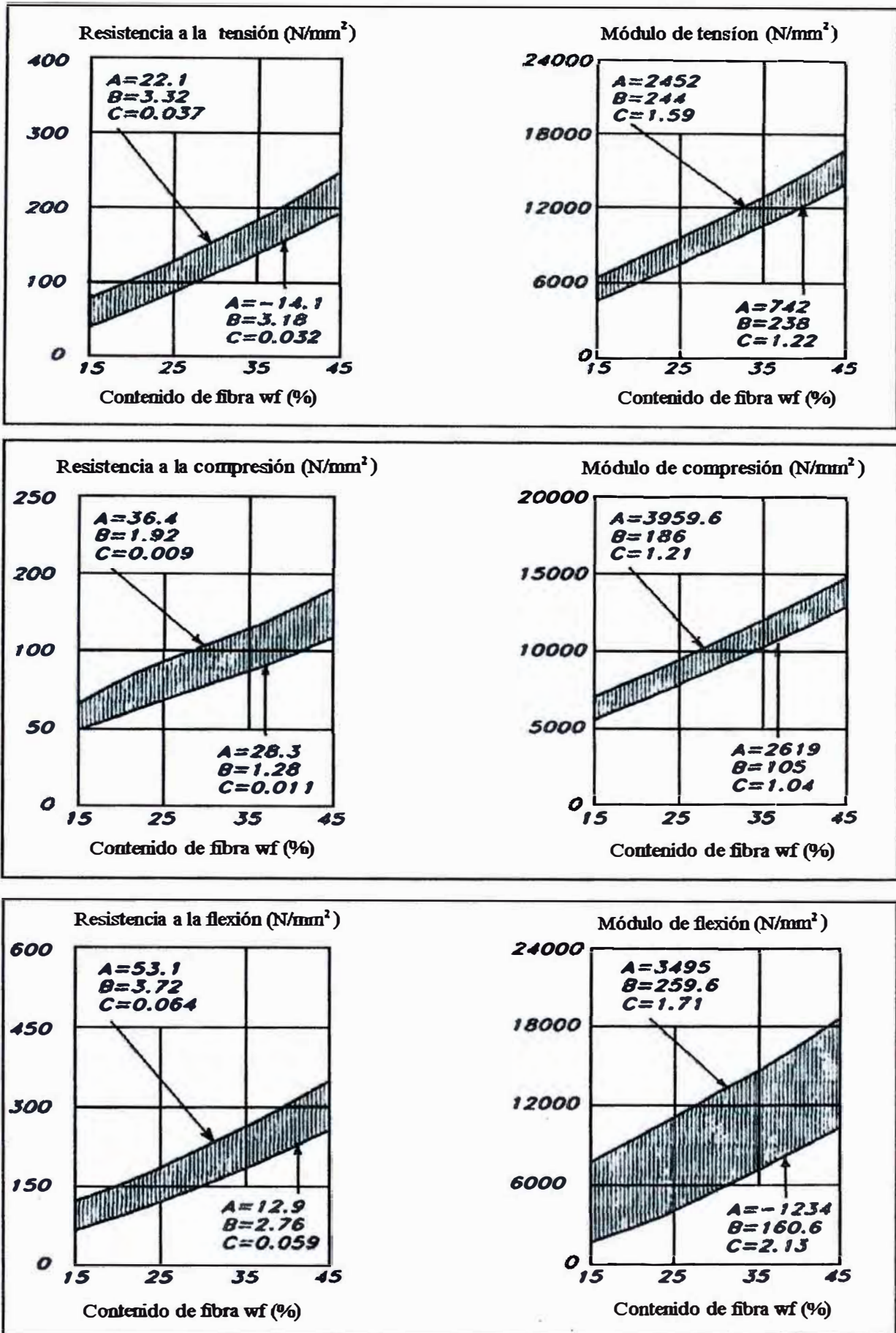


Fig. 4.6. Propiedades del compuesto Poliéster-Tejido (Caprino&Teti) [2]. Todas las curvas se rigen por la ecuación general: $A + B.wf + C.wf^2$

4.4 Comparación entre un laminado simple y un laminado tipo sándwich.

Muchos constructores y armadores piensan que un laminado simple es económico de construir, pero pesado. También conocido como “laminado de construcción sólida”, para diferenciarse del “laminado de construcción sándwich”, éste es un proceso muy usado en la industria naval. Un laminado tipo sándwich comparado con un laminado simple es más grueso en espesor, pero mucho más ligero; en un laminado sándwich el material del núcleo va entre las dos capas de laminado simple resistente; un laminado simple está constituido por resina y refuerzo, no tiene núcleo o core. Ya mencionamos los tipos y propiedades de resinas, refuerzos y núcleos de un laminado en general (dependiendo del tipo de laminado, simple o sándwich, uno puede elegir los materiales adecuados para su constitución). Sin embargo, si cada elemento actúa por separado sería incapaz de soportar las cargas globales y/o locales, pero al combinar todos los elementos se crea un laminado tipo sándwich que posee una estructura rígida, resistente y ligera [4].

Para seleccionar entre un sólido laminado simple y una construcción en sándwich uno tiene que tomar en cuenta muchos criterios de decisión como: peso y velocidad, estructura y costo, calidad de acabado, tiempo de trabajo empleado, entre otros; según David E. Jones [21] la elección fundamentalmente va relacionada con la eficiencia de producción del astillero constructor. Muchos

diseñadores y constructores no consideran todos los factores necesarios para tomar la decisión final sobre el método de construcción, mas solo enfatizan en el análisis de costos de producción [21], no debiendo ser siempre así.

Antes de discutir los dos métodos de construcción, tenemos que revisar algunos conceptos básicos del comportamiento de los materiales compuestos en la construcción de una embarcación.

4.4.1 Transferencia de carga

Supongamos una embarcación a vela propulsada por su motor, a una velocidad moderada y en aguas tranquilas. En la embarcación, predominantemente, tendremos cargas locales de dos tipos: cargas hidrostáticas y cargas locales de compresión y tracción generadas por el motor, según su giro, sobre las carlingas [21]. De allí la importancia de reforzar coherentemente la estructura de modo que la carga se pueda transferir de un elemento de menor resistencia a uno de mayor resistencia (un aspecto aparentemente obvio, pero que muchos descuidan), esto es, del panel de fondo hacia los longitudinales y de estos hacia las cuadernas o desde las carlingas hacia los mamparos transversales.

4.4.2 La importancia de la unión

Lo principal en una unión es que ésta deba ser lo suficientemente resistente para soportar la carga de un miembro estructural y pasar esa carga a su miembro de soporte. Al respecto no hay inconvenientes cuando se trabaja con un laminado simple o un laminado sándwich, pero uno debe asegurarse que cada miembro sea adecuadamente unido con su miembro de soporte, sino no será capaz de soportar y transmitir las cargas y tensiones de una operación típica; así la estructura acumulará tensiones muy altas y eventualmente fallará [21].

Cualquiera que sea el tipo de unión, las áreas circundantes a ésta deben ser ásperas (por lo expuesto que se encuentran las fibras de la resina luego de ser lijadas adecuadamente, pero a la vez deben estar libres de impurezas, grasa, polvo, tierra, etc.), antes de ser laminadas y así conseguir una unión sólida [8].

4.4.3 Resistencia y Rigidez

La rigidez es la capacidad de un panel de soportar la flexión, mientras resistencia es la capacidad de un material de soportar carga. Si un panel es más rígido que

otro, el panel más rígido podría finalmente fallar a baja carga, pues no tienen la misma resistencia.

La rigidez es un concepto importante cuando se elige un laminado simple o un laminado sándwich, ya que nosotros planeamos usar fibras de vidrio (un material con rigidez limitada). PRF tiene una resistencia a la tensión similar al aluminio, pero solo del 12 al 13% de su rigidez, para tener una idea [21]. En la construcción de embarcaciones, el nivel de rigidez que necesita una estructura está gobernada por el “Criterio de deflexión” [21], pero para entender su significado, la generalizada y aceptada regla del pulgar nos dice que un panel debe tener un relación permisible L/D (Lado más corto de un panel/Deflexión) o una constante (C) entre 75 y 100 [21].

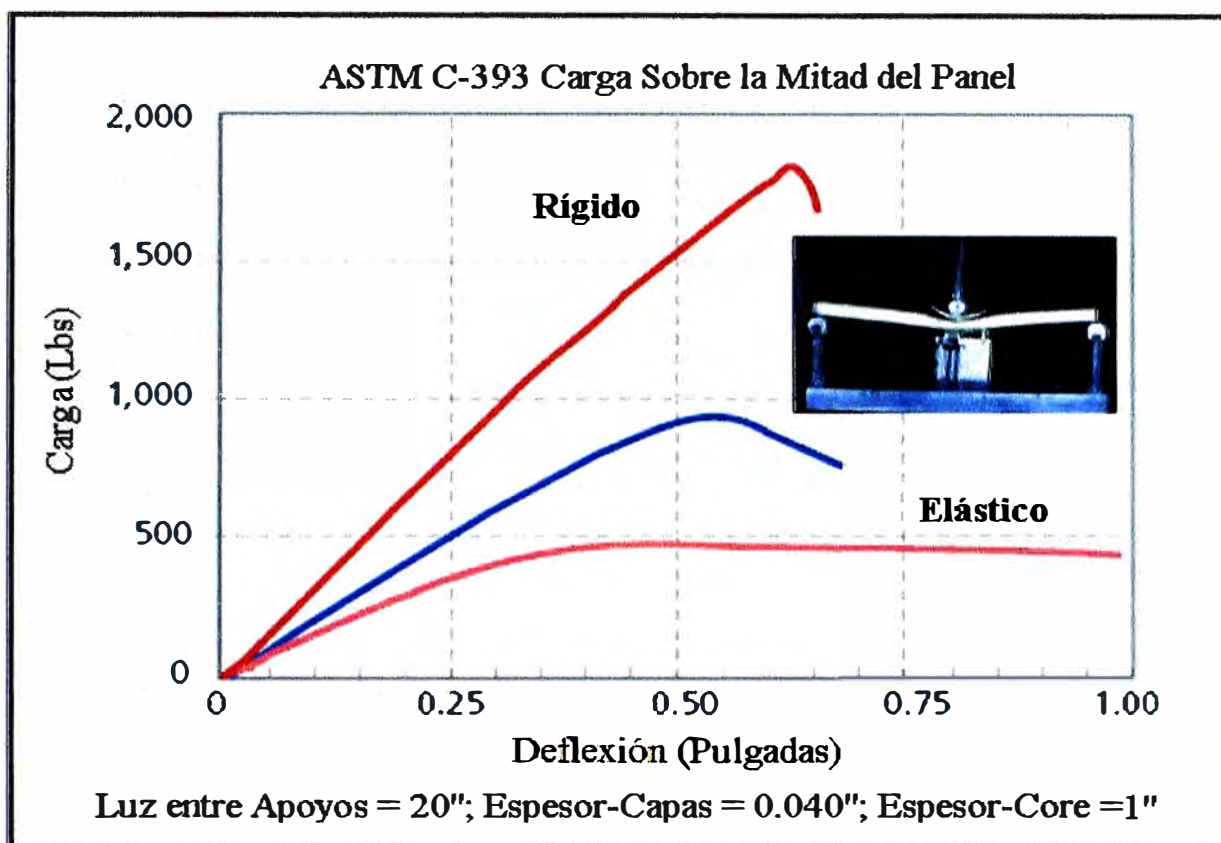


Fig. 4.7. Curvas de flexión, "Carga y Deflexión", de los paneles sándwich fabricados con un mismo espesor, diferente core (núcleo) y con las mismas capas en los tres casos. a) Core Balsa (curva superior), posee altas características de rigidez, pero es frágil en la falla. b) Core Cross-Linked PVC (curva intermedia) tiene adecuada resistencia y elasticidad. c) Core Linear Foam, es muy elástico, pero con poca rigidez [21].

Cuando un diseñador realiza los cálculos de resistencia y rigidez a la flexión en el fondo de una embarcación, no es un problema el discutir que usar, construcción sándwich o un laminado simple únicamente; esto se debe a que la máxima tensión está siempre en los extremos o a una distancia más alejada del eje neutro

de la sección del panel, es decir, es la resistencia de las capas externas las que finalmente resisten tales cargas de flexión [21]. Por ello cuando uno selecciona un refuerzo resistente para el laminado uno puede usar menos refuerzos (material) para una aplicación dada, conociendo previamente los requerimientos de resistencia, rigidez, mínimo espesor de la capa y la resistencia al corte.

4.4.4 Diseño estructural usando laminado sólido simple

Al establecer la estructura de una embarcación a motor, muchos diseñadores comienzan por ubicar el motor y luego proceden por organizar el arreglo general de tanques. Las carlingas del motor son ubicadas acorde a las bases del motor y las cuadernas, bulárcamas y mamparos espaciados a intervalos normalmente de 0.9 a 1.2m o más [21]. El resultado será un laminado grueso en el fondo del casco, comparado con lo requerido en cuanto a rigidez y resistencia.

Para reducir el espesor del laminado uno puede adicionar una cuaderna o longitudinal sobre el lado más corto del panel y si uno desea reducir aun más el espesor se tendrá que usar un laminado exótico, S-glass, kevlar o fibra de carbono (ver propiedades en la Fig. 4.8). Sin embargo, si uno quiere un laminado sólido delgado, usando laminados exóticos, la embarcación también necesitará de

más refuerzos y cada refuerzo estructural adicional más tiempo en el molde y así más tiempo de labor para instalar las cuadernas.

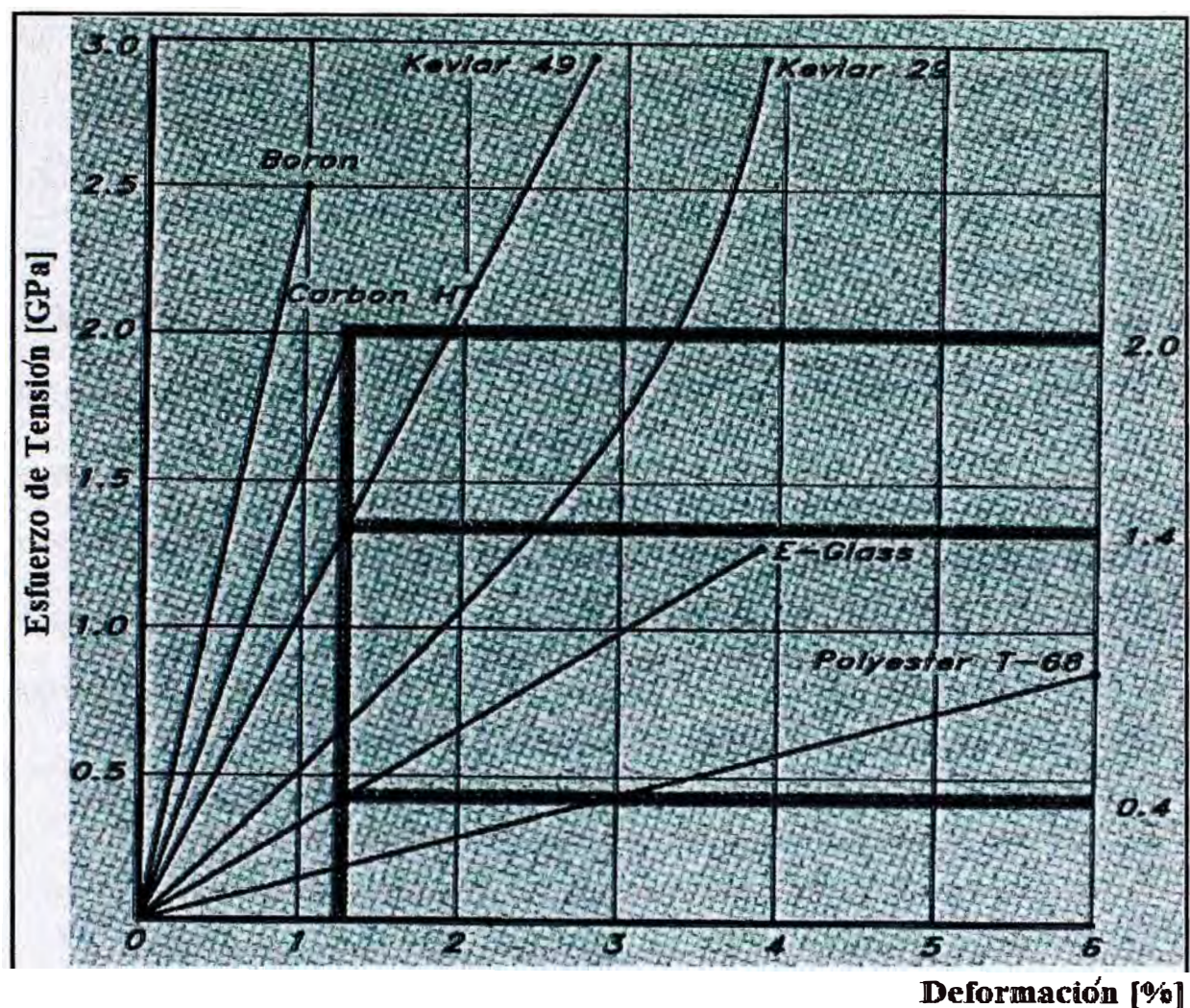


Fig. 4.8. Esfuerzo de tensión y deformación en laminados exóticos y laminados ordinarios [2].

La ventaja de construir usando laminado simple se da cuando se diseña el laminado del casco y la estructura secundaria con la finalidad de que solo cubra suficientemente el “criterio de deflexión” y al mismo tiempo, proporcione un

mínimo factor de seguridad para la resistencia. El resultado es una estructura optimizada por su bajo peso y por un periodo de tiempo en servicio esperado.

4.4.5 Diseño estructural usando construcción sándwich.

La teoría básica detrás de un diseño estructural tipo sándwich es frecuentemente descrita como similar al concepto estructural de una viga “I”. En un panel de construcción sándwich, las capas son similares a las alas de una viga I y soportan los esfuerzos de cargas de tensión y compresión durante la flexión, mientras que el material del núcleo ligero, quien es comparado con el alma de una viga “I”, soporta las cargas de corte [11].

En la construcción de algún elemento estructural, la mejor forma de reducir la cantidad de refuerzos es incorporando un panel tipo sándwich. Por ejemplo, uno puede usar un laminado sándwich en el techo de la cabina o propiamente en la cubierta de proa debido a que uno tiene que cubrir una luz grande con un bao de sección reducida o simplemente sin éste [21]. Si uno quiere reducir peso y cantidad de refuerzos en su estructura, entonces es aquí donde la construcción de tipo sándwich cobra importancia

La temperatura de operación donde navegará la nave es también un factor que debe considerarse al seleccionar el material del núcleo (ver resistencia al calor en Tabla 4.4). Para las aplicaciones interiores, los núcleos no necesitan ser resistentes al clima, a las cargas dinámicas de impacto o resistencia a la compresión que la cubierta y el casco sí necesitan.

4.4.6 Ventajas y desventajas de un laminado simple y un laminado sándwich.

Adicional a las diferencias a nivel de ingeniería entre un laminado sólido y una construcción en sándwich, descritas anteriormente, existen otros factores en contra y a favor de los mismos. En la Tabla 4.6 se muestran las diferencias más importantes que todo diseñador debe tener en cuenta.

Ambos, laminado sólido y laminado sándwich, tienen su lugar en la construcción de embarcaciones, la clave es identificar que método encaja mejor en un astillero y proyecto propio en particular, teniendo en consideración todo lo mencionado anteriormente: peso, estructura, velocidad, costo, calidad de montaje, tiempo de moldeo, habilidad de los operarios, capacidad de los técnicos e ingenieros, etc. Si uno puede balancear lo descrito anteriormente, uno conseguirá la forma más barata y rápida de construir una embarcación [21].

Ítem	Ventajas	Desventajas
Construcción Sándwich	Alta resistencia específica.	Peligroso para la salud durante la construcción (resinas).
	Alta rigidez específica.	Bajas posibilidades de reciclar.
	Bajo peso.	Falta de información de ingenieros, diseñadores y operarios.
	Aislamiento térmico y acústico.	Problemas de temperatura.
	Capacidad de resistencia a la corrosión.	Proceso de construcción requiere más equipamiento que otros.
	Facilidad de formas complejas.	Control de calidad.
	Capacidad de absorción de Energía.	Variedad de criterios de rotura.
	Pocos refuerzos de panel son necesarios.	Incompatibilidad de materiales.
	Múltiples posibilidades de escoger materiales.	Mayor tiempo en el ciclo de producción.
Laminado Sólido Simple	Facilidad en la construcción, necesita poco entrenamiento.	Produce más emisiones orgánicas que la construcción sándwich.
	Menor tiempo en el ciclo de producción.	Peso relativamente alto.
	No necesita mucho equipamiento en la construcción.	Poca tolerancia al daño, en el impacto el daño se propaga por todo el espesor del laminado.
	Múltiples posibilidades de escoger materiales.	El panel necesita más refuerzos para un espesor adecuado.
	Alta resistencia específica.	Problemas de costos cuando el objetivo es reducir el peso en más del 20%.
	Alta rigidez específica.	Comparativamente, bajo aislamiento térmico acústico.

Tabla 4.6. Construcción sándwich y laminado sólido simple, ventajas y desventajas.

4.5 Laminado húmedo

De las Figs. 4.5 y 4.6 se obtienen la resistencia a la rotura y el módulo de tensión para un laminado seco, pero en la práctica esto no es lo que se espera en el laminado de una embarcación. La razón obvia es el agua y cuanto más tiempo un laminado permanece sumergido más débil será. La Fig.4.9 muestra las características de la resistencia y elasticidad para un laminado húmedo en función de tiempo. Los laminados fueron woven rovings (WR) con resina de poliéster ortoftálico y poliéster isoftálico como matriz. Como se puede ver el laminado poliéster ortoftálico no es apto para absorber agua como el de tipo isoftálico. Algo que debe recordarse sin embargo, es que si usted almacena la embarcación en tierra durante invierno y deja secar el laminado, el proceso empieza con eficacia, con año 0, cuando relanza la embarcación otra vez [2]. Para proteger contra ósmosis, si uno tuviera que elegir entre las dos resinas, la resina poliéster isoftálico da una mejor protección [2]. De igual manera **los gelcoats** con resinas poliéster isoftálico dan mejor protección, pero no pueden compararse a la resina epoxi [8].

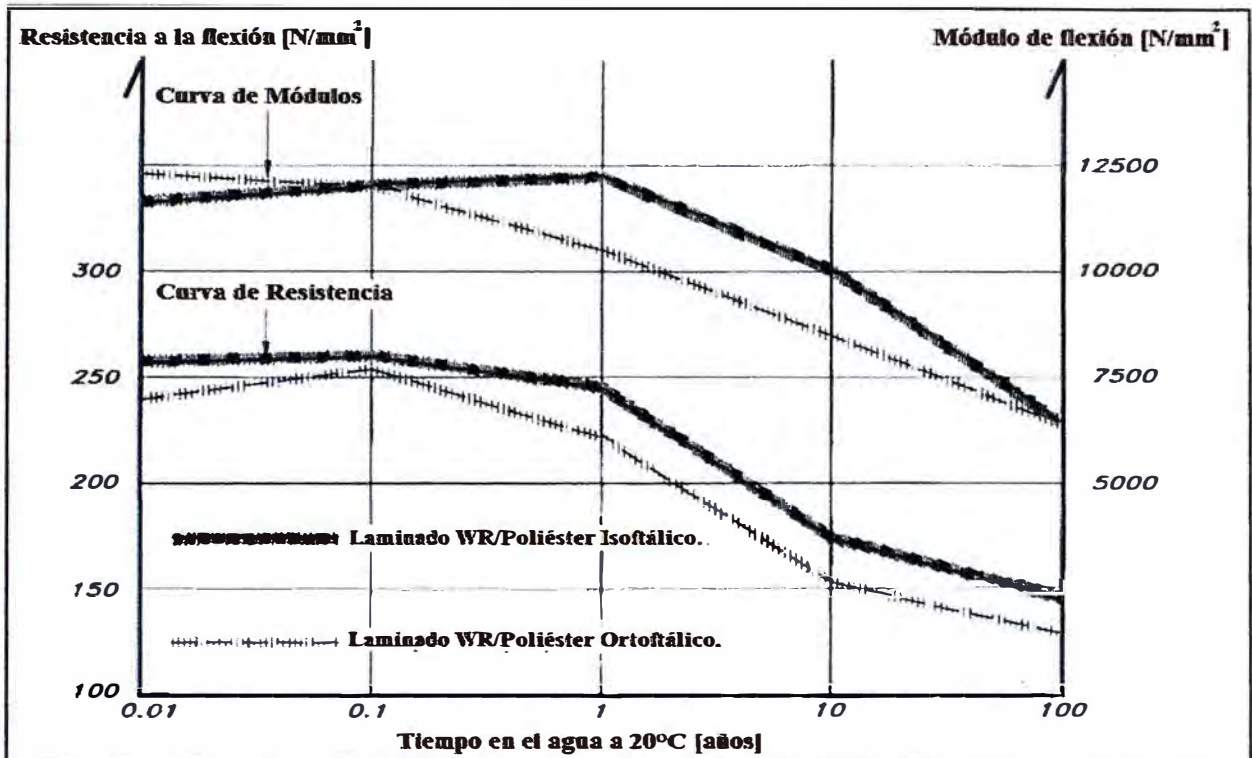


Fig. 4.9 Características de Resistencia y Elasticidad de un laminado vs. Tiempo [2].

4.6 Fatiga.

Los laminados están sometidos a cargas de tipo cíclico, inducidas por cargas hidrodinámicas, hidrostáticas, arboladura, hélice, vibraciones de la maquinaria principal, etc. [8]. Las principales áreas sometidas a fatiga son la quilla y el timón [2]. En la Fig. 4.10, la curva superior representa la delaminación del laminado de fieltros (CSM) y la curva inferior corresponde al desarrollo de la microrotura. La microrotura es la primera muestra de falla del laminado y es obvio que ocurre a un nivel considerablemente inferior del esfuerzo de rotura (ver Fig. 4.10). Esto significa que la resina de poliéster ortoftálico comienza a desarrollar microroturas debido a la baja resistencia a la deformación, es decir, por ser muy rígida.

En la Fig. 4.10, es visible la caída brusca en resistencia de rotura vs. número de ciclos, de 110 N/mm^2 a 40 N/mm^2 después de un millón ciclos, representando una reducción del 53%. Éstos son algunos aspectos a considerar, especialmente cuando se proyecta diseñar un yate de largo alcance que intente cruzar océanos [2].

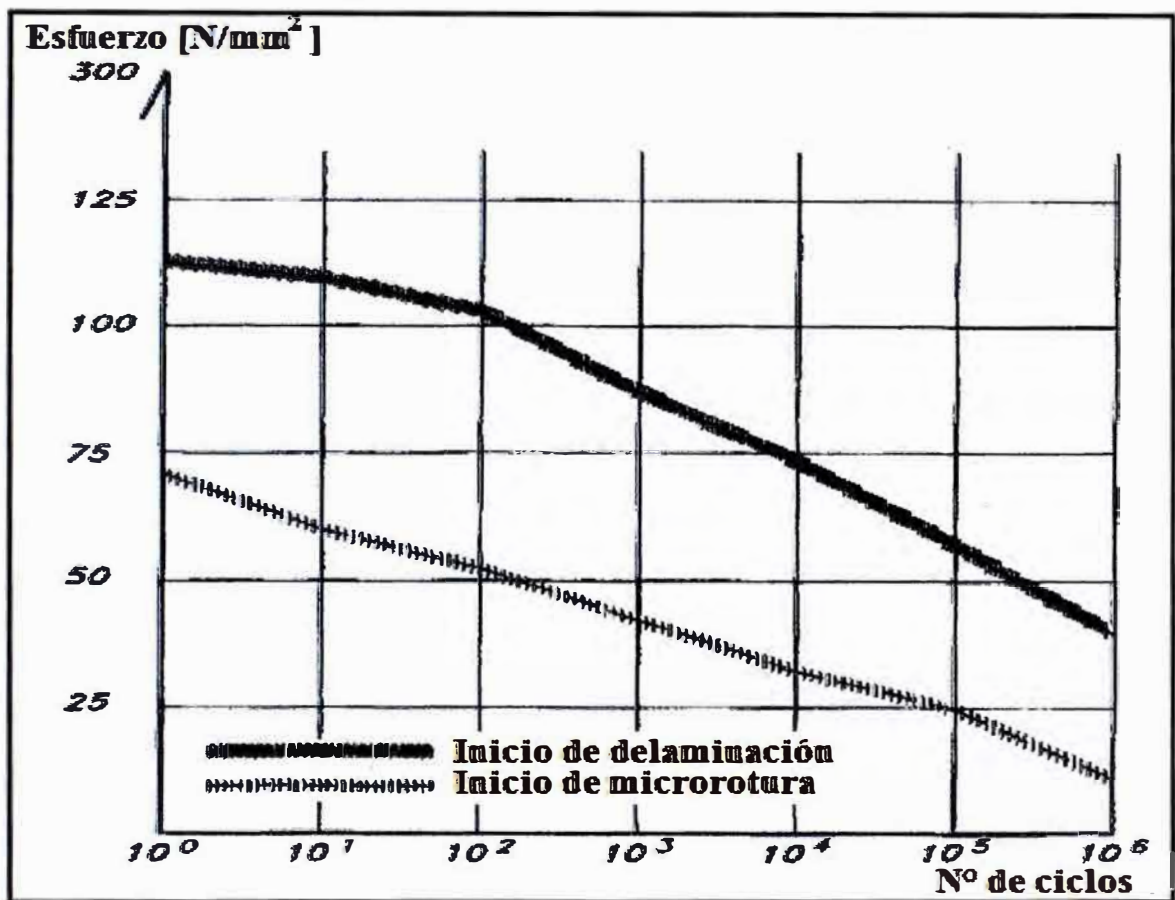


Fig. 4.10 Características de fatiga de un laminado de fieltros (CSM) [2].

4.7 Aplicaciones Navales

Existe una gran variedad de aplicaciones navales que se benefician o podrían beneficiarse de la utilización de materiales compuestos. Estos materiales eran principalmente usados para embarcaciones de eslora limitada, pero sin el uso de cálculos estructurales, es decir usando el ensayo y error. Sin embargo de un tiempo a esta parte las embarcaciones construidas en materiales compuestos se han ido haciendo más y más grandes (ver embarcaciones de pasajeros en Tabla 4.7). Esto planteó la necesidad de unos métodos de cálculo más avanzados. La capacidad de calcular estructuras de materiales compuestos es ya madura en otras industrias, y las formas de cálculo de embarcaciones con esloras grandes siempre han existido. La necesidad por lo tanto es la de aunar las dos áreas [4].

Pero no solo las embarcaciones grandes se benefician de estos avances. El uso de métodos más avanzados es también muy beneficioso para embarcaciones de alto rendimiento y para todas las aplicaciones recientes de ingeniería oceánica y costera (ver Tabla 4.7).

Sector	Artefactos Marinos	Motivación	Avances
Náutica de Recreo	Veleros, veleros regatas, veleros planeadores, veleros semi-planeadores	Las embarcaciones de recreo y los artículos de recreo (tablas de vela, tablas de surf, minisubmarinos, etc.), construidos en PRF, tienen ventajosas propiedades como la ligereza, amortiguación de vibraciones, resistencia a la corrosión, resistencia al impacto, relativo bajo costo de fabricación y facilidad de mantenimiento y reparación [4].	Desarrollo de técnicas avanzadas como la infusión, el autoclave y los preimpregnados. Construcción de estructuras de alta resistencia, como por ejemplo las cabinas de seguridad para embarcaciones planeadoras (fibras de aramida y carbón con núcleo de honeycom-aramida) [22]
	Yates, embarcaciones planeadoras, yates crucero		
	Motorsables o yates veleros [7], otros.		
Náutica Comercial	Embarcaciones pesqueras: palangreros, camareros, cerqueros, arrastreros, etc.	En la actualidad, aprox. 50% de la flota de pesqueros fueron construidas en PRF y casi todas las flotas pesqueras del mundo (sobre todo en pequeñas y medianas esloras) está migrando hacia la construcción en PRF. Esta es la aplicación más importante dentro de la náutica comercial [4].	Desarrollo de nuevos conceptos en líneas de forma [4], con el fin de aprovechar el peso que se ahorraría usando PRF (aprox. 50%) y usarlo para incrementar la capacidad de carga (evitando en lo posible el uso de lastre, por requerimiento de estabilidad)
	Embarcaciones de pasaje: ferries rápidos, hidroplanos, catamaranes	Actualmente hay embarcaciones de efecto superficie que han sido construidas en sándwich de espuma de PVC con capas de fibra de vidrio y han tenido gran éxito. Estas embarcaciones son capaces de transportar 244 pasajeros y 27 toneladas de carga a 42 nudos. Su impulso viene desarrollándose por la necesidad de una resistencia a la corrosión excepcional, una reducción de peso, geometría compleja, entre otros.	Estudios recientes hacen posible la viabilidad de construir embarcaciones de 80 a 100 m, pese a implicancias en cuanto a normatividad, existe una clara tendencia al incremento de su uso, sobre todo en elementos sobre la línea de flotación.

	Embarcaciones Utilitarias: embarcaciones de rescate, patrulleras, remolcadores, contra incendios, suplidoras de servicio, etc.	Las embarcaciones utilitarias necesitan ser reforzadas en zonas específicas según sus requerimientos. Esto hace interesante la construcción al elegir PRF, pues uno puede obtener las propiedades que cubran las expectativas sin una significativa variación del peso y escantillonado.	Existen modelos construidos por infusión de resina, con refuerzos en aramida o incluso en pre-impregnados; toda una variedad de métodos constructivos para una variedad de funciones.
	Ingeniería Oceánica, ingeniería de costas	La ingeniería oceánica es una de las áreas que más está viviendo la expansión del uso de los materiales compuestos dentro del sector naval. En ingeniería de costas algunas de las aplicaciones para las que se están empleando estos materiales es para la sustitución de pilones en los embarcaderos y marinas.	Avances en tuberías marinas, utilizando fibras de vidrio longitudinales para dar flexibilidad y fibras de carbono en sentido circunferencial para dar resistencia a la presión exterior. También se encuentran en fase de prueba algunos embarcaderos realizados completamente en materiales compuestos.

Tabla 4.7. Aplicaciones navales, náutica recreacional y náutica comercial.

4.8 Notas Finales

En el Capítulo 3 se reconocieron las principales áreas de carga y sus direcciones a lo largo de la eslora de un yate velero similar al nuestro, pero hasta aquí todavía no se ha seleccionado el material con el cual se construirá el casco. Para ello existen diversos criterios que involucran la preferencia del armador, la estética, el mantenimiento, la facilidad de construcción, la economía, etc. Coincidente con los requerimientos del armador, en cuanto a tipo de laminado se refiere, se eligió el laminado sándwich por las bondades que ofrece (ver Tabla 4.6).

A pesar de lo irreversible que es la matriz termoestable, es más fácil de usar, pues a diferencia de los termoplásticos no necesita de presión y temperatura para su aplicación. Específicamente, elegimos la resina poliéster isoftálico como matriz, por tres razones: la primera razón es por tener un bajo costo relativo, la segunda por ser fácil de usar para los operarios y tercero por ser un material con propiedades muy valoradas en el sector [4]. En algunas áreas de gran demanda en resistencia y rigidez como la zona de pantocazos (ver Fig. 3.2), usaremos la resina vinilíster; esta resina posee mejores propiedades que la resina de poliéster isoftálico (ver Tabla 4.1) y es buena para su uso como gelcoat [8], sin embargo su uso solo será justificado en la capa exterior del laminado sándwich por dos motivos: el primero por la demanda de mayor resistencia a la tensión en dicha capa, pues el arrufo es la condición más severa del yate velero y segundo por ser

la primera capa de la obra viva que está en contacto con el agua, por tanto la capacidad de resistir al agua es también fundamental.

Los refuerzos (fibras) de las capas del laminado sándwich (ver Fig. 4.1) fueron seleccionados considerando resistencia, costo relativo y data de embarcaciones construidas en PRF. Las propiedades y costos relativos que se muestran en la Tabla 4.1 y los datos estructurales de yates y embarcaciones pesqueras en PRF se obtuvieron de bibliografía y revistas de ingeniería [2,8,9,21,26] y fueron fundamentales a la hora de decidir por el refuerzo tipo E (fieltros y tejidos). El fieltro (CSM) es un material más o menos isotrópico, pero en la práctica, se suele usar entre cada capa de tejido con la finalidad de salvaguardar ambos: desviaciones en la dirección de la carga y la disposición de los refuerzos (previamente estimadas en el capítulo 3). Así un combinado alternado entre los refuerzos tipo fieltros y los refuerzos tipo tejido tendrían un comportamiento bidimensional casi homogéneo, como el que se muestra en la Fig. 4.3. Así tendremos un laminado compuesto, en su gran mayoría, por resina de poliéster isoftálico y fibras de fieltros (CSM) y tejidos (RW) cuyas propiedades se muestran en la Tabla 4.8.

El material del núcleo se eligió considerando los requerimientos del armador, propiedades y datos prácticos del material (Tablas 4.4 y 4.5) y data de embarcaciones similares revisadas en bibliografía y revistas de ingeniería [2,21]. El núcleo elegido, fue espuma de PVC entrecruzada (ver propiedades en la Tabla 4.9).

PROPIEDADES		50% (CSM) Y 50% (WR)		
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
		Chopped (CSM)	WR	CSM, WR
Resistencia a la tracción.	σ_{ut}	120	190	155
Módulo de tensión.	E_t	10300	13200	11750
Resistencia a la compresión.	σ_{uc}	195	113	154
Módulo de compresión.	E_c	8500	12500	10500
Resistencia a la flexión.	σ_{uf}	215	253	234
Módulo de flexión.	E_f	6800	12400	9600
Resistencia a la tracción o compresión	σ_{ut}	120	190	155
Modulo de tracción o compresión	E_{tc}	10300	13200	11750

Tabla. 4.8 Propiedades mecánicas del laminado seleccionado, con un contenido de fibra de wf =0.39. Los resultados de la última columna fueron obtenidos usando ecuación 4.1 y las Figs. 4.6 y 4.7 para $x_m=50\%$ y wf=0.39, respectivamente.

PROPIEDADES		Núcleo de PVC entrecruzado (MPa)
Resistencia al corte	τ (60kg/cm ³)	0.7
Resistencia al corte	τ (80kg/cm ³)	1
Resistencia al corte	τ (100kg/cm ³)	1.4
Resistencia al corte	τ (120kg/cm ³)	1.7

Tabla. 4.9 Resistencia mecánica al corte del núcleo del laminado seleccionado [2].

CAPITULO 5

CÁLCULO ESTRUCTURAL SEGÚN ISO N° 12215-5, ABS Y LA BUENA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA.

5.1 Introducción.

Un estudio detallado de las cargas globales y locales, la distribución apropiada de refuerzos y una investigación teórica de los materiales compuestos fue fundamental para analizar y calcular la resistencia estructural del casco del Yate Velero UNI. El proceso comienza con el cálculo de la **resistencia longitudinal o global**, determinación de la sección crítica, módulo de sección requerido, módulo de sección del yate velero (con el uso de la buena práctica de la ingeniería). Para garantizar la **resistencia local** y debido a las interacciones muy complejas entre las cargas y los requerimientos de resistencia local es muy difícil, por el cálculo directo, determinar los escantillonados de una embarcación. Por esta razón, las diversas sociedades de clasificación: American Bureau of Shipping (ABS) [5], Lloyd's Register of Shipping

(LR), Bureau Veritas (BV), Det Norske Veritas (DNV) y otros, han formulado reglas de escantillonado según las características generales de cada embarcación. La ISO [24] viene desarrollando un conjunto de reglas para embarcaciones a placer de esloras menores a 24 m. Las reglas de estandarización de la ISO está basada en gran parte en dos estándares de la ABS, las guías de yates de competición en océanos (Ocean Racing Yacht - ORY 1994) y embarcaciones de alta velocidad (High Speed Craft - HSC 1997), junto con la regla NBS-VTT (1997) [2]. Las reglas ISO [24] será exclusiva en la comunidad europea, esto quizás sea una razón suficientemente y justificada para su uso, en lugar de otra. Esto no significa que las demás sociedades de clasificación no son válidas, pero para calificar embarcaciones y poder venderlos en Europa, solo lo estandarizado por la ISO será tomado en cuenta. Como sabemos la ISO N° 12215 no ha sido concluido en su totalidad, entonces para cubrir ciertos vacíos o detalles que faltan o todavía no han sido concluidos, se utilizaron las reglas ABS [5] y/o la buena práctica de la ingeniería.

5.2 Cálculo de la resistencia longitudinal o global del Yate Velero UNI.

El análisis y cálculo de resistencia longitudinal se realizó usando la teoría elemental de vigas, en nuestro caso la viga-casco es como se muestra en la Fig. 5.1. La selección y ubicación de nuestros apoyos responde principalmente a tres bases: primero por la hipótesis muy usada en el cálculo de resistencia longitudinal “la existencia de un equilibrio entre el peso y el empuje de la viga-casco” [29], en segundo lugar por la condición de navegación de un yate velero

“arrufo” (ver Fig. 2.1) y tercero por ser muy usado por la buena práctica de la ingeniería [2,4,29].

5.2.1 Sección crítica del Yate Velero UNI.

Transversalmente la sección del casco en el área de la cubierta deberá ser bien reforzada para no perder su forma, así las caídas del mástil al sotavento serán soportadas (Fig. 2.2). Para alcanzar esto, la embarcación debe tener “la cruz fuerte” con el mástil en su centro visto de planta (Fig. 2.3).

La condición de arrufo (ver Fig. 2.1) es la más severa para un yate a vela, pues pone la cubierta en compresión y la quilla en tensión, mientras que estas partes trabajan mejor a la inversa. Las cubiertas ligeras no son completamente eficaces a la compresión, pues hay un riesgo de pandeo que va empeorando por la presencia de escotillas de cubierta y de otras aberturas. Una técnica simple para contrariar este debilitamiento de la cubierta, debido a las aberturas, es utilizar el refuerzo que de consolidación adicional al borde de la escotilla o cualquier otra abertura.

Para hallar la sección crítica y calcular el módulo de sección requerido en el casco, se procedió a graficar la distribución del momento de flexión debido a las fuerzas longitudinales, es decir, fuerzas debido a las tensiones en los stays y fuerzas acumuladas en cada mástil. El análisis inicia utilizando los datos de cargas aplicadas a la gran mayoría de yates veleros en el mundo, así la carga de un yate velero en la condición más crítica (arrufo) es aproximadamente el 90% de su desplazamiento [4,5,6]. Tratándose de un yate velero con aparejos tipo keche, la carga se distribuirá en relación directamente proporcional al área vélica que soporta cada mástil (ver Figs. 1.1 y 5.1).

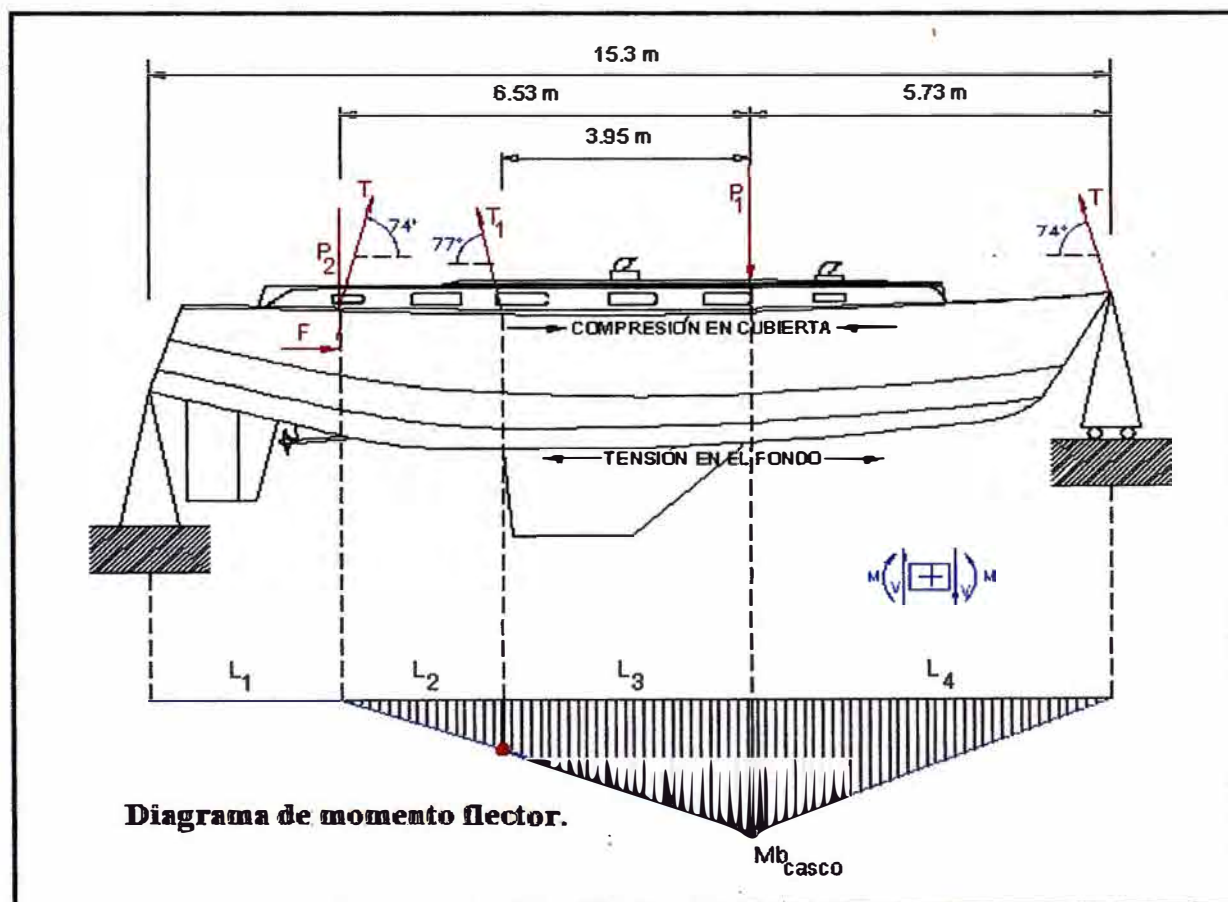


Fig. 5.1 Fuerzas longitudinales del aparejo y distribución longitudinal del momento flector a lo largo de la Viga Casco.

Del análisis de párrafos anteriores podemos deducir que la carga sobre cubierta es de aproximadamente el 90% del desplazamiento total del yate velero (5% más según lo estipulado por la ABS [5]). Es importante resaltar que los yates estudiados tenían un solo mástil, el Yate Velero UNI tiene dos mástiles, por tanto amerita un análisis más detallado. La vela de mesana, que sostiene el segundo mástil, trabaja con una eficiencia del 50% [2] y considerando que ambos mástiles ejercen carga de flexión de un total de aproximadamente 90% de la carga de desplazamiento, entonces la carga debe distribuirse directamente proporcional al área vélica al cual están involucrados cada mástil. Por consiguiente, considerando la Fig. 5.1 y la Tabla 1.1 podemos obtener, por deducción, las ecuaciones (5.1) y (5.2).

$$P_1 \approx \frac{A_{\text{velica t.}} - A_{\text{mesana}}}{A_{\text{velica t.}}} * 0.9 * \Delta_s ; [148146,01 \text{ N}] \quad (5.1)$$

$$P_2 \approx \frac{A_{\text{mesana}}}{A_{\text{velica t.}}} * 0.5 * 0.9 * \Delta_s ; [13069,19 \text{ N}] \quad (5.2)$$

Donde:

Δ_s : Desplazamiento en agua salada (N), el valor de la Tabla 1.1 multiplicado por la gravedad (9.81m/s^2)

A_{mesana} : Área vélica de mesana, ver Tabla 1.1

$A_{\text{velica t.}}$: Área vélica total, ver Tabla 1.1

Después de realizar la distribución del momento flector en la viga-casco del Yate Velero UNI (Fig.5.1), podemos observar que la sección crítica se encuentra en la sección transversal en donde se encuentra el mástil principal. Es en dicha sección donde se calculó, usando teoría elemental de vigas, el momento flector del casco ($Mb_{casco} = 449,978 \text{ kNm}$), producida por las tensiones en los aparejos.

5.2.2 Módulo de sección total requerido en el Yate Velero UNI.

Habiéndose realizado los cálculos anteriores, ahora podemos calcular el módulo de sección requerido, en base a la ecuación (5.3), que es muy sencilla de analizar y deducir [2,4]:

$$MS_{req} = MS_{ola} + MS_{arb.} \quad (cm^3) \quad (5.3)$$

Donde :

MS_{req} : Módulo de sección total requerida en el yate velero .

MS_{ola} : Módulo de sección requerida en el yate velero por las olas (ecuación 2.1)

$MS_{arb.}$: Módulo de sección requerida en el yate velero por la raboladura ($\frac{Mb_{casco}}{\sigma_{II}}$).

Mb_{casco} : Máximo momento flector producida por las cargas de arboladura .

σ_{II} : Mínima resistencia a la rotura, en tensión o compresión (ecuación 2.1)

Los resultados indican que el mínimo módulo de sección que se requiere en el casco del yate velero es de 24780 cm^3 , al cuidado de las cargas globales producidas por la mar y por los aparejos.

5.2.3 Módulo de sección total del Yate Velero UNI.

El objetivo en los siguientes cálculos es ver si el módulo de sección de la estructura del casco del Yate Velero UNI supera o no el módulo de sección **requerido** que soportará las cargas de aparejo y oleaje, calculados previamente. Para realizar dicha comparación se calculó el módulo de sección del casco en su sección crítica, suponiendo escantillonados de forro adecuados.

Existen varios métodos para calcular el módulo de sección en la estructura del casco del yate velero. El método tradicional [10], es un método práctico que hasta ahora sigue cobrando gran importancia y que decir si se le asocia el uso de software moderno, a continuación mostraremos los cálculos realizados en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y Fig. 5.2.

Cálculo del módulo de sección total del Yate Velero UNI, usando el método tradicional simplificado								
Elemento	Dimensiones		$A_i = \text{Área de la sección (cm}^2\text{)}$	$x_i = \text{C.G.V de } A_i \text{ (cm)}$	$Y_i = \text{Distancia al eje neutro (cm)}$	$A_i * Y_i^2 \text{ (cm}^4\text{)}$	Momento de inercia individual (cm ⁴)	
	e(mm)	l(mm)						
1	Forro de fondo	12	3434.85	412.182	0.6	117.063	5648402.1	49.462
2	Forro de costado	8	1490.89	119.2712	149.869	32.206	123714.1	220925.347
3	Cubierta	8	756.9	60.552	228.168	110.505	739426.9	3.229
4	Escotilla lateral	8	464.52	37.1616	254.348	136.685	694286.1	6682.239
5	Tapa de escotilla	8	1327.65	106.212	277.974	160.311	2729620.2	5.665

$A_t \text{ (cm}^2\text{)}$	$X_e \text{ (cm)}$
952.36	117.7

$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$
11948152.97

Módulo de sección total del Yate Velero UNI

$$MS_{\text{Fondo}} = \frac{I_x}{X_e}$$

$$MS_{\text{Cubierta}} = \frac{I_x}{x_5 - X_e + 0.5t}$$

MS fondo (cm ³)	101545.86
MS cubierta (cm ³)	74345.413

Donde :

- t : Espesor de cubierta.
- X_e : Posición vertical del eje neutro.
- C.G.V : Centro de gravedad vertical.
- I_x : Momento de Inercia Longitudinal, respecto eje neutro.
- A_t : Área total de la sección crítica.

Tabla 5.1. Método Tradicional Simplificado [10]. Para el cálculo supusimos un escantillonado de 12 mm en el fondo y 8 mm en resto de la sección transversal, ver Fig. 2.5. A. Los resultados reflejan un módulo de sección total de 74345.4 cm³, al cuidado de las cargas globales.

Cálculo del módulo de sección total del Yate Velero UNI, usando un programa tipo CAD ($t_{om}=12\text{mm}$; $t_{ov}=8\text{mm}$)					
Elemento	$A_i = \text{Área de la sección (cm}^2\text{)}$	$x_i = \text{C.G.V. de } A_i \text{ (cm)}$	$Y_i = \text{Distancia al eje neutro (cm)}$	$MS_{Fondo} = \frac{I_x}{Y_1}$	$MS_{Cubierta} = \frac{I_x}{x_5 - X_e + 0.5t}$
Obra viva	598.97	211.03	80.98	3928071.36	2228712.665
Obra muerta	471.55	27.19	102.86	4989496.13	174385.81

$A_t \text{ (cm}^2\text{)}$	$X_e \text{ (mm)}$
1070.52	130.05

$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$
11320665.97

Módulo de sección total del Yate Velero UNI

Donde :

t_{om} : Espesor de la obra muerta.

t_{ov} : Espesor de la obra viva.

X_e : Posición vertical del eje neutro.

C.G.V : Centro de gravedad vertical.

I_x : Momento de Inercia Longitudinal, respecto eje neutro.

A_t : Área total de la sección crítica.

MS fondo (cm ³)	87049.07
MS cubierta (cm ³)	76305.51

Tabla 5.2. Cálculo del módulo de sección total del Yate Velero UNI, usando un programa tipo CAD. Para el cálculo supusimos un espesor de 12 mm en la obra viva y 8 mm en la obra muerta, ver Fig. 5.2 B. Los resultados reflejan un módulo de sección de 76305.5 cm³, al cuidado de las cargas globales. Comparando los módulos de sección de la Tablas 5.1 y los que se muestran en esta tabla, se observó que el error producido por el método tradicional (Tabla 5.1) es 1960 cm³ (2.63%).

Cálculo del módulo de sección total del Yate Velero UNI, usando un programa tipo CAD (t=8mm)					
Elemento	$A_i = \text{Área de la sección (cm}^2\text{)}$	$x_i = \text{C.G.V. de } A_i \text{ (cm)}$	$Y_i = \text{Distancia al eje neutro (cm)}$	$A_i * Y_i^2 \text{ (cm}^4\text{)}$	Momento de inercia Individual (cm ⁴)
Obra viva	598.97	211.03	63.32	2401455.42	2228712.665
Obra muerta	314.06	26.95	120.76	4580044.94	115839.21

$A_t \text{ (cm}^2\text{)}$	$X_e \text{ (mm)}$
913.028	147.71

$I_x \text{ (cm}^4\text{)}$
9326052.24

Módulo de sección total del Yate Velero UNI

Donde :

t : Espesor del casco.

X_e : Posición vertical del eje neutro.

C.G.V : Centro de gravedad vertical.

I_x : Momento de Inercia Longitudinal, respecto eje neutro.

A_t : Área total de la sección crítica.

$$MS_{\text{Fondo}} = \frac{I_x}{X_e} \quad MS_{\text{Cubierta}} = \frac{I_x}{x_s - X_e + 0.5t}$$

MS fondo (cm³)	63136.77
MS cubierta (cm ³)	71356.23

Tabla 5.3. Cálculo del módulo de sección total del Yate Velero UNI, usando un programa tipo CAD. Para el cálculo supusimos un espesor de 8 mm en toda la sección transversal del casco. Los resultados reflejan un módulo de sección de 63136.77 cm³, al cuidado de las cargas globales. Comparando los módulos de sección de la Tablas 5.2 y los que se muestran en esta tabla, se observó que el fondo es la parte más vulnerable, en este caso.

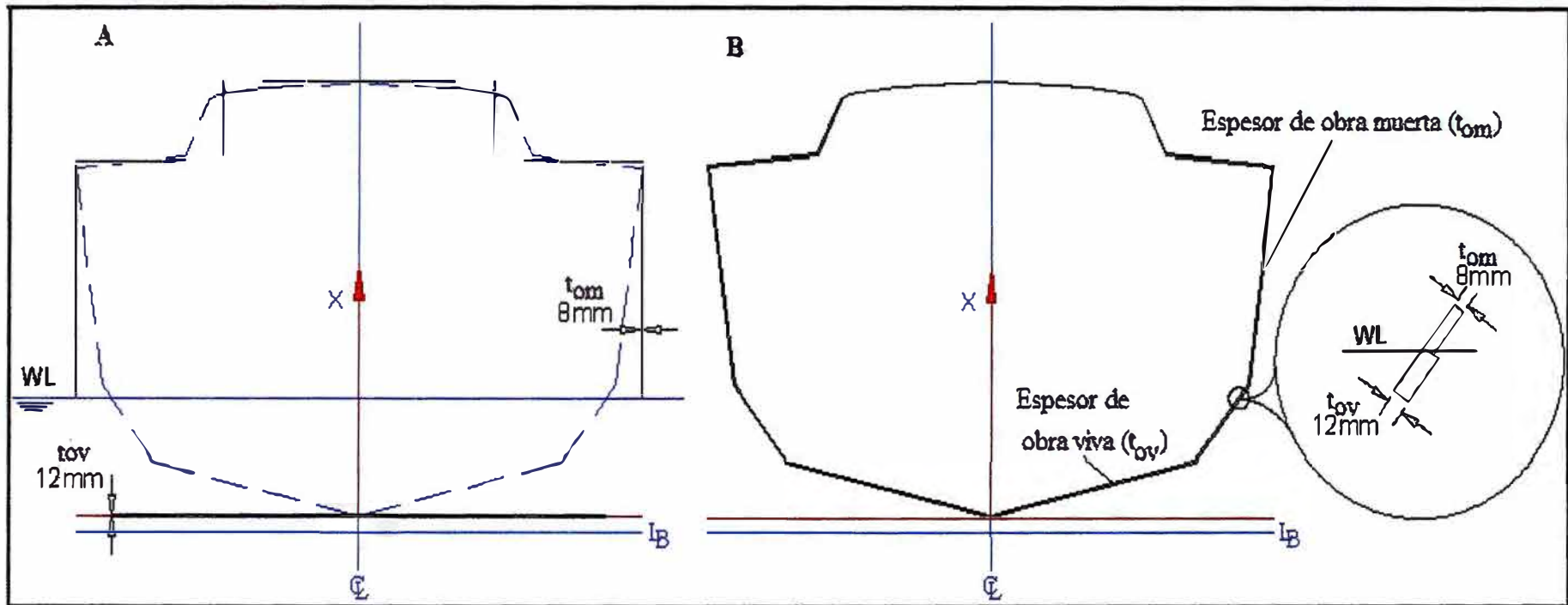


Fig.5.2. Análisis del módulo de sección de la sección crítica del Velero Yate UNI por el método tradicional simplificado [10] y computacional (Programa CAD).

Del análisis anterior se puede deducir que aún desestimando el escantillonado real en fibra de vidrio del yate velero (ver Tabla 5.4), comparado con embarcaciones similares [9,15], los resultados del cálculo del módulo de sección en la sección crítica del Yate Velero UNI (ver Tabla 5.4) muestran un amplio margen sobre los requerimientos de módulo de sección en el Yate Velero UNI ($MS_{ola} + MS_{arb.}$); pero considerando un escantillonado apropiado como el que se muestra en las Tablas 5.1 y 5.2 y Fig.5.2, nos daremos cuenta que los resultados del módulo de sección para tal escantillonado, por el método computacional, produce un margen más amplio que el anterior y por tanto un considerable factor de seguridad total de 3 (apropiado en estructuras marinas [12]) y un factor de seguridad de 25, solo al cuidado de las fuerzas de aparejo.

Mediante un análisis sencillo y simplificado se calcularon las fuerzas máximas de compresión en cubierta [2], para ello se valoró la ecuación (5.4) teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, ver ecuación (5.1) y Tablas 5.1 al 5.4.

$$P_{cub.} = \frac{Mb_{casco}}{(x_{cub} - X_e)} + 0.5P_1 \text{ctg}\alpha \quad (5.4)$$

Donde :

P_{cub} → Carga máxima en cubierta.

x_{cub} → Posición Vertical hasta el borde exterior de cubierta.

X_e → Posición Vertical del eje neutro.

α → 74° (Ver Fig. 5.1)

La fuerza máxima en cubierta, conduce a un esfuerzo de compresión de 10.1 N/mm², pero ahí se tiene un esfuerzo permisible de aproximadamente 117 N/mm² (propiedad mecánica típica de un PRF [4,5], el valor que se utilizó en el cálculo del escantillonado se definió en el capítulo 4, ver Tabla 4.8) con lo que el margen de seguridad es más que suficiente.

Los resultados mostrados anteriormente demuestran que una embarcación, sea cual fuese, es resistente a las cargas de oleaje y arboladura. Esto puede considerarse un “caso estándar”, pues un típico crucero de regatas dimensionado por las reglas de escantillonado ISO N°12215 [24] o cualquier otra, supone que la resistencia del escantillonado propuesto por dicha clasificadora, supera ampliamente los requerimientos de resistencia producidas por las cargas de oleaje y arboladura, por ello no se las somete a cálculo. Sin embargo, en yates extremos, con los aparejos extraordinariamente grandes, pequeño puntal (altura de la viga-casco) y contruidos con capas delgadas de materiales exóticos, es necesario comprobar la resistencia de la viga casco y especialmente las tensiones de compresión en cubierta.

5.3 Cálculo de la resistencia local del Yate Velero UNI.

5.3.1. La regla de estandarización de la ISO N° 12215

La razón del porque la preparación de las reglas de estandarización ISO es que otras reglas de estandarización y prácticas recomendadas en sector naval referente a cálculos de cargas sobre el casco y dimensionamiento de pequeñas embarcaciones difieren considerablemente, limitando así la libre y abierta aceptabilidad de embarcaciones en el mundo [24].

Las reglas ISO N° 12215 [24] es un moderno sistema de estandarización que identifica claramente las cargas a considerar, qué propiedades de materiales se debe utilizar y qué factores de seguridad se aplicarán. Normalmente las reglas de sociedades de clasificación como: American Bureau of Shipping, Lloyd's Register of Shipping, Det Norske Veritas y otros tienen factores de seguridad que pueden detectarse con un simple análisis, pero en muchos casos se encuentran ocultos en factores o coeficientes que uno no puede saber, realmente, que factor de seguridad está usando [12].

5.3.1.1 Estructura de las reglas ISO N° 12215-5

Las reglas ISO N° 12215 constan de nueve partes, ver Fig. 5.3. Las primeras tres partes consideran los tipos de materiales y sus propiedades mecánicas. La parte 4 establece los requerimientos para las condiciones del taller, el almacenaje así como también la de manufactura para la fabricación de la embarcación. La parte 5 cubre la determinación de las cargas de diseño, esfuerzo de diseño y escantillonados. La parte 5 también incluye el análisis de los miembros estructurales internos de una embarcación monocasco de eslora total menor a 24 m; éstos pueden ser construidos con PRF, aluminio o acero (ver Fig. 5.3). La parte 6 todavía no está disponible, pero se ocupará de los arreglos estructurales y detalles. La parte 7 cubre las embarcaciones con multicascos, como por ejemplo, los catamaranes. La parte 8 cubre el cálculo de cargas y escantillonado del timón. La parte 9 cubre todo lo concerniente a los apéndices (como la quilla y otros) y accesorios de la arboladura. Utilizaremos las reglas ABS [5] o la buena práctica industrial, donde las reglas ISO todavía no están disponibles o no contamos con dicha información.

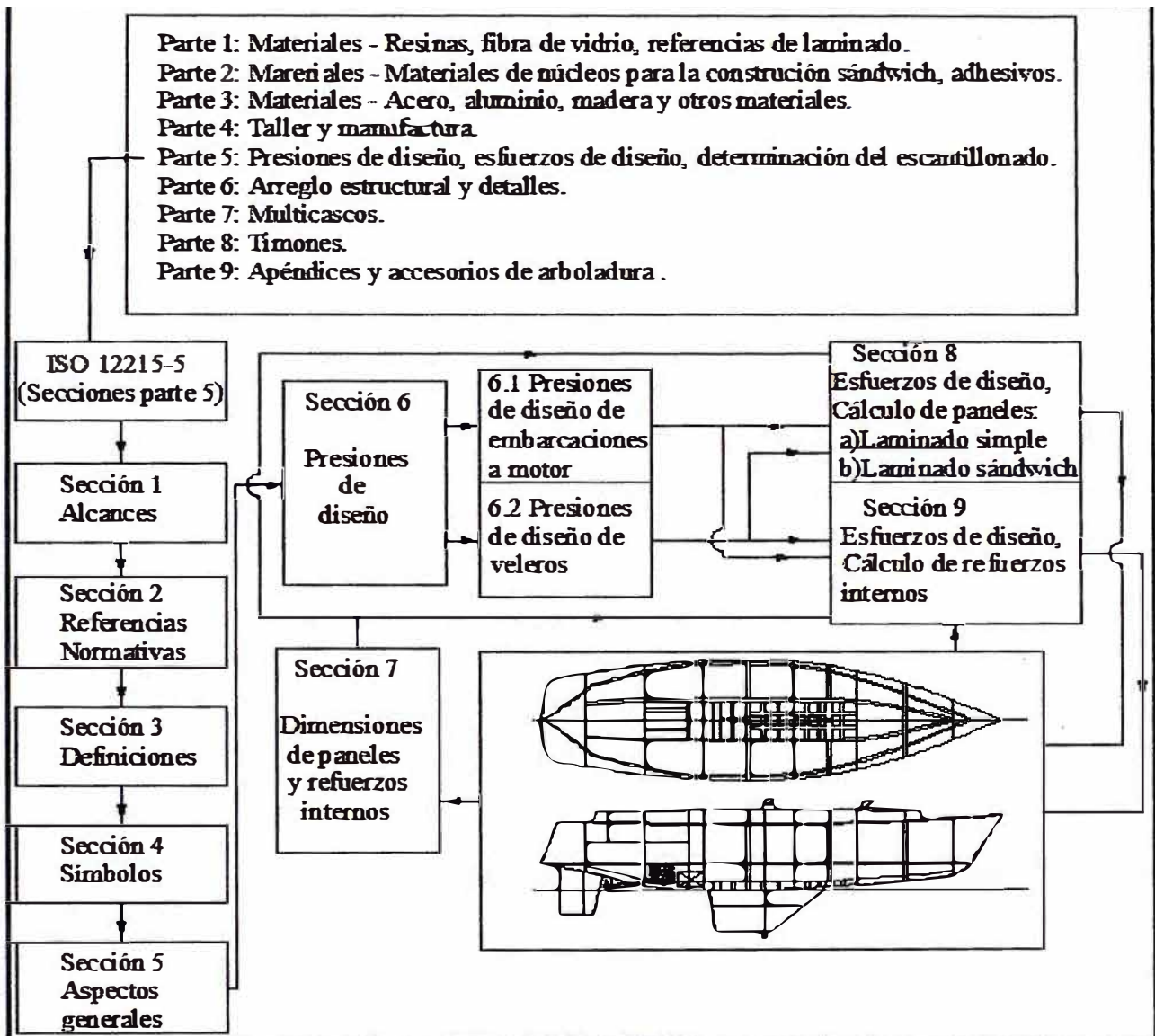


Fig.5.3 Partes de la ISO N° 12215 (cuadro superior) y secciones de la parte 5 (ISO N° 12215-5 [24]).

Centrándonos en la parte 5 y observando la Fig. 5.3, se pueden notar que dentro de los recuadros tenemos números circundados, del 1 al 9, que se refieren a secciones de las reglas ISO N° 12215-5 [24]. Las secciones 1, 2 describen los alcances y las referencias normativas, en la sección 3 se ordenan y verifican (según las definiciones usadas por las reglas ISO) las características

dimensionales de la embarcación y la categoría de diseño (A, B, C o D), ver Tabla 1.1. En la sección 4 se listan todos los símbolos, coeficientes y parámetros que se utilizan en la regla. La sección 5 establece los aspectos generales de la ISO, que reglas y recomendaciones de deben usar según sea el tipo y el tamaño de la embarcación. La sección 6 da los métodos para determinar las presiones de diseño en diversas partes de la embarcación a motor (sección 6.1) o velero (sección 6.2). La sección 7 cubre la determinación de las dimensiones de los paneles y refuerzos internos por calcular, según las particularidades de la ISO. La sección 8 da los esfuerzos de diseño (según el tipo de laminado, simple o sándwich) y la determinación del escantillonado de los paneles (según el tipo de laminado), de fondo costado y cubierta. La sección 9 da los esfuerzos de diseño y la determinación de las dimensiones y escantillonado de los perfiles de los refuerzos internos de fondo costado y cubierta. Antes de calcular los refuerzos internos debemos establecer la interacción entre el panel y refuerzos. Este medio es esencial para calcular el ancho efectivo del panel conectado al refuerzo [2].

Ninguna de las reglas de estandarización, ISO N° 12215-5 ni ABS [5], mencionan sobre el dimensionamiento de chainplates, pero recomiendan que éste deba ser suficientemente reforzado, ver Anexo E. La razón de esto podría ser que hay muchas maneras de calcular el escantillonado y que es prácticamente imposible cubrir todos los casos en un conjunto de reglas de estandarización [2].

PROPIEDADES		ABS	ISO _{mínimo}	ISO _{cálculo}		
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
				CSM	WR and MDR	Unidireccional (UD)
Resistencia a la tracción.	σ_{ut}	124	80	200.wf+25	200.wf+25	1800.wf ² -1400.wf+510
Módulo de tensión.	E_t	6890	6350	10 ³ .(15.wf+2)	10 ³ .(15.wf+2)	10 ³ .(130.wf ² -104.wf+39)
Resistencia a la compresión.	σ_{uc}	117	-	150.wf+72		-
Módulo de compresión.	E_c	6890	-	10 ³ .(40.wf-6)		-
Resistencia a la flexión.	σ_{uf}	172	135	502.wf ² +106.8		-
Módulo de flexión.	E_f	7575	5200	10 ³ .(33.4.wf ² +2.2)		-
Resistencia al corte perpendicular a la urdimbre.	τ_{uPPW}	75	50	80.wf+38		-
Resistencia al corte paralelo a la urdimbre.	τ_{uPMW}	62	50	80.wf+38		-
Módulo de corte paralelo a la urdimbre.	E_s	3100	-	10 ³ .(1.7.wf+2.24)		-
Resistencia al corte interlaminar.	τ_i	17.3	15	<i>Espesor de un pliego de fibra de vidrio, t_i :</i>		

Tipo de refuerzo	Contenido de fibra por peso, wf
Fieltros, laminado con spray	0.28
Fieltros, laminado a mano	0.3
Tejidos (WR)	0.48
Multidireccional (MDR)	0.55
Unidireccional (UD)	0.6

$$t_i = \frac{mf_i}{1000 \cdot Sf_i \cdot Sr_i} \cdot \left(\frac{Sf_i}{wf} - (Sf_i - Sr_i) \right) \quad (5.5)$$

$mf_i \rightarrow$ Contenido de fibra (g/m^2)

$Sf_i \rightarrow$ Peso específico de la fibra (kg/dm^3)

$Sr_i \rightarrow$ Peso específico de la resina (kg/dm^3)

$wf \rightarrow$ Relación, contenido de fibra por peso

Tabla.5.5 Propiedades de laminados básicos no probados; contenido de fibra por peso espesor de un pliego de fibra de vidrio [2].

5.3.1.2 Definiciones del casco.

Las abreviaciones, símbolos y parámetros usados en el cálculo del escantillonado se muestran en la Tabla 5.6 [24].

Símbolo	Unidades	Designación/significado del símbolo	Referencia/ artículo concerniente
Datos Principales			
A_s	m^2	Área de vela según ISO 8666	NA
B_C	m	Manga de codillo	Fig. 5.4
B_H	m	Manga del casco	Fig. 5.4
B_{WL}	m	Manga de flotación	Fig. 5.4, Tabla 1.1
L_H	m	Eslora del casco	Fig. 5.4, Tabla 1.1
T_c	m	Calado del casco	Fig. 5.4, Tabla 1.1
T_{cmin}	m	Calado mínimo del casco	Sección 5.3.2.2.2
V	nudos	Máxima velocidad en condición de máxima carga	Tabla 1.1
h_b	m	Altura de carga, mamparo estanco o mamparo tanque	Fig. 5.11, 5.12 y 5.13
h_{sc}	m	Altura de escantillonado sobre la línea de flotación	Fig. 5.9, 5.6
m_{LDC}	kg	Desplazamiento en condición de máxima carga (Δ)	Tabla 1.1
n_{cg}		Factor de carga dinámica	Ec. (5.7)
x	m	Distancia desde línea de flotación más a popa al punto medio del panel o refuerzo.	Sección 5.3.2.2.1
∇	m^3	Volumen de desplazamiento	Tabla 1.1
β	°	Astilla muerta de fondo	Sección 5.3.2.2.1

Dimensiones de paneles y refuerzos			
A_d	m^2	Área de diseño en cuestión	Ec. (5.13)
A_r	m^2	Área de referencia	Ec. (5.13)
b	mm	Ancho del panel	Tabla 5.8

b_e	mm	Ancho efectivo del panel conectado al refuerzo, también representado como “w”	Tabla 5.9
l	mm	Largo del panel	Tabla 5.8
c	mm	Altura de curvatura de un panel curvo	NA
s	m	Espacio entre refuerzos	Tabla 5.9
l_u	m	Longitud no soportada del refuerzo	Tabla 5.9
c_u	m	Altura de curvatura de un refuerzo curvo	Tabla 5.9

Datos de cálculo: Presiones, esfuerzos, coeficientes, parámetros			
$P_{bm \text{ base}}$	kN/m^2	Presión de fondo de una embarcación a motor sin factor de reducción	Ec. (5.6)
P_{bm}	kN/m^2	Presión de fondo de una embarcación a motor	Ec. (5.11)
P_{sm}	kN/m^2	Presión de costado de una embarcación a motor	Ec. (5.18)
$P_{sm \text{ min}}$	kN/m^2	Presión de costado mínima de una embarcación a motor	Ec. (5.19)
P_{dm}	kN/m^2	Presión de cubierta de una embarcación a motor	Ec. (5.26)
$P_{dm \text{ min}}$	kN/m^2	Presión de cubierta mínima de una embarcación a motor	Ec. (5.26)
$P_{sup \text{ m}}$	kN/m^2	Presión de superestructura de una embarcación a motor	NA
$P_{bs \text{ base}}$	kN/m^2	Presión de fondo de un velero sin factor de reducción	Ec. (5.15)
P_{bs}	kN/m^2	Presión de fondo de un velero	Ec. (5.16)
$P_{bs \text{ min}}$	kN/m^2	Presión de fondo mínima de un velero	Ec. (5.17)
P_{ss}	kN/m^2	Presión de costado de un velero	Ec. (5.23)
$P_{ss \text{ base}}$	kN/m^2	Presión de costado de un velero sin factor de reducción	NA
$P_{ss \text{ min}}$	kN/m^2	Presión de costado mínima de un velero	Ec. (5.24)
P_{ds}	kN/m^2	Presión de cubierta de un velero	Ec. (5.25)
$P_{ds \text{ base}}$	kN/m^2	Presión de cubierta de un velero sin factor de reducción	NA
$P_{ds \text{ min}}$	kN/m^2	Presión de cubierta mínima de un velero	Ec. (5.25)
$P_{sup \text{ s}}$	kN/m^2	Presión de superestructura de un velero	NA
P_{wb}	kN/m^2	Presión de diseño de contornos estancos	Ec. (5.27)
P_{tb}	kN/m^2	Presión de diseño de contornos de tanques	Ec. (5.28)
f_w	-	Factor de categoría de diseño	Tabla 1.1, Tabla 5.7

k_{ar}	-	Factor de reducción de área de diseño de una embarcación a motor	Tabla 5.9
K_B	-	Coefficiente de refuerzo de extremo fijo	Ec. (5.38)
k_d	-	Factor de reducción de área de diseño de un velero	Ec. (5.25)
k_{sa}	-	Factor de area de corte	Ec. (5.39)
k_d	-	Factor de reducción de presión en cubierta	NA
k_L	-	Factor de distribución de presión longitudinal	Tabla 5.10
$k_{sup m}$	-	Factor de reducción de presión en superestructura de una embarcación a motor	NA
$k_{sup s}$	-	Factor de reducción de presión en superestructura de un velero	NA
k_v	-	Factor de distribución de presión vertical	Fig. 5.9, 5.6
k_1	-	Coefficiente de rigidez a la flexión	Ec. (5.30)
k_2	-	Coefficiente en función de la relación de dimensiones de un panel para la resistencia a la flexión	Ec. (5.29)
k_3	-	Coefficiente en función de la relación de dimensiones de un panel para la rigidez a la flexión	Ec. (5.30)
k_4	-	Factor, según la ubicación, para el calculo del espesor mínimo de la capa interior o exterior	NA
k_5	-	Factor, según tipo de fibra, para el calculo del espesor mínimo de la capa interior o exterior	NA
k_6	-	Factor, según tipo de núcleo, para el calculo del espesor mínimo de la capa interior o exterior	NA
σ_d	N/mm^2	Esfuerzo a la de diseño	Tabla 5.17
σ_u	N/mm^2	Resistencia a la tensión, compresión o flexión	Tabla 4.8
τ_d	N/mm^2	Esfuerzo de corte de diseño	Tabla 5.17
τ_u	N/mm^2	Resistencia al corte	Tabla 4.8
w	kg/m^2	Masa de fibra de vidrio por superficie	Ec. 5.5
t	mm	Espesor del laminado	Tabla 5.9
ψ	-	Contenido de fibra por masa	Ec. (5.5)

Tabla 5.6 Símbolos y parámetros según las reglas ISO N° 12215-5 [24]. En la columna de referencia, NA significa no aplicado en esta tesis.

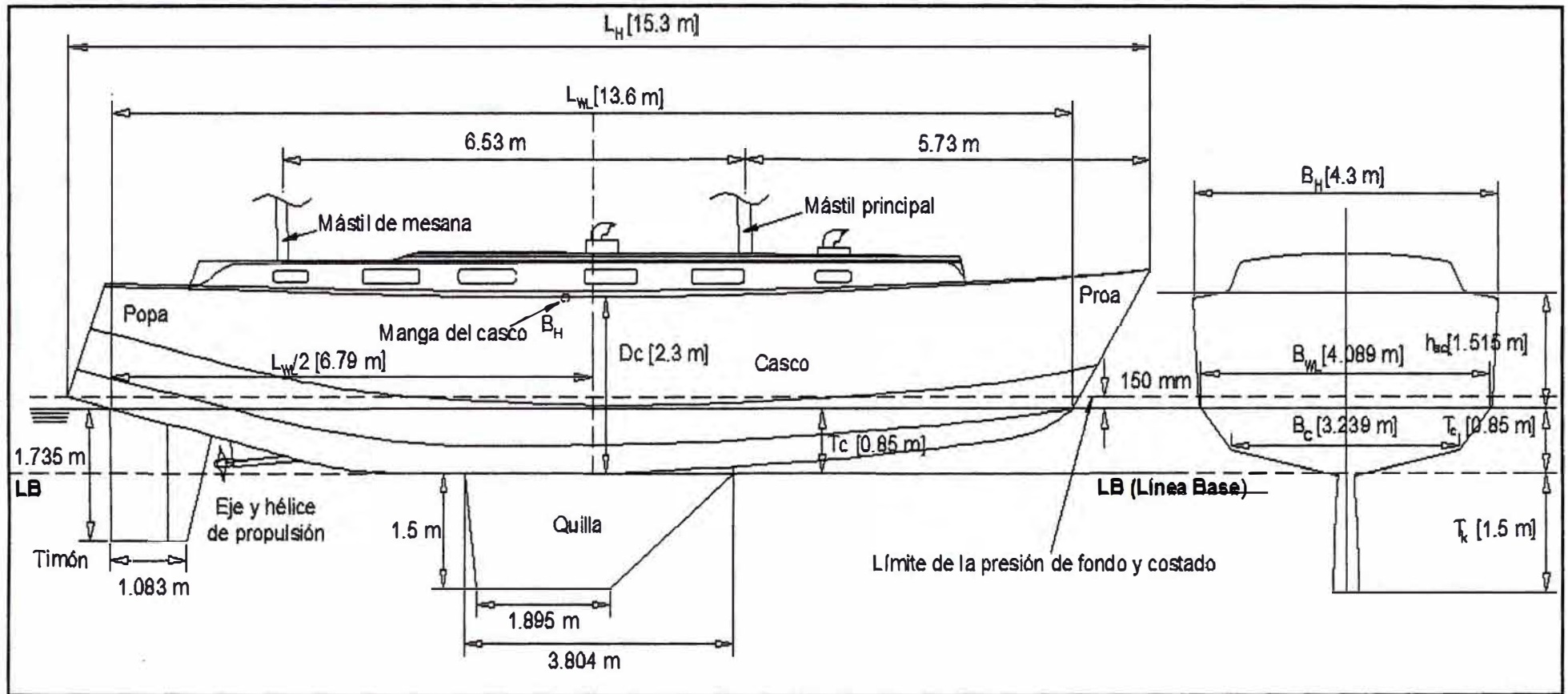


Fig.5.4 Características dimensionales fundamentales para el cálculo del escantillado, según la ISO N° 12225-5 [24].

5.3.1.3 Laminado Básico.

El laminado básico más usado, normalmente consiste de resina poliéster y capas alternadas de refuerzos tipo fieltros (CSM) y tejidos (Woven Roving) [2, 8, 9]. El contenido normal de refuerzo es aproximadamente entre el 30% y 35% del peso total del laminado. La Tabla 5.5 da las propiedades mecánicas mínimas del laminado usado por las reglas ABS [5] e ISO [24]. La razón de los bajos valores de este último, en comparación con la ABS, es porque puede permitir el uso de capas tipo fieltros únicamente o un moldeado usando spray, mientras que el ABS requiere un combinado de fieltros y tejidos en el laminado. En las columnas de la Tabla 5.5 se dan ecuaciones para calcular las propiedades reales de un laminado constituido de refuerzos (fieltros y tejidos) y resina (poliéster) siempre que una prueba de quemadura se realice para verificar el contenido de refuerzo. Si usamos un laminado de mejor calidad, de hecho utilizaremos mejores valores en las ecuaciones de escantillonado, siempre que sea verificado por pruebas. La Tabla 5.5, también da una fórmula para calcular el espesor de una capa o un específico tipo de refuerzo. Si diversos tipos de refuerzos se utilizan, que normalmente es el caso, calculamos el espesor de cada capa para luego encontrar el espesor total del laminado. Éste es el espesor medio, dado para los propósitos de diseño, pero el laminado real puede variar en 15% sobre o debajo del valor medio [2]. Cuando medimos espesores de laminados, las piezas no-estructurales (gelcoat y capas de recubrimiento de superficies de fieltros o telas que pesan menos de 300g por metro cuadrado) no deben ser incluidas en el cálculo del escantillonado [8].

5.3.2. Cargas de diseño según las reglas ISO N° 12215-5

En vista que el yate velero se diseñó para propulsarse, eficientemente, tanto a motor como a vela, entonces para el cálculo de la presión de diseño en general (presiones de fondo, costado, cubierta y superestructura) se tuvieron en cuenta las reglas de cálculo de presión para yates y veleros, por separado. Las ecuaciones de cálculo están estipuladas en la sección 6 de las reglas de estandarización de la ISO N° 12215-5 [24]. La presión relativa (P_r) se define como la mayor presión que se obtiene luego de evaluar las presiones del yate velero como si se tratase de un yate y velero, por separado (ver Tablas 5.8 y 5.9). Claro que el cálculo se hace más extenso, pero es necesario para cubrir los requerimientos de resistencia del yate velero a toda prueba, es decir, en cualquiera de las formas de propulsión. Es importante recalcar que las reglas ISO solo cubren los requerimientos de resistencia producidas por las cargas locales [24], aspectos relacionados a esta iniciativa de la ISO fueron correctamente sustentados en el capítulo 2, pero es evidente que en la mar un artefacto flotante cualquiera puede estar sometidos a sobrecargas que quizás comprometan la estructura.

5.3.2.1 Límites de aplicación de las reglas ISO N° 12215-5

Sin entrar en detalles, las reglas de estandarización de la ISO 12215-5 [24] cubren todas las embarcaciones a motor y a vela según los límites de aplicación que se muestran en las Figs. D.1 y D.2 del anexo D.

5.3.2.2. Presión relativa de diseño en el fondo del casco del yate velero

En particular, para calcular la presión relativa en el fondo se requiere previamente el cálculo de las presiones básicas de fondo del yate velero, primero como si fuese un yate propiamente ($P_{bm \text{ base}}$, ecuación (5.6)) y segundo como si fuese un velero ($P_{bs \text{ base}}$, ecuación (5.15)). Ambas presiones, afectados por los factores de reducción (k_{ar} , k_s , k_L , ecuaciones (5.13) y (5.14), f_w (Tabla 5.7)) según corresponda, dan origen a las presiones de fondo (P_{bm} y P_{bs}), ecuaciones (5.7) y (5.16), éstas son limitadas por sus mínimos correspondientes, ecuación (5.8) y (5.17). Finalmente el mayor de las presiones de fondo en el punto medio del área o refuerzo correspondiente, según sea su ubicación, será la presión relativa de diseño (P_r).

5.3.2.2.1 Presión de diseño en el fondo del casco del yate velero propulsado a motor.

La ecuación (5.6) [24] para el cálculo de $P_{bm \text{ base}}$, que se muestra a continuación, fue obtenida de trabajos de investigación desarrollados por Heller, S.R., Jasper, N.H. [18] para embarcaciones planeadoras de alta velocidad y propulsadas a motor, tal y como se menciona en el capítulo 2. Esta ecuación se utiliza para calcular la magnitud y la distribución de cargas en los paneles de fondo.

$$P_{bm \text{ base}} = \frac{0.1 \cdot m_{LDC}}{L_{WL} \cdot B_c} \cdot (1 + f_w n_{cg}) \quad (5.6)$$

Donde:

m_{LDC} : Desplazamiento en condición de máxima carga (kg), Tabla 1.1

L_{WL} : Eslora de flotación (m), Tabla 1.1

B_c : Manga de codillo (m), Fig. 5.4

n_{cg} : Factor de carga dinámica, ecuación (5.7)

f_w : Factor de categoría de diseño (Tabla 5.7)

Categoría de diseño	A	B	C	D
Valor de f_w	1	0,9	0,75	0,5

Tabla 5.7 Factor de categoría de diseño

La ecuación (5.6), descrita en el párrafo anterior, permite el cálculo de la presión básica de fondo $P_{bm \text{ base}}$. Como se puede ver, la ecuación está en función de un término que incluye al desplazamiento dividido por la eslora y la manga, es decir una presión hidrostática. A esta presión hidrostática entonces se agrega un factor dinámico, n_{cg} . Este factor de carga dinámica, ecuación (5.7), depende de la eslora, manga, astilla muerta, categoría de diseño, velocidad y desplazamiento de la embarcación [2,24].

$$n_{cg} = 0.32 \left(\frac{L_{WL}}{10.B_C} + 0.084 \right) (50 - \beta) \frac{V^2 . B_C^2}{m_{LDC}} \quad (5.7)$$

Donde:

- V : Velocidad máxima del yate velero, no menor que $2.36\sqrt{L_{WL}}$
(nudos), Tabla 1.1
- β : Astilla muerta de fondo (12°)

Para embarcaciones rápidas y pequeñas, la ecuación (5.7), da valores de n_{cg} demasiado altos, así que se ha desarrollado la ecuación (5.8) [2] para no sobrestimar el factor de carga dinámica (n_{cg}). Esta ecuación depende de la velocidad y eslora de flotación. El menor valor de las ecuaciones (5.7 y 5.8) debe ser utilizado.

$$n_{cg} = 1.39 + 0.256 \frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \quad (5.8)$$

El factor de carga dinámica (n_{cg}), adicionalmente, tiene algunos límites que dependen de la eslora total de la embarcación (L_H , Tabla 1.1) [2], éstos se muestran en las ecuaciones (5.9) y (5.10) [2].

$$n_{cgmax} = 6 \quad (5.9)$$

$$n_{cgmin} = \left\{ \begin{array}{ll} 2 & (\text{para } L_H < 12m) \\ 2 - \frac{L_H}{12} & (\text{para } 12m \leq L_H < 24m) \end{array} \right\} \quad (5.10)$$

Considerando todos los criterios descritos anteriormente y teniendo en cuenta las características generales del Yate Velero UNI (Tabla 1.1); al ser evaluadas las formulaciones anteriores, los valores del factor de carga dinámica son 1.73 y 1.95, luego, según lo mencionado en párrafos anteriores, el valor final que adopta n_{cg} es 1.73. Este valor al ser evaluado en la ecuación (5.6) da una presión básica de fondo, $P_{bm \text{ base}}$, de **96.47 kN/m²**. A continuación se mostrarán las ecuaciones para el cálculo de la presión de fondo afectada de los factores de reducción P_{bm} , ecuación (5.11) [24], así como también la presión de fondo mínima $P_{bm \text{ min}}$, ecuación (5.12) [24].

$$P_{bm} = P_{bm \text{ base}} \cdot k_{ar} \cdot k_L \quad (5.11)$$

$$P_{bm \text{ min}} = 10 \cdot \left(T_c + \frac{L_H}{17} \cdot f_w \right) \quad (5.12)$$

Donde:

$P_{\text{bm base}}$: Presión base de fondo sin considerar factores de reducción (kN/m^2)

ecuación (5.6)

k_{ar} : Factor de reducción de área, ecuación (5.13) o Fig. D.3 (anexo D)

k_L : El factor de distribución de impacto longitudinal, ecuación (5.14) o Fig. D.4 (anexo D)

T_c : Calado en la condición de máxima carga (m), Tabla 1.1

El factor de reducción de área (k_{ar}) es un factor que podría no ser entendido a simple vista [2]. La razón de su existencia se debe a que cuando uno calcula la presión de diseño, ésta es considerada estática [2], pero hay altas presiones producto de los pantocazos que la embarcación debe soportar en un área reducida y por un corto periodo de tiempo. Así, reduciendo adecuadamente las dimensiones de los paneles o aumentando los refuerzos interiores asociados al panel, se salvaguardará la estructura del casco, pues la presión de diseño disminuirá notablemente. Las reglas ISO N° 12215-5 [24] adoptaron la ecuación (5.13) o la Fig. D.3 (anexo D), para el cálculo de k_{ar} .

$$k_{ar} = 1.35 \cdot \left[0.455 - 0.35 \cdot \left(\frac{u^{0.75} - 1.7}{u^{0.75} + 1.7} \right) \right]; u = 100 \cdot \frac{A_d}{A_r} \quad (5.13)$$

Donde:

k_{ar} : Factor de reducción de área de diseño en función de la relación “u”

- No debe ser menor a 0.4, cuando se usa en cálculos de resistencia al corte en paneles (núcleo del laminado tipo sándwich) y en todos los casos en que $\frac{x}{L_{WL}} \geq 0.6$ (ver ecuación anterior)
- No debe ser menor a 0.25, cuando se realizan cálculos de resistencia a la flexión (laminado simple)

A_d : Área de diseño [2] (m^2);

: Área real del panel en cuestión, el A_d máximo es $2 \cdot b^2$ (m^2)

: Para refuerzos, A_d es $l \cdot s$; el A_d mínimo es $0.33 \cdot l$ (m^2)

A_r : Área de referencia [2], $0.36 A_{WL}$ (m^2)

A_{WL} : Área de la superficie de flotación (m^2), Tabla 1.1

b : Ancho del panel en cuestión (m)

s : Espacio de separación entre refuerzos (m)

l : Longitud no soportada del refuerzo en cuestión (m)

El factor de distribución de impacto longitudinal (k_L) es otro de los parámetros fundamental en el cálculo de la presión de diseño, este factor se puede calcular usando la ecuación (5.14) o la Fig. D.4 (anexo D).

$$k_L = 0.13 \left[\left(0.35 \cdot \frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \right) + 4.14 \right]; \frac{x}{L_{WL}} \geq 0.25 \quad (5.14)$$

$$k_L = 1; \frac{x}{L_{WL}} \geq 0.6$$

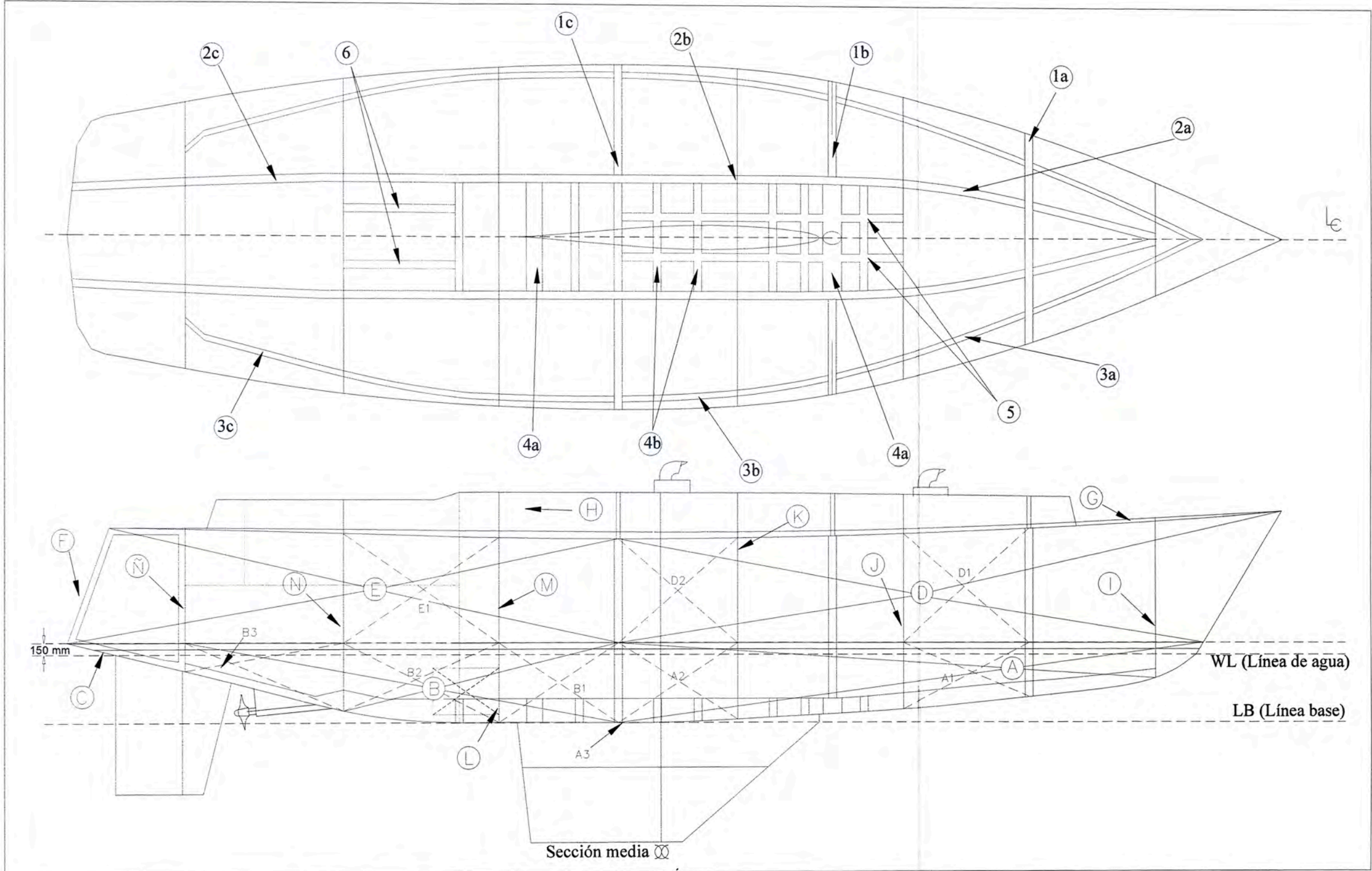


Fig. 5.5 Paneles y estructuras internas (refuerzos), donde se calcularon las presiones relativas (P_r), previo al cálculo de los escantillonados.

Donde:

x : Posición longitudinal medida desde el punto más extremo a popa de la línea de flotación hacia un punto de la misma (m)

5.3.2.2.2 Presión de diseño en el fondo del casco del yate velero propulsado a vela.

Para una embarcación a vela calculamos la presión básica de fondo $P_{bs\ base}$ [2,24], según la ecuación (5.15), que se describe a continuación.

$$P_{bs\ base} = 11.76.(3.T_c + 0.16.L_{WL} + 1.62) \quad (5.15)$$

Esta presión, ecuación (5.15), depende del calado del casco de la embarcación (presión hidrostática), de la eslora (presión de velocidad) y una constante. Luego de realizar los cálculos la presión básica de fondo, $P_{bs\ base}$, es **74.06 kN/m²**. A continuación se mostrarán las ecuaciones para el cálculo de la presión de fondo afectada de los factores de reducción (k_L , k_s), P_{bs} , ecuación (5.16) [24], así como también la presión de fondo mínima $P_{bs\ min}$, ecuación (5.17) [24].

$$P_{bs} = P_{bs\ base} \cdot k_s \cdot k_L \cdot f_w \quad (5.16)$$

$$P_{bs\ min} = 10T_c + 0.83.L_H \cdot f_w \quad (5.17)$$

Donde:

T_c : Calado en la condición de máxima carga, no menor a: $T_{cmin} = 0.062.L_{WL}-0.26$ (m). Tabla 1.1

k_s : Factor de reducción de área; se adoptó la versión anterior de la ISO descrita en la bibliografía de Larson L. & Eliasson R.E. [2] , donde k_s era k_{ar} , pues lo que estipula la ISO N° 12215-5 [24], carece de coherencia. Se usó la ecuación (5.13) o la Fig. D.3 (anexo D)

Con el cálculo de las presiones de fondo del yate velero, se obtuvieron las presiones relativas de diseño del fondo, según sea el área donde se realizaron los cálculos (Tabla 5.84 y 5.9). Estas áreas, que se muestran en la Fig. 5.5, se definieron en base a la disposición preliminar de refuerzos que se mostró en la Fig. 3.5.

5.3.2.3. Presión relativa de diseño en el costado del casco del yate velero

El procedimiento de cálculo para la presión relativa de diseño en el costado del casco, es similar a los cálculos realizados para el fondo del casco. Las ecuaciones de interés para los cálculos, al igual que en fondo del casco, fueron propuestas por la ISO N° 12215-5 [24].

5.3.2.3.1 Presión de diseño en el costado del casco del yate velero propulsado a motor.

Para calcular la presión básica de costado del yate velero cuando es propulsado a motor, se usó la ecuación (5.18). La presión básica de costado del yate velero propulsado a motor tiene sus límites correspondientes que se muestran en las ecuaciones (5.19) y (5.20).

$$P_{sm} = 10 \cdot f_w \cdot h_{sc} \cdot k_v + 0.2 \cdot P_{bm\ base} \cdot k_{ar} \cdot k_L \quad (5.18)$$

$$P_{sm\ min} = [0.18 \cdot L_{WL} + 2.37] \cdot f_w \quad (5.19)$$

$$P_{sm\ max} = P_{bm\ base} \cdot k_{ar} \cdot k_L \quad (5.20)$$

Donde:

$P_{bm\ base}$: Presión base de fondo sin considerar factores de reducción (kN/m^2)
ecuación (5.6)

k_v : Factor de distribución de presión vertical. Este factor deberá entenderse como un factor de distribución de carga o presión vertical, desde el límite entre fondo y costado hasta cubierta, ver ecuación (5.21) y Fig. D.5 (anexo D)

$$k = \frac{z-h}{\quad} \quad (5.21)$$

Donde:

z, h : medidas tomadas en el plano longitudinal o transversal, ver Fig. D.2 o Fig. D.5, para poder ser halladas se necesita, previamente, el cálculo de la altura de escantillonado sobre la línea de flotación, h_{sc} .

h_{sc} : Altura de escantillonado sobre la línea de flotación (m), se calcula mediante la ecuación (5.22) y luego se grafica en el plano longitudinal como se muestran en la Fig. D.2 o Fig. D.5 (anexo D), según sea el caso.

$$h_{sc} = \frac{L_H}{17}, \quad (5.22)$$

5.3.2.3.2 Presión de diseño en el costado del casco del yate velero propulsado a vela.

Para calcular la presión básica de costado del yate velero cuando es propulsado a vela, se usó la ecuación (5.23) [24]. Esta presión tiene su mínimo correspondientes que se muestran en las ecuaciones (5.24) [24]

$$P_{ss} = \left[(P_{ss \min} + k_v (P_{bs \text{ base}} - P_{ss \min})) \right] f_w \cdot k_s \cdot k_L \quad (5.23)$$

$$P_{ss \min} = 10T_c + 0.83 \cdot L_H \cdot f_w \quad (5.24)$$

Donde:

$P_{bs \text{ base}}$: Presión base de fondo del yate velero propulsado a vela, sin considerar factores de reducción (kN/m^2), ecuación (5.6).

k_s : Factor de reducción de área; se adoptara la versión anterior de la ISO descrita en la bibliografía de Larson L. & Eliasson R.E. [2] , donde k_s era k_{ar} , pues lo que estipula la ISO N° 12215-5 [24] del año 2004, carece de coherencia. Se usó la ecuación (5.13) o la Fig. D.3 (anexo D)

5.3.2.4 Presión relativa de diseño de cubierta del yate velero

La presión relativa de diseño para la cubierta superior y la cabina frontal, P_{ds} , área G (ver Fig. 5.5), son directamente proporcionales a la eslora total de la embarcación. Para la tapa, los costados y bordes de la cabina, área H (ver Fig. 5.5), se establece P_{dmin} según las ecuaciones (5.25) y (5.26); estas ecuaciones son

para veleros y yates, respectivamente y fueron propuestas por las reglas ISO N° 12215-5 [24].

$$\begin{aligned} P_{ds} &= f_w \cdot K_d \cdot (0,37 \cdot L_H + 18,3) \\ P_{ds \min} &= 5 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Donde:

k_d : Factor de reducción de presión en cubierta, no puede exceder a 1.

- $K_d = 1.1 - \frac{0,4 \cdot b}{1000}$; $K_d = 0.6$, se usó el mayor valor de ambos para el cálculo de paneles de cubierta y superestructura.
- $K_d = 1.1 - 0.4I$; $K_d = 0.33$, se usó el mayor valor de ambos para el cálculo de refuerzos de cubierta y superestructura.

b : Ancho del panel de cubierta(m)

l : Longitud no soportada del refuerzo en cubierta (m)

$$\begin{aligned} P_{dm} &= f_w \cdot K_d \cdot (0,3 \cdot L_H + 14,6) \\ P_{dm \min} &= 5 \end{aligned} \quad (5.26)$$

Debe hacerse notar que los parámetros para la ecuación (5.25) son las mismas que para la ecuación (5.26).

Para calcular la presión relativa de diseño en cubierta, a diferencia de las presiones básicas de fondo y costado, las ecuaciones ya tienen incluida el factor de reducción de presión en cubierta. Finalmente, para el cálculo de la presión relativa en el área G (ver Fig. 5.5) el mayor de ambas presiones, que son función de la eslora, será tomado en cuenta (ver Tabla 5.8); en el caso del área H, según las ISO 12215-5 [24], el mayor de ambas presiones mínimas será tomado en cuenta, es decir, 5 kN/m^2 (valor constante).

5.3.2.5 Presión relativa de diseño de mamparos del yate velero

Mamparos estructurales, mamparos estancos y todos los mamparos de tanques, se diseñan en base a la presión relativa de diseño que se muestra en las ecuaciones (5.27) y (5.28) [24], ver Fig. 5.6 y 5.7 [24]. Los mamparos estructurales que no forman parte limítrofe de un tanque, pueden ser calculados como mamparos estancos (usando la ecuación (5.27)) o como bulárcamas equivalentes en resistencia, Fig. 5.8. El mamparo de colisión no puede tener menor presión de diseño que el calculado para los mamparos de tanques, ecuación (5.28). Las ecuaciones que se muestran a continuación son válidas tanto para veleros como para yates.

$$P_{wb} = 7,2 \cdot h_b \quad (5.27)$$

$$P_{tb} = 11,2 \cdot h_b \quad (5.28)$$

Donde:

h_b : Altura de agua(m), definido en Tabla 5.6

- Para paneles, ver Figs. 5.6.A y 5.7.A
- Para refuerzos, Figs. 5.6.B y 5.7.B

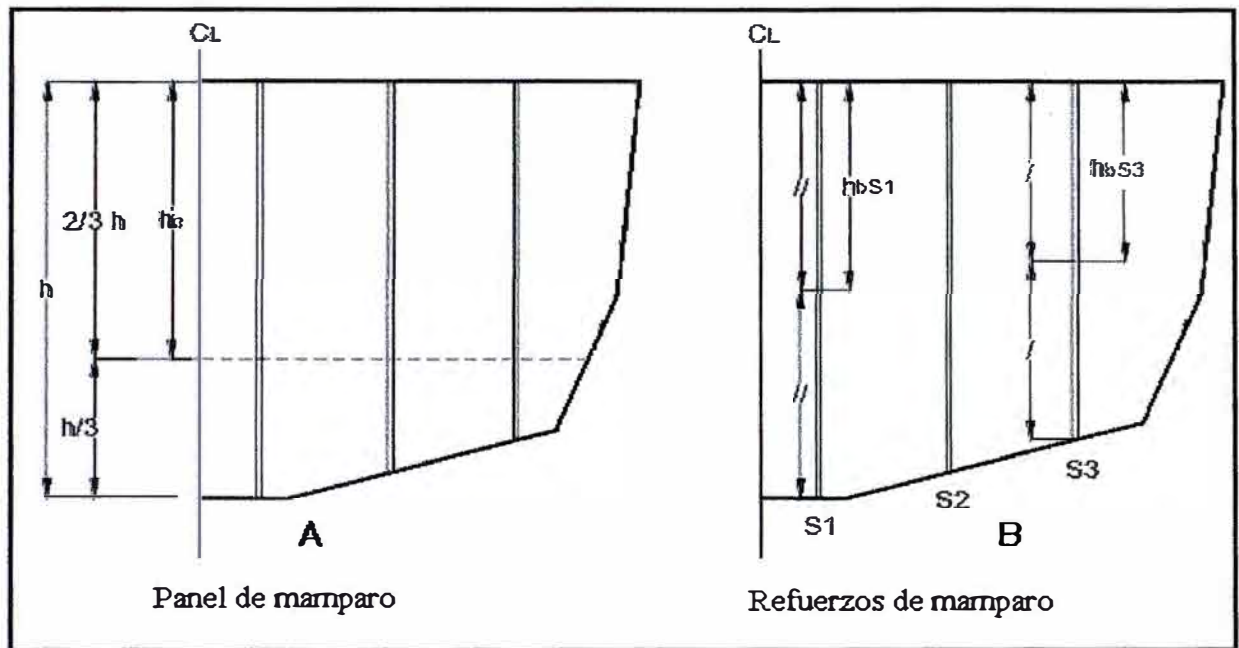


Fig. 5.6 Altura de agua, previo al cálculo de la presión de diseño de paneles y refuerzos, h_b [24].

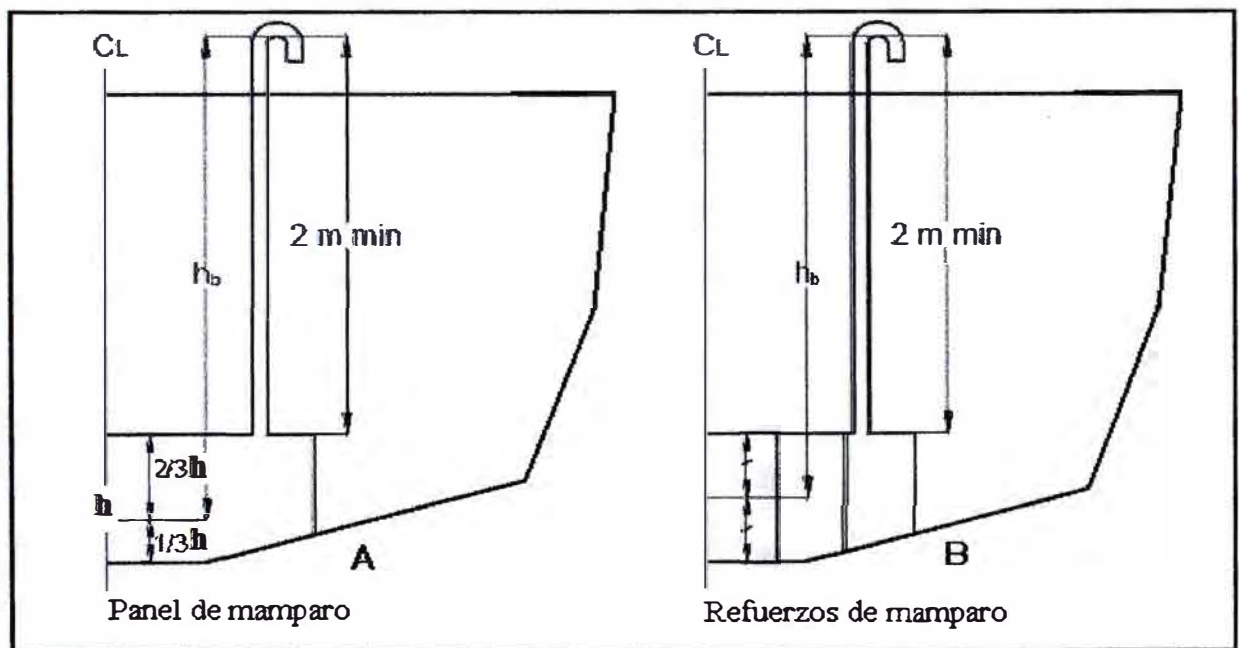


Fig. 5.7 Medidas o dimensiones para el cálculo de la presión de diseño de mamparos de tanque [24].

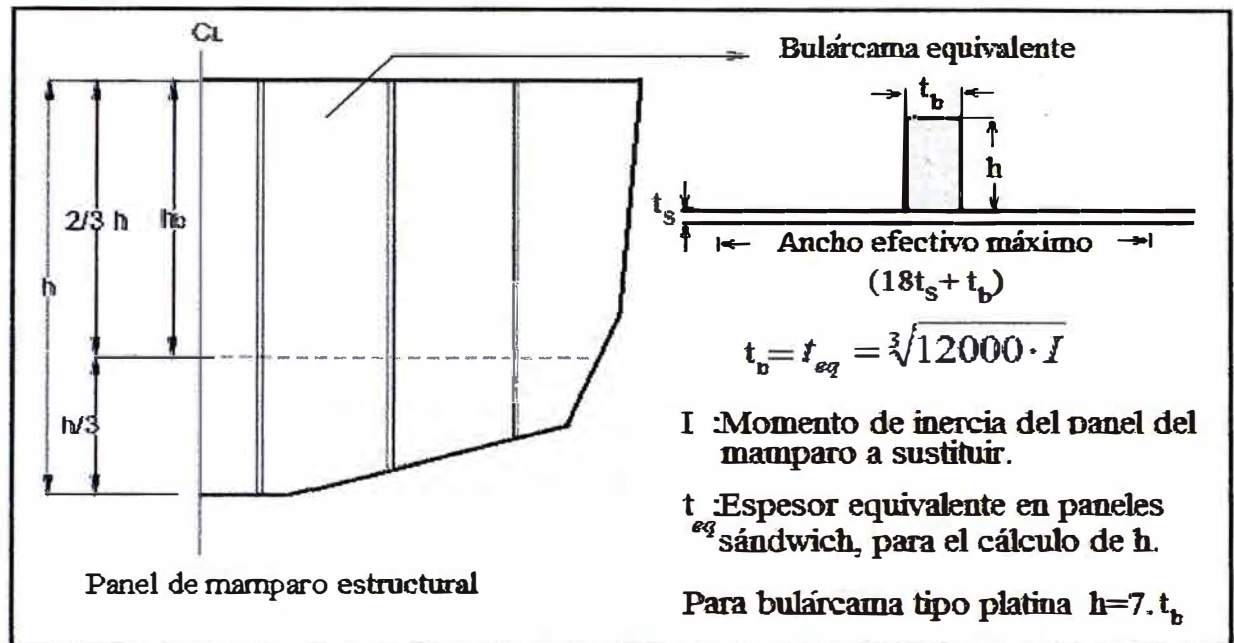


Fig. 5.8 Resistencia equivalente entre un mamparo estructural y una bulárcama [2].

Las cargas o presiones relativas de diseño, para los panes y refuerzos interiores, se calcularon de las presiones de diseño formuladas anteriormente, según corresponda y teniendo en cuenta la localización apropiada. Esta presión relativa se aplica en la mitad de la longitud de los refuerzos o al centro de los paneles [2,24]. El resumen de todos estos cálculos se encuentra en las Tabla 5.8 y 5.9.

PRESIONES RELATIVAS SOBRE LOS REFUERZOS DEL YATE VELERO UNI (kN/m ²)												
Refuerzo	l_u (m)	s (m)	u	k_{ar}	x (m)	k_L	z (m)	h (m)	k_v	P_m	P_s	P_r
Cuaderna, 1a	2.14	1.60	26.5	0.3	11.50	1.0	1.4	0.5	0.6	14.16	21.20	21.20
Cuaderna, 1b	2.39	1.80	33.3	0.3	9.00	1.0	1.3	0.1	0.9	16.63	21.20	21.20
Cuaderna, 1c	2.55	1.40	27.6	0.3	6.30	0.9	1.3	0.0	1.0	17.25	21.20	21.20
Longitudinal de fondo, 2a	1.60	0.74	9.2	0.4	10.67	1.0	NA	NA	1.0	35.98	27.73	35.98
Longitudinal de fondo, 2b	3.00	1.12	25.9	0.3	7.60	1.0	NA	NA	1.0	25.48	21.20	25.48
Longitudinal de fondo, 2c	1.97	0.79	12.0	0.3	1.82	0.3	NA	NA	1.0	17.50	21.20	21.20
Longitudinal de costado, 3a	1.60	1.18	14.6	0.3	10.67	1.0	1.4	0.1	0.9	19.02	22.27	22.27
Longitudinal de costado, 3b	1.35	1.43	14.9	0.3	7.60	1.0	1.3	0.1	0.9	17.98	22.00	22.00
Longitudinal de costado, 3c	1.97	1.34	20.4	0.3	1.82	0.3	1.3	0.1	0.9	9.22	21.20	21.20
Varengas, 4a	1.48	0.35	4.0	0.5	9.35	1.0	NA	NA	1.0	47.94	36.95	47.94
Varengas, 4b	1.48	0.51	5.8	0.4	4.77	0.7	NA	NA	1.0	30.82	23.75	30.82
Refuerzos longitudinales, 5	1.35	0.49	5.1	0.5	0.81	0.2	NA	NA	1.0	17.50	21.20	21.20
Carlingas del motor, 6	1.45	0.50	5.6	0.4	3.53	0.6	NA	NA	1.0	24.24	21.20	24.24
Bao de la cuaderna 1a	2.45	1.60	30.3	0.3	11.50	NA	NA	NA	NA	7.91	7.91	7.91
Bao de la cuaderna 1b	3.73	1.95	56.2	0.3	9.00	NA	NA	NA	NA	7.91	7.91	7.91
Bao de la cuaderna 1c	4.10	1.40	44.4	0.3	6.30	NA	NA	NA	NA	7.91	7.91	7.91
Refuerzo de mamparo I	1.10	1.00	$P_m=P_s=11.2*hb$ (ver Fig. 5.7)							7.39	7.39	7.39
Refuerzo de mamparo J	2.55	1.09	$P_m=P_s=7.2*hb$ (ver Fig. 5.6)							9.14	9.14	9.14
Refuerzo de mamparo K	2.63	1.34	$P_m=P_s=7.2*hb$ (ver Fig. 5.6)							9.36	9.36	9.36
Refuerzo de mamparo M	2.69	1.34	$P_m=P_s=7.2*hb$ (ver Fig. 5.6)							9.72	9.72	9.72

Refuerzo de mamparo Ñ	1.82	1.05	Pm=Ps=11.2*hb (ver Fig. 5.7)							10.19	10.19	10.19
Refuerzo de espejo de popa	1.52	1.45	17.1	0.3	1.82	0.3	1.3	0.1	0.9	9.76	21.20	21.20
Refuerzo de fondo del panel C	1.49	1.00	11.6	0.3	1.82	0.3	NA	NA	1.0	17.50	21.20	21.20
Varenga de la cuaderna 1a	1.00	0.84	6.5	0.4	11.50	1.0	NA	NA	1.0	40.65	31.33	40.65
Varenga de la cuaderna 1b	1.48	1.80	20.6	0.3	9.00	1.0	NA	NA	2.0	27.35	21.20	27.35
Varenga de la cuaderna 1c	1.48	1.40	16.0	0.3	6.30	0.9	NA	NA	3.0	27.60	21.27	27.60
Bulárcama equivalente mamparo J	1.62	1.25	15.7	0.3	11.50	1.0	1.4	0.5	0.6	15.08	21.20	21.20

Tabla 5.9 Cálculo de la presión relativa de diseño de refuerzos interiores, complementar con Fig. 5.5

5.3.3. Cálculo del escantillonado del yate velero

5.3.3.1 Cálculo de paneles

Una vez calculado las presiones relativas de diseño en los paneles (ver Tabla 5.8) es relativamente sencillo calcular el escantillonado de los laminados tipo sándwich, pero un paso previo es calcular el escantillonado usando las ecuaciones de laminados simples, ecuaciones (5.29) y (5.30) [24], las razones radican en: a) la simplificación del cálculo de los refuerzos internos, más específicamente el cálculo de los anchos efectivos (ver Fig. 5.10) [2] y b) en la selección adecuada de los espesor de las capas y núcleo del laminado sándwich, pese a que las reglas ISO 12215-5 [24], estipulan espesores mínimos correspondientes para cada capa, ecuaciones (5.31), (5.32) y (5.33) [2]. El requerimiento de espesor en la ecuación (5.29) está relacionado con la resistencia y el de la ecuación (5.30) con la rigidez, se usó el mayor de ambos espesores, según lo estipulado por las reglas ISO [24]. Normalmente cuando se usa PRF el requerimiento de rigidez es el factor de dimensionamiento (ver columna de espesores “ t_2 ” en Tabla 5.15), debido, relativamente, a un bajo módulo de la elasticidad en flexión del PRF [2].

$$t_1 = b \cdot f_k \cdot \sqrt{\frac{P_r \cdot k_2}{1000 \cdot \sigma_d}} \quad (5.29)$$

$$t_2 = b \cdot f_k \cdot \sqrt[3]{\frac{P_r \cdot k_3}{1000 \cdot k_1 \cdot E_F}} \quad (5.30)$$

$$t_{\min}(\text{fondo}) = f_1 \cdot (3 + 0,5 \cdot L_H + 0,06 \cdot V_{\max} + 0,2 \cdot m^{0,33}) \quad (\text{mm}) \quad (5.31)$$

$$t_{\min}(\text{costado}) = f_1 \cdot (3 + 0,5 \cdot L_H + 0,2 \cdot m^{0,33}) \quad (\text{mm}) \quad (5.32)$$

$$t_{\min}(\text{cubierta}) = f_1 \cdot (2 + 0,2 \cdot L_H) \quad (\text{mm}) \quad (5.33)$$

Donde:

t_1 : Espesor para cubrir requerimientos de resistencia (mm)

t_2 : Espesor para cubrir requerimientos de rigidez (mm)

P_r : Presión relativa de diseño en paneles según sea su ubicación (kN/m²), ver Tabla 5.8

k_2, k_3 : Definidos en la Tabla 5.6, ver Tabla 5.12

k_1 : Coeficiente de rigidez a la flexión en laminado simple (0.047)

b : Definido en la Tabla 5.6 (m)

f_k : Factor de corrección por curvatura, ver Tabla 5.10 y Fig. D.6, anexo D.

c_u : Altura de curvatura de un refuerzo curvo, ver Fig. D.6, anexo D.

σ_d : Esfuerzo de diseño de paneles, ver Tabla 5.11

f_1 : Factor de reducción del material, $(f_1 = \sqrt{\frac{130}{\sigma_{yf}}})$

σ_{yf} : Resistencia a la flexión, ver Tabla 4.8

m : Desplazamiento en condición de máxima carga (kg), ver Tabla 1.1

L_H : Eslora total de la embarcación (m), ver Tabla 1.1

V_{\max} : Velocidad máxima (nudos), ver Tabla 1.1

PRESIONES RELATIVAS SOBRE LOS PANELES DEL YATE VELERO UNI (kN/m ²)					Laminado simple							Laminado sándwich																		
Elemento	Localización (ver Fig. 5.5)	l _u (m)	s (m)	P _r	k ₂	k ₃	t ₁ mm	t ₂ mm	t _{min} mm	t mm	SM _g cm ³	SM _j cm ³	I cm ⁴	t _{os min} mm	t _{is min} mm		Requerimiento, según las reglas ISO 12215-5							Escantillonado actual						
																	(kg/m ³)	(MPa)	d _o +d _c >	d _o mm	d _c mm	t _{oe} mm	t _{oi} mm	t _c mm	SM ₃ cm ³	I cm ⁴	V _o B _o			
Panel A1	Fondo: de 60% LWL hasta 100% LWL	1.25	1.06	55.86	0.38	0.02	14.23	13.99	12.23	14.2	0.51	0.51	0.54	2.76	1.97	0.45	120	1.7	62.65	35	29.00	3.50	2.50	29.00	0.75	1.50	ok			
Panel A2	Fondo: de 50% LWL hasta 60% LWL	1.66	1.50	38.66	0.35	0.02	16.18	16.93	12.23	16.9	0.66	0.66	0.96	2.76	1.97	0.44	120	1.7	59.76	33	27.00	3.50	2.50	27.00	0.70	1.32	ok			
Panel A3	Fondo: alrededor de la quilla	1.50	0.74	38.02	0.50	0.03	9.48	9.90	12.23	12.2	0.23	0.23	0.19	2.76	1.97	0.50	120	1.7	33.25	33	27.00	3.50	2.50	27.00	0.70	1.32	ok			
Panel B1	Fondo: de 37.5% LWL hasta 50% LWL	1.64	1.50	32.00	0.35	0.02	14.61	15.79	12.23	15.8	0.54	0.54	0.78	2.76	1.97	0.44	120	1.7	49.22	28	22.00	3.50	2.50	22.00	0.58	0.92	ok			
Panel B2	Fondo: de 25% LWL hasta 37.5% LWL	2.00	1.60	23.32	0.40	0.02	14.27	16.21	12.23	16.2	0.51	0.52	0.85	2.76	1.97	0.46	100	1.4	49.02	28	22.00	3.50	2.50	22.00	0.58	0.92	ok			
Panel B3	Fondo: de 12.5% LWL hasta 25% LWL	2.00	1.45	21.20	0.43	0.02	12.82	14.78	12.23	14.8	0.41	0.42	0.64	2.76	1.97	0.47	100	1.4	41.68	26	20.00	3.50	2.50	20.00	0.53	0.78	ok			
Panel C	Fondo: limera, más a popa de LWL	1.45	1.00	21.20	0.45	0.02	8.98	10.35	12.23	12.2	0.20	0.20	0.22	2.76	1.97	0.48	100	1.4	29.11	21	16.00	3.00	2.00	16.00	0.34	0.43	ok			
Panel D1	Costado: de 60% LWL hasta 100% LWL	1.60	1.36	21.20	0.38	0.02	11.24	12.98	11.84	13.0	0.32	0.32	0.43	2.51	1.79	0.45	100	1.4	37.01	21.5	16.00	3.00	2.50	16.00	0.42	0.50	ok			
Panel D2	Costado: de 50% LWL hasta 60% LWL	1.50	1.36	21.20	0.35	0.02	10.84	12.54	11.84	12.5	0.30	0.30	0.39	2.51	1.79	0.44	100	1.4	36.02	26	20.00	3.50	2.50	20.00	0.53	0.78	ok			
Panel E1	Costado: de 0% LWL hasta 50% LWL	2.00	1.27	21.20	0.46	0.03	11.65	13.43	11.84	13.4	0.34	0.34	0.48	2.51	1.79	0.49	100	1.4	37.55	21.5	16.00	3.00	2.50	16.00	0.42	0.50	ok			
Panel F	Costado: espejo de popa	1.52	1.45	21.20	0.33	0.02	11.19	12.98	11.84	13.0	0.32	0.32	0.43	2.51	1.79	0.43	100	1.4	37.59	21.5	16.00	3.00	2.50	16.00	0.42	0.50	ok			
Panel G	Cubierta: altura de mamparo de colisión	2.65	1.60	14.38	0.47	0.03	12.22	15.01	3.77	15.0	0.38	0.38	0.67	2.51	1.79	0.49	80	1	45.24	26	20.00	3.50	2.50	20.00	0.53	0.78	ok			
Panel H	Cubierta: altura de la sección media	2.64	1.40	5.00	0.49	0.03	6.42	9.42	3.77	9.4	0.10	0.10	0.17	2.51	1.79	0.50	60	0.7	19.95	15	10.00	3.00	2.00	10.00	0.19	0.19	ok			
Panel I	Mamparo de colisión de proa	1.10	1.00	14.83	0.35	0.02	5.95	8.17	NA	8.2	0.11	0.11	0.11	2.51	1.79	0.44	80	1	25.91	15	10.00	3.00	2.00	10.00	0.19	0.19	ok			
Panel J	Mamparo estructural	2.55	1.09	12.96	0.50	0.03	7.26	10.14	NA	10.1	0.17	0.17	0.21	2.51	1.79	0.45	80	1	25.31	21	16.00	3.00	2.00	16.00	0.34	0.43	ok			
Panel K	Mamparo estructural	2.80	1.45	12.96	0.49	0.03	9.60	13.43	NA	13.4	0.29	0.29	0.48	2.51	1.79	0.50	80	1	37.55	21.5	16.00	3.00	2.50	16.00	0.42	0.50	ok			
Panel L	Mamparo estructural de tanque	1.14	0.53	22.96	0.50	0.03	4.70	5.96	NA	6.0	0.07	0.07	0.04	2.51	1.79	0.49	80	1	23.97	15	10.00	3.00	2.00	10.00	0.19	0.19	ok			
Panel M	Mamparo estructural	2.69	1.45	13.46	0.49	0.03	9.75	13.54	NA	13.5	0.30	0.30	0.49	2.51	1.79	0.50	80	1	38.90	21.5	16.00	3.00	2.50	16.00	0.42	0.50	ok			
Panel N	Mamparo estructural	2.00	1.00	12.67	0.50	0.03	6.58	9.23	NA	9.2	0.14	0.14	0.16	2.51	1.79	0.50	80	1	25.33	15	10.00	3.00	2.00	10.00	0.19	0.19	ok			
Panel Ñ	Mamparo colisión de popa	1.82	1.05	13.55	0.48	0.03	7.02	9.74	NA	9.7	0.15	0.16	0.18	2.51	1.79	0.49	80	1	28.15	15	10.00	3.00	2.00	10.00	0.19	0.19	ok			

Tabla 5.15 Escantillonado de paneles del Yate Velero UNI, complementar con Tabla 5.8, Fig. 5.5 y Fig. 5.9.

c/b	f_k
0 to 0,03	1,0
0,03 to 0,12	$1,1 - 3,33 \cdot c/b$
$> 0,12$	0,7

Tabla 5.10 Factor de corrección por curvatura, f_k [24]

Material	Elemento estructural	Esfuerzo de diseño σ_d N/mm ²
Laminado sólido simple	Fondo y costado del casco	$0,5 \cdot \sigma_{uf}$
	Cubierta y superestructura	$0,5 \sigma_{uf}$
	Mamparos estructurales y de tanques	$0,5 \cdot \sigma_{uf}$
	Mamparos estancos	$0,625 \cdot \sigma_{uf}$
σ_{uf} : Mínima resistencia a la rotura en flexión		

Tabla 5.11 Esfuerzo de diseño de paneles (laminado simple) [24]

Relación de aspecto del panel $\frac{l}{b}$	Coefficiente k_2 $k_2 = \frac{0,271 \cdot (\frac{l}{b})^2 + 0,910 \cdot (\frac{l}{b}) - 0,554}{(\frac{l}{b})^2 - 0,313 \cdot (\frac{l}{b}) + 1,351}$	Coefficiente k_3 $k_3 = \frac{0,027 \cdot (\frac{l}{b})^2 - 0,029 \cdot (\frac{l}{b}) + 0,011}{(\frac{l}{b})^2 - 1,463 \cdot (\frac{l}{b}) + 1,108}$
> 2,0	0,500	0,028
2,0	0,497	0,028
1,9	0,493	0,027
1,8	0,487	0,027
1,7	0,479	0,026
1,6	0,468	0,025
1,5	0,454	0,024
1,4	0,436	0,023
1,3	0,412	0,021
1,2	0,383	0,019
1,1	0,349	0,016
1,0	0,308	0,014

Tabla 5.12 Coeficiente en función de la relación de aspecto del panel isotrópico [24]

Una vez calculado los paneles en laminado simple, con mayor propiedad, podemos calcular los paneles tipo sándwich, mediante las ecuaciones (5.34), (5.35) y (5.36). Debemos hacer notar que las capas del laminado sándwich poseen el mismo proceso de laminación, manual en este caso (ver notas finales capítulo 4), que un laminado solidó simple. El mínimo modulo de sección de las capas interior y exterior, respecto del eje neutro, no debe ser menor que el obtenido por las ecuación (5.34) y (5.35), respectivamente.

$$SM_o = \frac{b^2 \cdot f_k^2 \cdot P_r \cdot k_2}{6 \cdot 10^5 \cdot \sigma_{do}} \quad (\text{cm}^2) \quad (5.34)$$

$$SM_i = \frac{b^2 \cdot f_k^2 \cdot P_r \cdot k_2}{6 \cdot 10^5 \cdot \sigma_{di}} \quad (\text{cm}^2) \quad (5.35)$$

$$I = \frac{b^3 \cdot f_k^3 \cdot P_r \cdot k_3}{12 \cdot 10^6 \cdot E_{TC} \cdot k_1} \quad (\text{cm}^4) \quad (5.36)$$

Donde:

P_r : Presión relativa de diseño en paneles según sea su ubicación
(kN/m²), ver Tabla 5.8

k_2, k_3 : Definidos en la Tabla 5.6, ver Tabla 5.12

k_1 : Coeficiente de rigidez a la flexión en laminado sándwich (0.017)

b : Definido en la Tabla 5.6 (m)

f_k : Factor de corrección por curvatura, ver Tabla 5.10 y Fig. D.6, anexo D.

σ_{do} : Esfuerzo de diseño de la capa exterior del laminado sándwich, ver Tabla 5.13

σ_{di} : Esfuerzo de diseño de la capa interior del laminado sándwich, ver Tabla 5.13

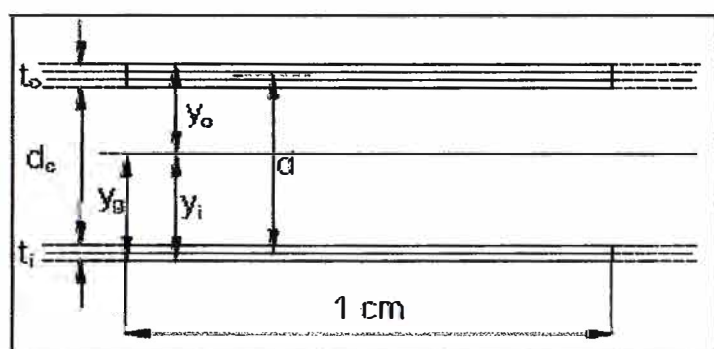
c_u : Altura de curvatura de un refuerzo curvo (m), ver Fig. D.6, anexo D

E_{TC} : Módulo de elasticidad en tensión o compresión, ver Tabla 4.8

Material	Elemento estructural	Esfuerzo de diseño σ_d N/mm ²
FRP tipo sándwich	Casco, cubierta, superestructura, mamparo estructural y de tanques	0,5 · σ_{ut} or 0,5 · σ_{uc}
	Mamparos estancos	0,625 σ_{ut} or 0,625 σ_{uc}

Tabla 5.13 Esfuerzo de diseño de paneles (laminado sándwich) [24], complementar con Tabla 4.8

Para poder transmitir la carga de corte, la semisuma del espesor del núcleo y el espesor total del laminado sándwich deberá ser como se muestra en la inecuación (5.37) [24].



$$\frac{d_o + d_c}{2} \geq \frac{\nu \cdot P_r \cdot b}{\tau_d \cdot 10^3} \quad (5.37)$$

Fig. 5.9. Esquema de un laminado sándwich [24]

Donde:

- P_r : Presión relativa de diseño en paneles según sea su ubicación (kN/m²), ver Tabla 5.8
- d_o : Espesor del laminado sándwich, sin considerar el gelcoat, ver Fig.5.9 (mm)
- d_c : Espesor del núcleo del laminado sándwich, ver Fig. 5.9 (mm)
- b : Definido en la Tabla 5.6 (m)
- ν : Coeficiente que varía con la relación de aspecto del panel. Cuando las propiedades elásticas de las capas son diferentes en los ejes principales, ν no puede ser menor que 0.5.
- τ_d : Esfuerzo de diseño del núcleo del laminado sándwich, ver Tabla 5.14

Material	Esfuerzo de corte de diseño τ_d (N/mm ²)
Contrafibra de balsa ^a	$0,4 \cdot \tau_u$
Núcleo con menos del 20% de elongación en la rotura (PVC entrecruzado, etc)	$0,5 \cdot \tau_u$
Núcleo con mas del 20% de elongación en la rotura (PVC lineal, SAN, etc)	$0,6 \tau_u$
^a Donde la balsa muestra un bajo grado de variabilidad en cuanto a sus propiedades mecánicas y medidas son tomadas para sellar el core con la encapsulación de la resina, bajo estas condiciones, τ_d puede ser $0,5 \tau_u$	

Tabla 5.14 Esfuerzo de diseño del núcleo de los de paneles (laminado sándwich) [24], complementar con Tabla 4.8

Con las presiones relativas calculas en cada sección correspondiente y las características geométricas de cada panel (Tabla 5.8), se calculó el escantillonado del casco del Yate Velero UNI; los resultados se muestran en la Tabla 5.15, en formato A3. En la Tabla 5.15 podemos notar una serie de ventajas favorables al laminado sándwich, comparado con el laminado simple. Por ejemplo podemos notar que el plástico reforzado con fibra de vidrio en el laminado sándwich es el 44.4% del PRF del laminado sólido simple; también se puede notar una disminución de peso de aproximadamente 51.5%.

5.3.3.2 Cálculo de refuerzos internos

El conocimiento general de cargas, la disposición preliminar de refuerzos, el conocimiento de las propiedades de los materiales, las presiones relativas de diseño en los refuerzos y los paneles calculados en la sección anterior son de vital importancia para calcular las dimensiones y escantillado de los perfiles de los refuerzos internos (ver Figs. 5.10 y 5.11). Para tal fin, como bien sabemos, se usó las reglas ISO 12215-5 [24].

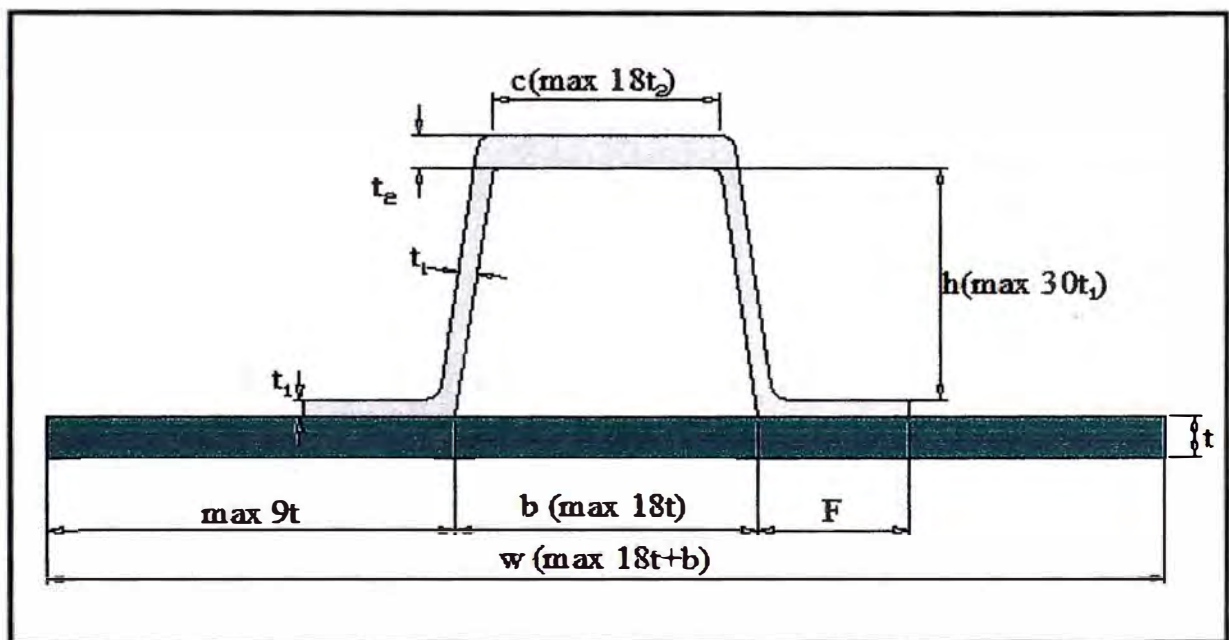


Fig. 5.10. Características geométricas del perfil típico de los refuerzos internos [2]

En la Fig. 5.10 el ala "F" es el mayor de $0.2h$ y 50mm , pero no mayor de $9t$. El ancho efectivo "w" es como se muestra en la Fig. 5.10 o el espacio entre refuerzos, cualquiera sea menor; en el caso de un refuerzo a lo largo de una

PRESIONES RELATIVAS SOBRE LOS REFUERZOS DEL YATE VELERO UNI (kN/m ²)				Laminado simple																							
				Requerimiento, según las reglas ISO 12215-3									Escantillonado actual (ver Fig. 5.14 y 5.15)														
Refuerzo (ver Fig. 5.5)	l _u (m)	s (m)	Pr	c _u (m)	R _C	K _B	SM (cm ³)	Panel	k _{sa}	A _w (cm ²)	N _B	I (cm ⁴)	H (mm)	B _{min} (mm)	w (mm)	b (mm)	F (mm)	t ₂ (mm)	t ₁ (mm)	c (mm)	h (mm)	y _g (mm)	d _{max} (mm)	A _w (cm ²)	I (cm ⁴)	SM (cm ³)	Vo Bo
Cuaderna, 1a	2.14	1.60	21	0.28	0.70	83.3	116.9	D1	5.0	5.2	26040	456	100	75	334	100	50	12	6	75	82	30	83	26	1011	121	ok
Cuaderna, 1b	2.39	1.80	21	0.56	0.70	83.3	164.0	D2	5.0	6.6	26040	714	100	97	380	110	50	15	7	97	78	33	82	35	1443	175	ok
Cuaderna, 1c	2.55	1.40	21	0.68	0.70	83.3	145.2	E1/D2	5.0	5.5	26040	675	100	89	361	100	50	14	7	89	80	32	83	31	1283	155	ok
Longitudinal de fondo, 2a	1.60	0.74	36	0.03	1.00	83.3	73.3	A1	5.0	3.1	26040	255	80	70	351	90	50	12	6	70	63	23	72	22	619	86	ok
Longitudinal de fondo, 2b	1.35	1.12	33	0.00	1.00	83.3	72.3	A2	5.0	3.6	26040	212	80	70	396	90	50	12	6	70	63	21	76	22	680	90	ok
Longitudinal de fondo, 2c	1.97	0.79	21	0.02	1.00	83.3	69.9	B3	5.0	2.4	26040	300	80	64	355	85	50	11	6	64	64	22	74	21	580	79	ok
Longitudinal de costado, 3a	1.60	1.18	22	0.02	1.00	83.3	72.3	D1	5.0	3.0	26040	252	80	70	324	90	50	12	6	70	63	22	71	22	600	85	ok
Longitudinal de costado, 3b	1.35	1.43	22	0.07	0.94	83.3	57.9	D2	5.0	3.1	26040	165	80	54	300	75	50	10	5	54	65	22	71	18	452	64	ok
Longitudinal de costado, 3c	1.97	1.34	21	0.00	1.00	83.3	118.1	E1/F	5.0	4.0	26040	506	100	75	370	100	50	12	6	75	82	28	87	26	1093	125	ok
Varengas, 4a	1.48	0.35	48	0.00	1.00	125	59.3	A2	5.0	1.8	130200	637	80	70	350	90	50	12	6	70	63	21	76	22	680	90	ok
Varengas, 4b	1.48	0.51	31	0.00	1.00	125	55.5	A2	5.0	1.7	130200	596	100	100	416	110	50	15	8	110	78	33	84	38	1718	204	ok
Refuerzos longitudinales, 5	1.35	0.49	21	0.00	1.00	125	30.4	A2/A3	5.0	1.0	130200	298	80	54	381	75	50	10	5	54	65	19	78	18	537	69	ok
Carlingas del motor, 6	1.45	0.50	24	0.00	1.00	125	41.1	B2	5.0	1.3	130200	432	80	54	372	75	50	10	5	54	65	20	77	18	528	69	ok
Bao de la cuaderna 1a	2.45	1.60	8	0.04	1.00	83.3	81.6	G	5.0	2.2	26040	435	100	75	370	100	50	12	6	75	82	28	87	26	1093	125	ok
Bao de la cuaderna 1b	3.73	1.95	8	0.53	0.70	83.3	161.0	H	5.0	4.1	26040	1092	100	97	353	110	50	15	7	97	78	34	79	35	1354	171	ok
Bao de la cuaderna 1c	4.10	1.40	8	0.58	0.70	83.3	140.0	H	5.0	3.3	26040	1046	100	89	343	100	50	14	7	89	80	33	81	31	1230	152	ok
Refuerzo de mamparo I	1.10	1.00	7	0.00	1.00	125	14.4	I	5.0	0.6	130200	115	50	75	243	90	50	12	6	75	32	20	39	20	173	45	ok
Refuerzo de mamparo J	2.55	1.09	9	0.00	1.00	83.3	69.7	J	5.0	1.8	26040	387	80	64	242	80	50	11	6	64	64	27	62	21	434	71	ok
Refuerzo de mamparo K	2.63	1.34	9	0.00	1.00	83.3	93.2	K	5.0	2.4	26040	534	80	82	333	90	50	13	6	82	61	26	68	26	698	103	ok
Refuerzo de mamparo M	2.69	1.34	10	0.00	1.00	83.3	101.3	M	5.0	2.5	26040	593	80	82	333	90	50	13	6	82	61	26	68	26	698	103	ok
Refuerzo de mamparo Ñ	1.82	1.05	10	0.00	1.00	83.3	38.1	Ñ	5.0	1.4	26040	151	50	75	270	90	50	12	6	75	32	19	41	20	193	47	ok
Refuerzo de espejo de popa	1.52	1.45	21	0.00	1.00	83.3	76.3	F	5.0	3.4	26040	253	80	70	324	90	50	12	6	70	63	22	71	22	600	85	ok
Refuerzo de fondo del panel C	1.49	1.00	21	0.02	1.00	83.3	50.7	C	5.0	2.3	26040	165	80	54	300	75	50	10	5	54	65	22	71	18	452	64	ok

Tabla 5.18 Escantillonado y dimensiones de los perfiles de los refuerzos internos del Yate Velero UNI, complementar con Tabla 5.5, Figs. 5.5, 5.10 y 5.11. Los refuerzos del motor fueron calculados considerando las cargas de diseño, es decir presiones hidrostáticas e hidrodinámicas, pero para complementar este cálculo es necesario considerar las características del motor como son: el torque, el giro, características geométricas y otros, ver la bibliografía del Ing. Jorge Tegedor Del Valle [8]. De igual manera se calculó **los refuerzos longitudinales 5**, ver primera columna de la tabla, considerando las cargas de diseño, sin considerar el verdadero fin de estos refuerzos que es distribuir longitudinalmente las cargas del mástil, por tanto el módulo de sección de estos refuerzos deberá ser mayor al módulo de sección de las varengas. Considerando estos criterios garantizamos la resistencia estructural del Yate Velero UNI, a toda prueba.

abertura el ancho efectivo “w” será $9t + b$ o medio espacio entre refuerzos, cualquiera sea menor [2].

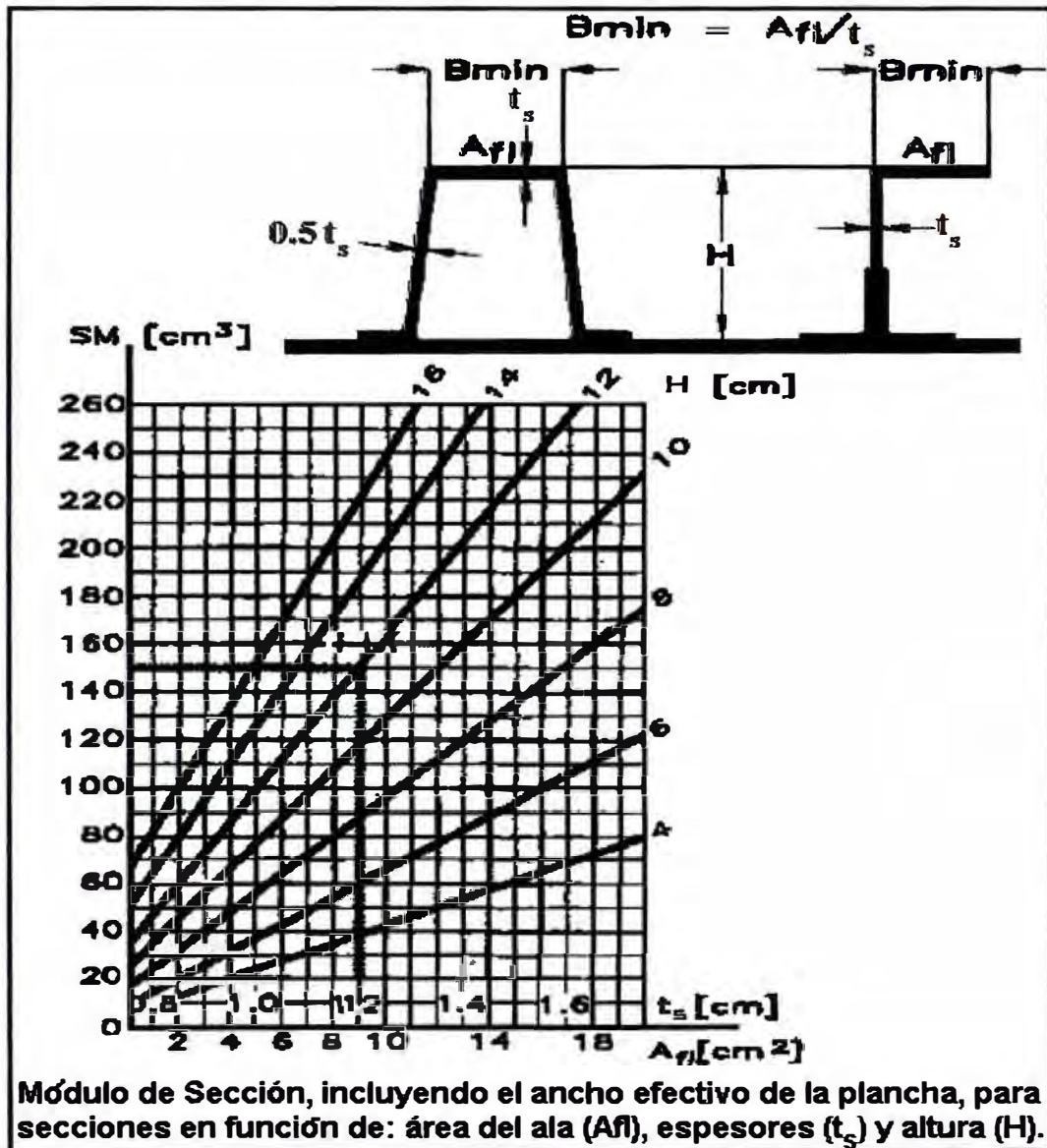


Fig.5.11. Módulo de sección en función de espesores (t_s) y el área de la cabeza (A_f) de un perfil típico de fibra de vidrio, también aplicable al perfil metálico tipo “L”[2]

Cabe mencionar que la Fig. 5.11 fue de vital importancia en la selección práctica de las dimensiones de perfiles que se adecuen a las exigencias que sobre éste se imponen. Al dimensionar los refuerzos no alcanzamos tener las dimensiones físicas, luego de efectuado nuestros cálculos, sino que más bien perfiles que cubran los requerimientos de resistencia y rigidez, es decir, el módulo de sección (MS) y el momento de inercia (I), ver ecuaciones (5.38) y (5.40) [24]. El área de la sección del perfil (A_w), sin considerar el panel del casco, no fue menor que el área calculada por la ecuación (5.39).

$$MS = \frac{R_C K_B \cdot Pr \cdot s \cdot l_u^2}{\sigma_d} \quad (\text{cm}^3) \quad (5.38)$$

$$A_w = \frac{k_{sa} \cdot Pr \cdot s \cdot l_u}{\tau_d} \quad (\text{cm}^2) \quad (5.39)$$

$$I = \frac{N_B \cdot R_C^{1.5} \cdot Pr \cdot s \cdot l_u^3}{E_{TC}} \quad (\text{cm}^4) \quad (5.40)$$

Donde:

- P_r : Presión relativa de diseño en paneles según sea su ubicación (kN/m²), ver Tabla 5.8
- s, l_u : Definido en la Tabla 5.6 (m)
- R_C : Coeficiente de curvatura para refuerzos internos, ver Tabla 5.16.
- cu : Altura de curvatura de un refuerzo curvo (m), ver Fig. D.7, anexo D.
- K_B : Coeficiente de fijación del refuerzo interno para el cálculo del módulo de sección:

- $K_B=83.3$, para uniones continuas, acarteladas o completamente fijadas en sus extremos.
- $K_B=125$, para uniones no acarteladas o uniones simples, no continuas.

N_B : Coeficiente de fijación del refuerzo interno para el cálculo del momento de inercia:

- $N_B=26040$, para uniones continuas, acarteladas o completamente fijadas en sus extremos.
- $N_B=130\ 200$, para uniones no acarteladas o uniones simples, no continuas.

k_{sa} : Es el factor de área de corte y es 5 cuando el área del ancho efectivo del panel del casco es mayor que el área de la sección del perfil, de otra manera adoptaría 7.5 [24].

σ_d : Esfuerzo de diseño en compresión o tensión de refuerzos internos, ver Tabla 5.17

τ_d : Esfuerzo de diseño en corte de refuerzos internos, ver Tabla 5.17

E_{TC} : Módulo de elasticidad en tensión o compresión, ver Tabla 4.8.

c_u / l_u	R_c
0 to 0,03	1,0
0,03 to 0,12	$1,1 - 3(c_u / l_u)$
> 0,12	0,7

Tabla 5.16 Coeficiente de curvatura para refuerzos internos, R_c [24].

Material	Esfuerzo de diseño en compresión o tensión σ_d N/mm²	Esfuerzo de diseño en corte τ_d N/mm²
FRP	$0,5 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,5 \cdot \sigma_{uc}$	$0,5 \cdot \tau_u$
Aluminium alloys	$0,7 \cdot \sigma_{yw}$	$0,4 \cdot \sigma_{yw}$
Steel ^a	$0,8 \cdot \sigma_y$	$0,45 \cdot \sigma_y$
Laminated wooden frames	$0,45 \cdot \sigma_{uc}$	$0,45 \cdot \tau_u$
Solid stock wooden frames	$0,4 \cdot \sigma_{uc}$	$0,4 \cdot \tau_u$
Plywood on edge frames	$0,45 \cdot \sigma_{ut}$ or $0,45 \cdot \sigma_{uc}$	$0,45 \cdot \tau_u$

Tabla 5.17 Esfuerzos de diseño para refuerzos internos [24]

5.4. Cálculo del timón

Con la finalidad de hacer un análisis comparativo entre las cargas, momentos y torques en el timón, producidos por el movimiento de las olas en el curso de navegación del yate velero, según el tipo de timón (ver Anexo A), usaremos tres criterios distintos. Primero calcularemos el timón espada sin codaste, propuesto como timón alternativo en esta tesis (en la Fig. 5.15), para ello usaremos las reglas ABS O.R.Y. [5] y la buena práctica de la ingeniería (consúltese la bibliografía de Larson L. & Eliasson R.E [2]). En segundo lugar y teniendo en cuenta el tipo de timón propuesto por De La Torre [1] (un timón con codaste y tintero) se usó las reglas ISO N° 12215-8 [27] que oportunamente se llegó a obtener a postrimería de la finalización de esta tesis.

5.4.1 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según la buena práctica de la ingeniería.

La fuerza hidrodinámica de costado que soporta el timón (F_r), como bien se sabe, es la fuerza que causa el momento de flexión (M_r) y el momento de torsión (T_r) sobre el eje de pala. Las ecuaciones del (5.41) al (5.45) [2], usados por la buena práctica de la ingeniería, se muestran a continuación.

$$F_r = 0.5 \rho V_s^2 A_{lr} C_{lr} \quad (5.41)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua, 1025kg/m³

V_s : Velocidad máxima del yate (m/s), Tabla 1.1.

A_{lr} : Área lateral de la pala (m²), área de la región sombreada en la Fig. 5.13

C_{lr} : Coeficiente de sustentación de la pala, ver ecuaciones (5.42) y (5.43)

$$C_{lr} = c \alpha_o \quad (5.42)$$

$$c = \frac{0.11}{1 + \frac{2}{AR_e}} \quad (5.43)$$

Donde:

α_o : Ángulo de ataque para máxima sustentación, según el tipo de perfil.

En nuestro caso se usó el perfil NACA 0012 [1], ver Fig. 5.12

AR_e : Relación de aspecto efectivo, igual a dos veces relación de

aspecto $(2 \frac{R_{ha} + R_{hf}}{L_u + L_l})$, ver Fig. 5.13.

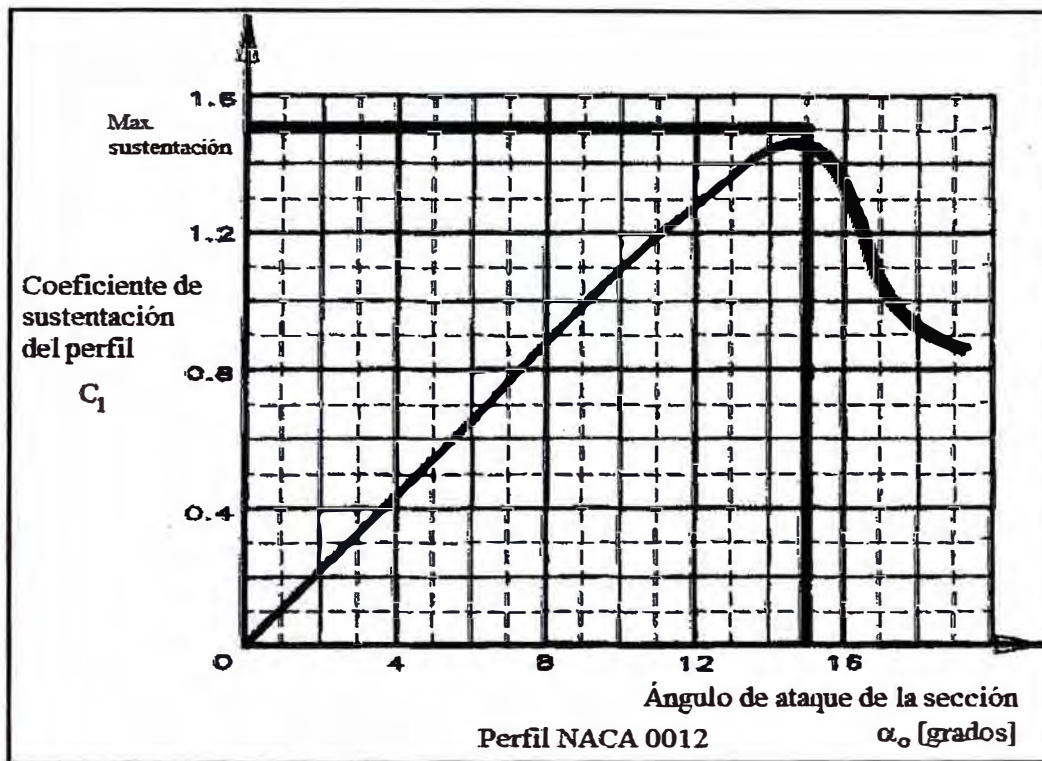


Fig. 5.12 Coeficiente de sustentación del perfil & ángulo de ataque [2].

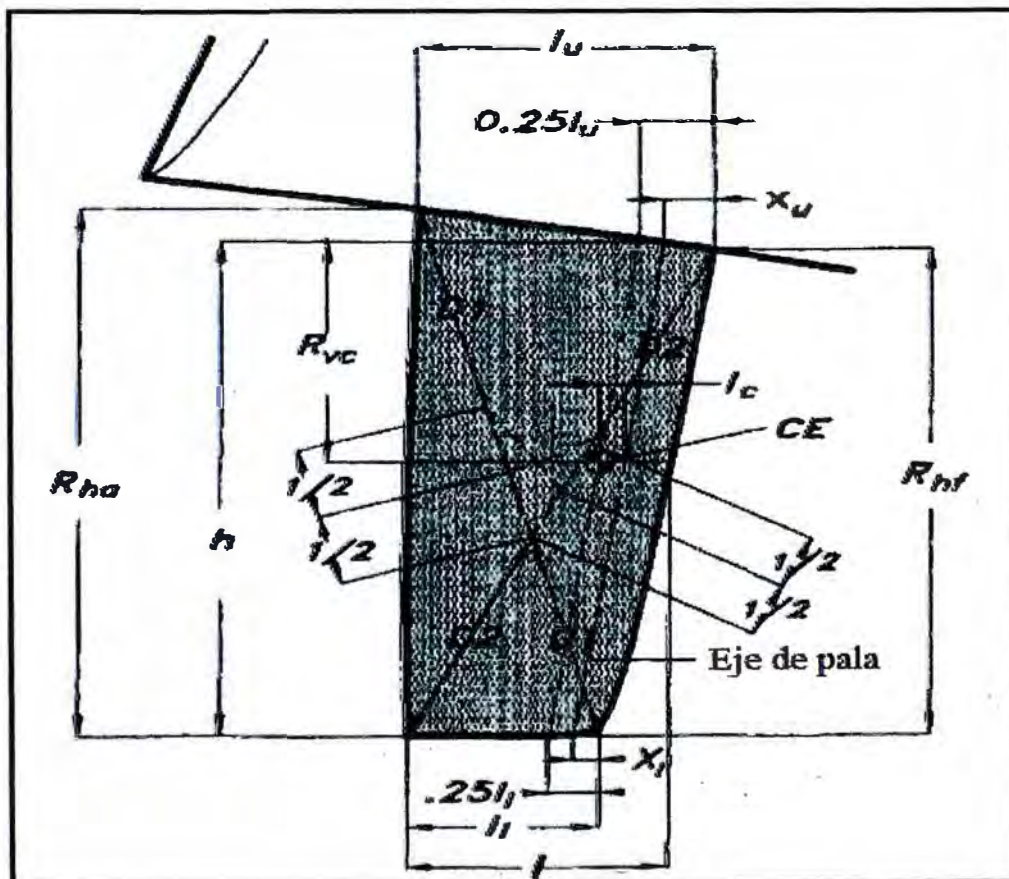


Fig. 5.13 Características geométricas de un timón espada sin codaste [2].

Es lógico pensar que para calcular el máximo momento de flexión del eje de pala, es necesario el diagrama de momento flector (ver Anexo A, Fig.A.3), pero por mucho tiempo la buena práctica de la ingeniería sugiere la ubicación del punto de máximo momento a 45% de la altura total de la pala de timón (h , ver Fig.5.13) [2]. Así el momento de flexión será como se muestra en la ecuación (5.44).

$$M_r = R_{vc} F_r \quad (5.44)$$

Donde:

F_r : Fuerza hidrodinámica de costado en el timón (N), ecuación (5.41)

R_{vc} : 0.45 veces la altura total de la pala de timón (m), ver Fig.5.13.

Para el cálculo del momento de torsión sobre el eje de pala, ecuación (5.45), es necesario hallar el centro de fuerzas de la pala de timón, para luego calcular el radio de torque respecto al eje de pala.

$$T_r = L_c F_r \quad (5.45)$$

Donde:

F_r : Fuerza hidrodinámica de costado en el timón (N), ecuación (5.41)

L_c : Radio de torque, medido desde el eje de pala hacia el centro de fuerzas de la pala de timón. Puesto que se supuso una pala de timón

sin codaste ni tintero, un valor recomendable para el radio de torque, aceptable para este tipo de palas, es aproximadamente 0.05 m [2].

5.4.2 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según reglas ABS.

El principio de cálculo es el mismo, salvo por la variación de factores de seguridad que dependen básicamente de la sociedad de clasificación. En esta sección, adicionalmente, se cálculo el diámetro del eje de pala. Seguidamente mostramos las ecuaciones usadas.

$$F_r = 984.C_{lr}.L_{WL}.A_{lr}.N \quad (5.46)$$

$$M_r = F_r \cdot \left[h_b - h + \frac{3(l_u + 2l_l)}{l_u + l_l} \right] \quad (5.47)$$

$$T_r = F_r l_c \quad (5.48)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32}{\pi \cdot \sigma_c} (0.5.M_r + 0.5 \cdot \sqrt{M_r^2 + 4.T_r^2})} \quad (5.49)$$

Donde:

A_{lr} : Área lateral de la pala (m^2), área de la región sombreada en la Fig.

5.13

N : Asume los siguientes valores:

- 1, cuando $\frac{0.001 \cdot m}{(0.01 \cdot L_{WL})^3} \geq 4304$
- $\frac{2.65 \cdot L_{WL}^2}{\sqrt[3]{m^2}}$, cuando $\frac{0.001 \cdot m}{(0.01 \cdot L_{WL})^3} < 4304$

C_{lr} : Coeficiente de sustentación de la pala, considere 1.5 para timones que cumplan las siguientes condiciones: $2 < h/l < 6$ y $t/l > 0.06$, ver Fig. 5.13

t : Espesor del timón (perfil) a la altura del centro de fuerzas (m)

l_c : Radio de torque, $0.33 \cdot l - x_{lc}$ (cm)

l : Ancho del timón a la altura del centro de fuerzas (cm)

h_b : Es la altura medida desde el centro de fuerzas hasta el punto medio de la bocina de limera (m), equivalente a Z_B de la Fig. 5.14.

h, l_u, l_l : Dimensiones del timón, ver Fig. 5.13

d : Diámetro del eje de pala (cm)

σ_c : Esfuerzo de diseño del material, usar el menor de σ_y o $\sigma_u/1.75$, ver

Anexo B (Tabla B.1)

5.4.3 Cálculo de fuerzas, momentos y torques en el timón, según reglas ISO N° 12215-8.

Las reglas de estandarización ISO N° 12215-8 [27] cubren 7 distintos tipos de timones (ver Anexo A). El Yate Velero UNI, como se mencionó anteriormente, cuenta con un timón con codaste y tintero (ver Fig. A.2, Anexo A). Los parámetros para el cálculo de las cargas y momentos del timón se muestran en la Fig. 5.14. Las ecuaciones del (5.50) al (5.53), propuestas en las reglas ISO, nos permitieron calcular las cargas y momentos en el timón y estos resultados al igual que los resultados anteriores se resumieron en la Tabla 5.20.

$$F = 135 f_{WR} C_R V^2 \cdot A \quad (5.50)$$

$$M = F Z_B \quad (5.51)$$

$$T = F \cdot r \quad (5.52)$$

$$d_{316} = 3,87 (F \cdot z_{eq})^{1/3} \quad (5.53)$$

Donde:

C_R : Coeficiente de máxima fuerza de timón.

$$C_R = 0,0275 \Lambda^3 - 0,2926 \Lambda^2 + 1,0583 \Lambda + 0,2006 \quad \Lambda = \frac{h_r^2}{A}$$

h_r : Altura promedio del timón (m) (ver Fig. A.2, Anexo A)

A : Área lateral de la pala (m^2), sin considerar codaste (ver Fig. A.2, Anexo A)

V : Velocidad de la embarcación:

- La velocidad mínima a considerar en un yate es $V_{MIN} = 2,4\sqrt{L_{WL}}$
- Para veleros, considerar $V = 2,7\sqrt{K_v L_{WL}}$, donde K_v es:

$$K_v = 1 \quad \text{para } m_{LDC} \geq 4,3 L_{WL}^3$$

$$K_v = \frac{2,65 L_{WL}^2}{\sqrt[3]{m_{LDC}^2}} \quad \text{para } m_{LDC} < 4,3 L_{WL}^3 ; K_v < 2$$

f_{WR} : Factor de categoría de diseño para timones, ver Tabla 5.19

Categoría de diseño	A & B	C & D
Valor de f_{WR}	1	0,75

Tabla 5.19 Factor de categoría de diseño para timones [27].

Z_B : Distancia desde la mitad del cuello de la bocina hasta en centro de presión para una pala de timón (ver Fig. 5.14), ver más detalles en Anexo A, Tabla A.1

r : Radio de torque (m), ver Anexo A, Tabla A.2

Z_{eq} : Factor para el calculo del diámetro del eje de pala $\sqrt{z_B^2 + 0,75r^2}$

d_{316} : Diámetro del eje de pala, considerando un eje de acero inoxidable AISI 316L or 316 (mm), ver Anexo B, Tabla B.1

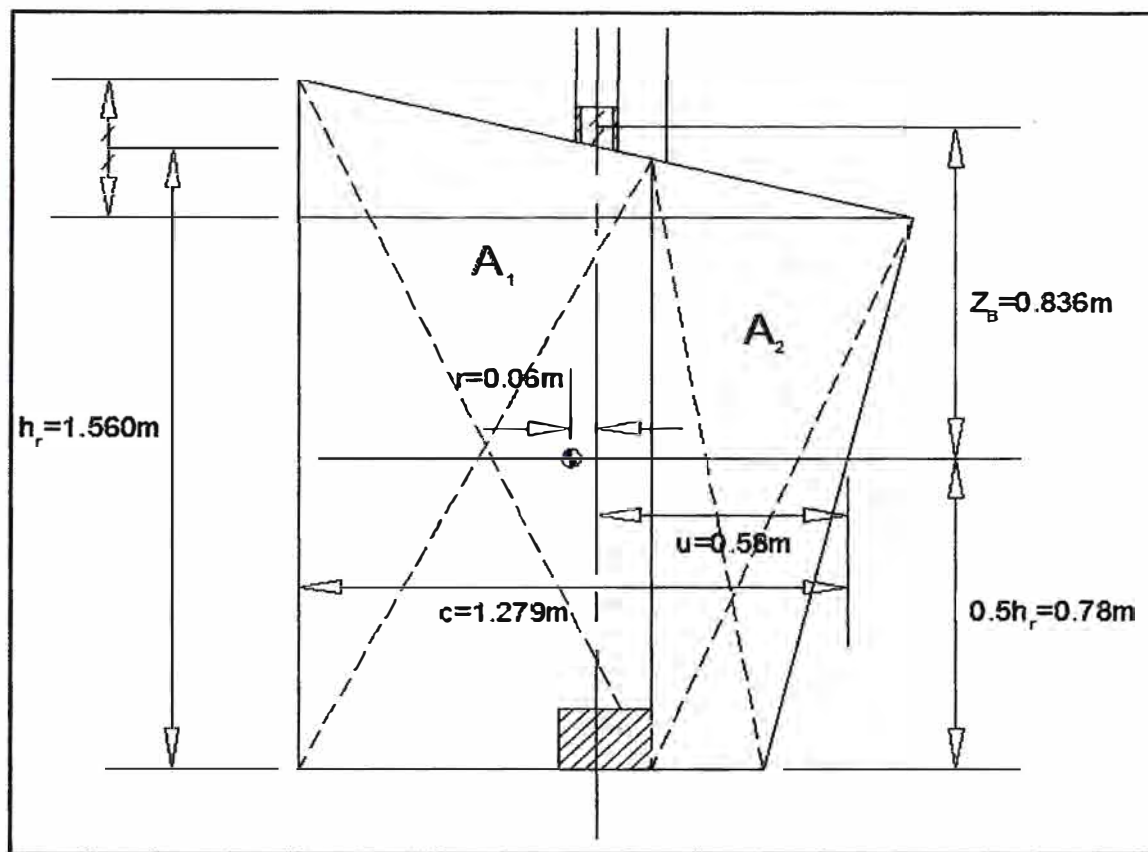


Fig. 5.14 Parámetros para el cálculo del timón del Yate Velero UNI

Al calcular las cargas y momento en el timón usando las reglas del ABS O.R.Y.[5], se pudo notar que la geometría del timón de la Fig. 5.14 no era la apropiada para este tipo de reglamentaciones (ver Tabla 5.20), fue así que presentamos otra alternativa de timón tipo espada sin codaste ni tintero, ver Fig. 5.15. Este timón cumple todas las características básicas que todo timón debe tener, un buen balance, una área proyectada del timón más a proa del eje de pala no mayor al 17% de área proyectada total del timón [16] y un área proyectada total en concordancia con el área proyectada de carena y área vélica según lo indicado por De La Torre [1].

	Buena práctica de la Ingeniería	ABS	ISO 12215-8	
			Veleros	Yates
Fr (N)	19911.0	27019.1	23781.7	18790.5
Mr(Nm)	14156.7	21074.9	19857.7	15690.0
Tr(Nm)	792.8	3317.9	1522.0	1202.6
d(cm,mm)	9.1	10.4	97.0	104.9

Tabla 5.20. Resumen de cálculos del timón, las dos primeras columnas corresponden a la pala propuesta (ver Fig. 5.15) y las dos últimas columnas corresponden al timón del yate velero (con codaste y tintero, ver Fig. 5.14) [1]; para el cálculo del diámetro del eje de pala de la primera columna se usó la ecuación (5.53).

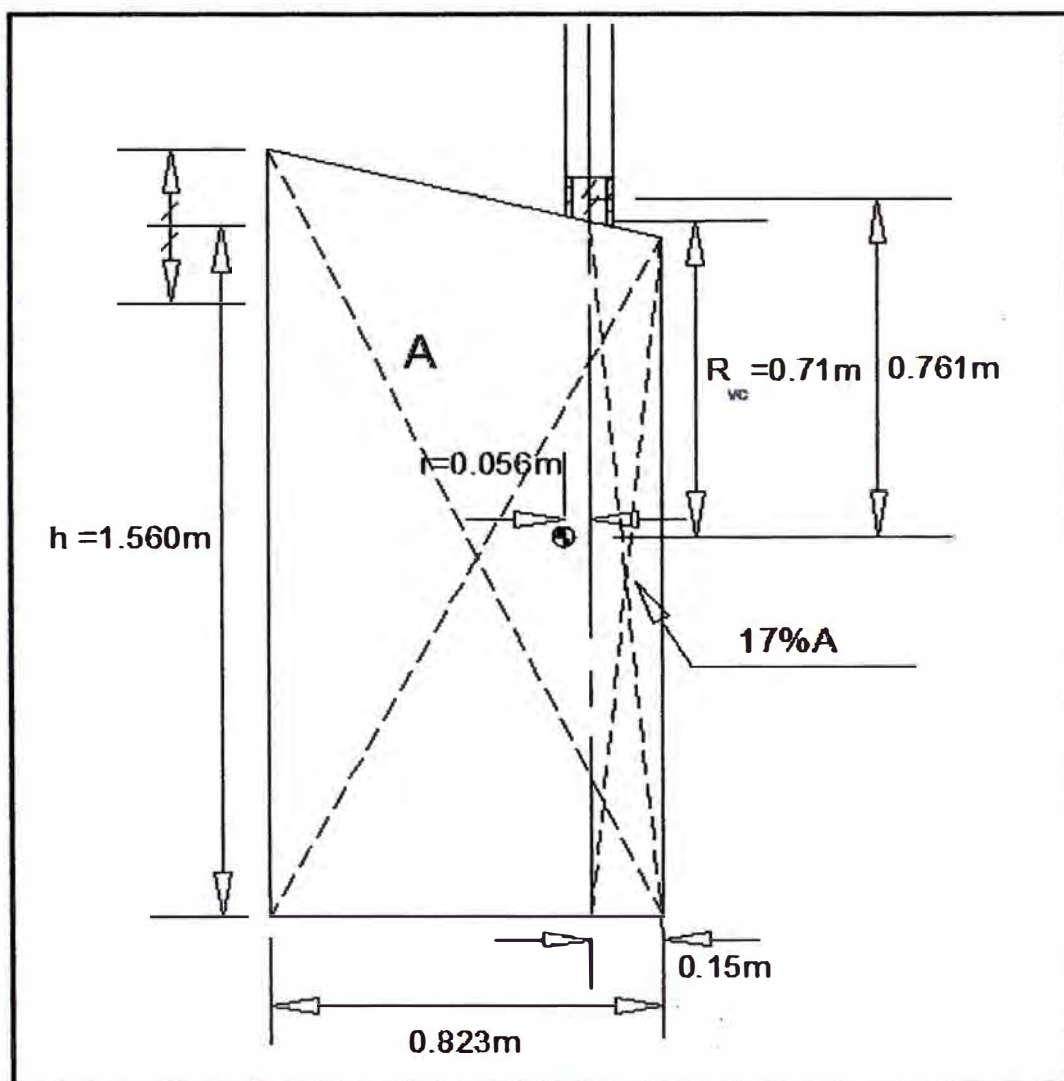


Fig. 5.15 Timón alternativo del Yate Velero UNI, con un área lateral de 1.346 m^2

Según los resultados de la Tabla 5.20 se pueden notar que los valores obtenidos de las reglas del ABS O.R.Y.[5] no son razonables, debido a: a) el factor de seguridad considerado en el cálculo de la fuerza, b) la configuración geométrica de la pala de timón no es apropiada para el cálculo, es decir, la geometría del timón con codaste y tintero del yate velero (ver Fig. 5.14) y la configuración alternativa de timón (ver Fig. 5.15) tienen valores muy altos de l_c (ver ecuación (5.40)), quizás esto se deba a que las reglas del ABS O.R.Y. son más apropiadas para embarcaciones de competencia, ya que el perfil de la pala de embarcaciones de competencia es diferente [16].

Considerando las variables en torno al diseño del timón (perfil de timón, ubicación del eje de timón, disposición de estructuras, etc.), los valores sombreados de la Tabla 5.20, son los que finalmente se tomaron en cuenta en el diseño de la pala de timón. Un ejercicio práctico para saber las dimensiones mínimas de los elementos del sistema de gobierno manual con rueda de timón, nos permitió evaluar el diámetro del cuadrante (ver Fig. 5.16), el diámetro de piñón y el diámetro de la rueda de timón. De igual manera, se realizó el ejercicio para evaluar la caña de timón manual (ver Fig. 5.16).

Con un torque de 792.7Nm (ver Tabla 5.20) y un cuadrante de 8 pulgadas de radio (0.2m) se tiene un fuerza de torque de 3963.5 N y considerando una perdida de 20% en los mecanismos de transmisión [2] tendremos una fuerza de torque de 4954 N, el piñón de dirección normalmente tiene un radio de 0.05m, entonces así se tendrá un torque de 247.7Nm, por tanto considerando una rueda de timón de 1.2 m de diámetro se necesitará una fuerza máxima de 412.86 N. El valor obtenido anteriormente no es recomendable [2,28], por tanto se incrementó el radio del cuadrante a 0.3m y así se obtuvo una fuerza necesaria en el timón de 275.24N. Una caña de timón equivalente tendría un brazo de palanca de $792.7/275.24$ (2.88m), este brazo de palanca originaria un reordenamiento en la disposición general del yate velero lo cual no es recomendable.

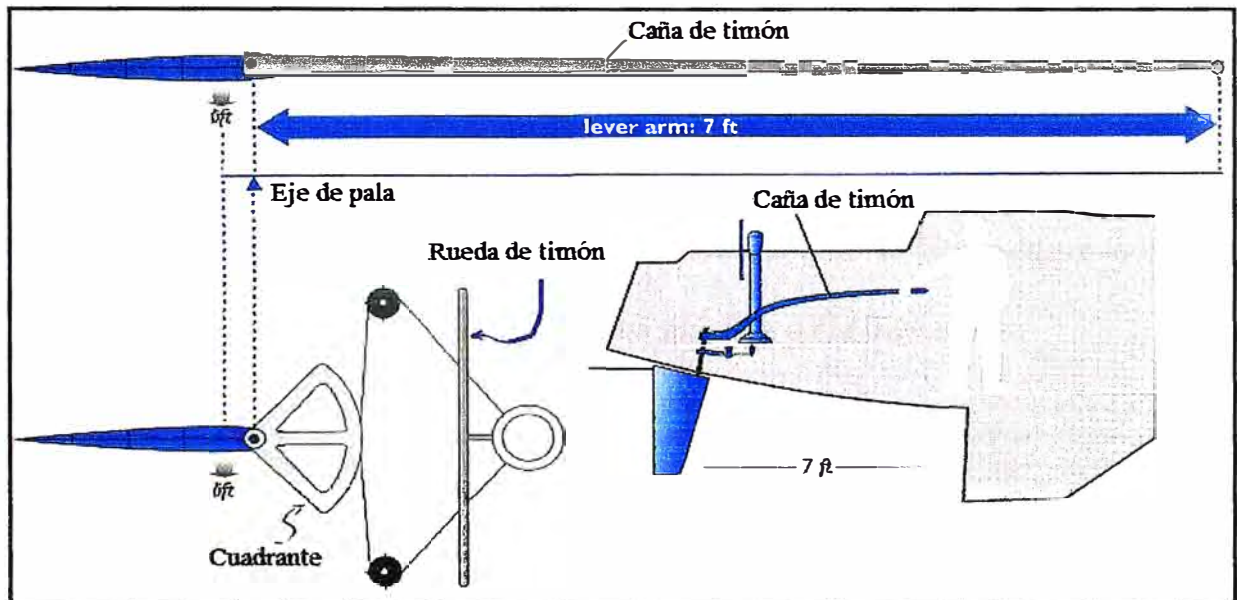


Fig. 5.16. Elementos del sistema de gobierno, caña de timón y rueda de timón [28]

5.5. Cálculo de la quilla

La Fig. 5.17 muestra la carga local producida por el peso del lastre sobre la quilla y finalmente sobre la unión quilla-casco y la Fig. 5.18 la carga local externa producida en una varada o encalladura, como fueron estudiamos en el capítulo 2. Estas cargas influyen de manera decisiva en el escantillonado del casco y de los refuerzos interiores (varengas) a la altura de la quilla, por tanto un análisis detallado nos permitirá evaluar si es o no necesario modificar el escantillonado de los refuerzos internos (varengas, principalmente), calculados previamente en este capítulo, ver Tabla 5.9. Para tal fin usaremos la buena práctica de la ingeniería, con el uso de bibliografía especializada referida [2,4].

5.5.1 Cálculo de las cargas locales producidas por la quilla-lastre sobre la estructura del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.

La posición de diseño de la quilla de un yate velero es a una inclinación de 90° y en una condición en que el 100% de la quilla está en el aire. Se asume el casco en el aire y la aplicación un factor de la seguridad de 4 a 6 [2,4], la mayor posible en estructuras marinas [12], que asegure las cargas dinámicas adheridas, que no se incorporan en las fórmulas. Las ecuaciones del (5.54) al (5.57), que se muestran a continuación, son relativamente sencillos de deducir y fueron obtenidos de las copias de clase de maestría de la Ing. Naval Ana Arevalos [4]

$$M_{kt} = CG_{dk} \cdot W_{blst} \cdot g \quad (5.54)$$

$$P_{kt} = \frac{M_{kt}}{OF_{perno}} \quad (5.55)$$

$$P_{kb} = \frac{P_{kt}}{n_{kb}} \quad (5.56)$$

$$d_{kb} = 2 \cdot \sqrt{\frac{P_{kb} \cdot \eta_{kb}}{\sigma_y \cdot \pi}} \quad (5.57)$$

Donde:

M_{kt} : Momento transversal en la unión quilla-casco producido por el peso del lastre fijo (Nm).

P_{kt} : Carga total en los pernos de sujeción(N)

P_{kb} : Carga en cada perno (N)

d_{kb} : Diámetro requerido en los pernos (mm)

CG_{dk} : Distancia desde el centro de gravedad de la quilla hasta la ubicación de los pernos (m), ver Fig. 5.17

W_{blst} : Peso del lastre (kg), ver Tabla 1.1

g : Gravedad de la tierra (9.81 m/s²)

OF_{perno} : Distancia entre pernos a nivel transversal (m), ver Fig. 5.17

n_{kb} : Numero de pares de pernos de sujeción en la quilla.

η_{kb} : Factor de seguridad [4,6]

σ_y : Resistencia de fluencia del material de los pernos (N/mm²), ver

Anexo B, Tabla B.1

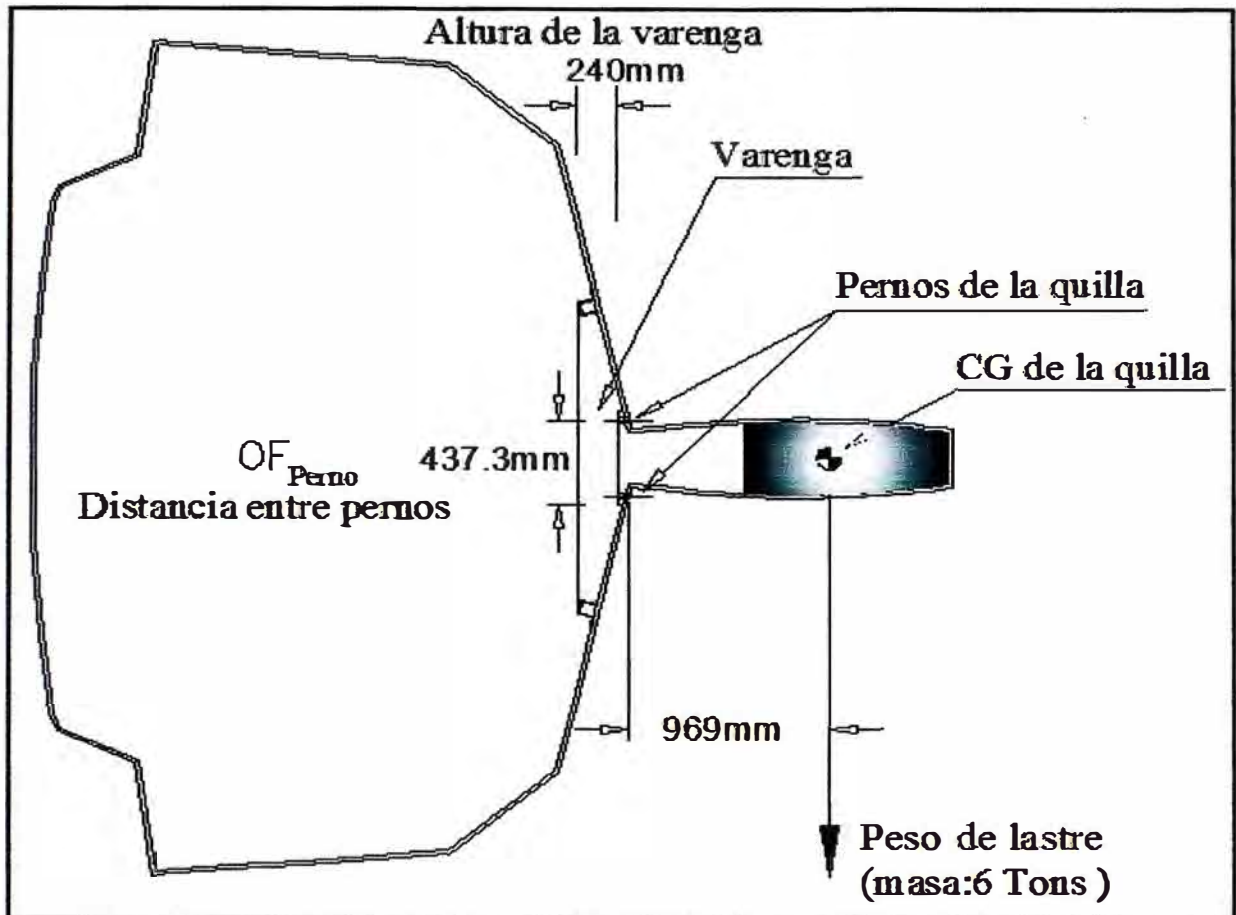


Fig.5.17 Carga producida por la quilla-lastre sobre la unión quilla-casco.

La resistencia de fluencia usado en el cálculo anterior fue 195N/mm^2 que corresponde al acero inoxidable AISI-316 (ver Anexo B, Tabla B.1). En el lado de sotavento los esfuerzos en los pernos de la quilla serán absorbidos como cargas de compresión por los paneles en las áreas cercanas a la unión quilla-casco. Puesto que solamente el área más cercana al borde de sotavento es efectiva, es razonable asumir que el 25% del área total debe poder soportar una presión que corresponde a la carga total en los pernos, ver ecuación (5.58) [2,4]. Un valor típico de resistencia a la rotura en compresión para un laminado de fibra

de vidrio es 117 N/mm^2 [4], pero según las características de los materiales seleccionados en el capítulo 3, la resistencia a la rotura en compresión que se usó fue 154 N/mm^2 (ver Tabla 4.8).

$$A_{\min} = \frac{P_{kb} \cdot \eta_{kb} \cdot n_{kb}}{0.25 \cdot \sigma_{uc}} \quad (5.58)$$

Donde:

P_{kb} : Carga en cada perno (N)

n_{kb} : Número de pares de pernos de sujeción en la quilla (10).

η_{kb} : Factor de seguridad (5)

σ_{uc} : Resistencia a la rotura en compresión del laminado, ver Tabla 4.8

El 25% del área real de la quilla tiene un área de aproximadamente $270\,000 \text{ mm}^2$ y el área mínima según cálculo es 15728 mm^2 , así que el factor de seguridad es considerable en este caso. Cada par de pernos de quilla es conectado con una varenga quien tiene que absorber el momento inducido por la tensión en los pernos de barlovento. El factor de la seguridad para las varengas es el mismo que para los pernos, en nuestro cálculo es 5. El momento de flexión que actúa en cada varenga M_{fl} , ecuación (5.59), es el momento transversal total de la quilla multiplicada por el factor de seguridad (5) y dividido por el número de varengas, diez en nuestro cálculo (ver Fig. 5.5). El módulo sección requerido (SM_{fl}) para

soportar este momento, ver ecuación (5.60), se calcula dividiendo el momento de flexión de las varengas (M_{fl}) con la resistencia a la rotura del laminado de la varenga en tensión (155 N/mm^2 , ver Tabla 4.8).

$$M_{fl} = \frac{M_{kt} \cdot \eta_{kb}}{n_{fl}} \quad (5.59)$$

$$SM_{fl} = \frac{M_{fl}}{\sigma_{ut}} \quad (5.60)$$

Donde:

- M_{kt} : Momento transversal en la unión quilla-casco producido por el peso del lastre, ecuación (5.54)
- n_{kb} : Numero de pares de pernos de sujeción en la quilla (5), ver Fig. 5.8
- η_{kb} : Factor de seguridad (5)
- σ_{ut} : Resistencia a la rotura en tensión del laminado a usar, ver Tabla 4.8

	Valor	Unidades	Ecuaciones
M_{kt}	57094.2	Nm	5.54
P_{kt}	120706.6	N	5.55
P_{kb}	12070.7	N	5.56
d_{kb}	19.9	mm	5.57
A_{min}	15676.2	mm ²	5.58
M_{fl}	28547.1	Nm	5.59
SM_{fl}	184.2	cm ³	5.60

Tabla 5.21. Resumen de cálculos de la quilla, considerando las cargas transversales, a consecuencia del peso quilla-lastre.

Luego de evaluar las ecuaciones del (5.54) al (5.60), el módulo de sección requerido en las varengas es 184.2 cm^3 . Según los cálculos realizados en secciones anteriores, se notó que este valor supera el módulo de sección calculado con la carga relativa de diseño de fondo a la altura de la quilla, ver Tabla 5.9. Por tanto es necesario replantear el escantillonado y dimensiones del perfil de la varenga. Inicialmente la altura del perfil de la varenga fue de 80mm (ver Tabla 5.9), pero necesariamente se tuvo que incrementar hasta una altura de perfil (H) de 100 mm, con un área y un espesor de tapa de sombrero de 15cm^2 y 1.5cm, respectivamente (ver Fig. 5.11), en harás de cubrir el requerimiento de módulo de sección de esta sección (184.17cm^3). En cuanto al cálculo realizado, no se tuvo en cuenta detalles minuciosos de la forma en que se unió la quilla con el casco, pero se consideró un tipo de unión estándar que nos permitió, por ejemplo, tener un valor promedio adecuado de separación de pernos OF_{perno} (ver fig. 5.17)

5.5.2 Cálculo de las cargas locales producidas en una varada o encalladura sobre la estructura del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.

La fuerza de impacto (F_i), como secuencia de una varada o encalladura, depende básicamente de tres factores [4].

- El peso y velocidad del yate velero.
- Forma del fondo del mar o forma de la roca (que gobierna el tiempo de retardo [2]).
- Forma de la embarcación (que tiene gran importancia con respecto al amortiguamiento del movimiento [2]).

Para poder realizar los cálculos de requerimientos de resistencia en los pernos y varengas, primero debe calcularse la fuerza de impacto (F_i) y quizás esto sea la parte más incierta de todo el proceso, pero efectuándose razonables suposiciones, desde el lado conservador, se puede garantizar los resultados [2,4].

La Fig.5.18 muestra la fuerza de impacto (F_i) y el momento (M_{kl}) que éste genera en la unión quilla-casco. Para calcular la fuerza de impacto usaremos el concepto de fuerza inercial [4], para ello supondremos que el tiempo de impacto es de aproximadamente 0.25 segundos [2,4] y la velocidad, antes del suceso, sea la máxima alcanzable (Tabla 1.1), ver ecuación (5.61).

$$F_i = m \cdot a_r \tag{5.61}$$

$$a_r = \frac{V_s}{t_s}$$

Donde:

- m : Desplazamiento en condición de máxima carga (kg), ver Tabla 1.1
- a_r : Desaceleración de impacto total de la embarcación (m/s^2),
- t_s : Tiempo de impacto (0.25 s) [2.4]
- V_{max} : Velocidad máxima (m/s), ver Tabla 1.1

Ahora es relativamente sencillo calcular el momento del impacto (M_{kl}), ver ecuación (5.62). Este momento genera una fuerza (P_r), ver ecuación (5.63), que somete a tracción la proa de la unión quilla casco y a compresión el lado opuesto, ver Fig 5.18. Por la magnitud de esta fuerza (P_r), será necesario recalcular los refuerzos internos en esa sección, para ver si el módulo de sección de las varengas existentes son suficientes para soportar este nuevo requerimiento. El módulo de sección requerido en la(s) varenga(s) es sencillo de deducir teniendo en cuenta la fuerza P_r , la longitud no soportada de la(s) varenga(s) y la resistencia mecánica del material en tracción (ver Tabla 4.8), ver ecuaciones (5.65) y (5.66). Es evidente que las implicancias geométricas de la quilla son determinantes en el cálculo de las cargas (ver fig. 5.18), pero es obvio también que la forma y peso de la quilla también son fundamentales en temas relacionados a la maniobrabilidad, navegabilidad y estabilidad del yate velero, finalmente este último es preponderante.

$$M_{kl} = F_i \cdot H \quad (5.62)$$

$$P_r = \frac{M_{kl}}{K_r} \quad (5.63)$$

$$\sigma_{y25} = \frac{P_r}{n_{kb25} \cdot A_b} \quad (5.64)$$

$$M_{fl} = \frac{P_r \cdot L_f}{4} \quad (5.65)$$

$$SM_{fl} = \frac{M_{fl}}{\sigma_{ut}} \quad (5.66)$$

Donde:

M_{kl} : Momento longitudinal en la unión quilla-casco producto de la varada o encalladura (Nm).

P_r : Fuerza a popa y proa de la unión quilla-casco (N), a consecuencia del momento generado por la fuerza de impacto F_i , ver Fig. 5.18.

σ_{y25} : Mínimo esfuerzo de rotura requerido en los pernos existentes dentro del 25% del área de la quilla (N/mm^2)

n_{kb25} : Número de pernos existentes dentro del 25% del área de la quilla (4 pernos)

A_b : Área de la sección transversal de un perno, cuyo diámetro es d_{kb} (mm), ver ecuación 5.57

K_r, H : Características geométricas de la quilla (m), ver Fig 5.18.

L_f : Longitud no soportada de las varengas (m), ver Tabla 5.9.

M_{fl} : Momento de flexión en la varenga(s) (Nm)

SM_{fl} : Mínimo módulo de sección requerido en la varenga (s) (cm^3)

σ_{ut} : Resistencia a la rotura en tensión del laminado a usar, ver Tabla 4.8.

El centro de la rotación para la quilla es muy incierto y depende de la rigidez de diversas partes del empalme de quilla/casco así como la inclinación y/o de la geometría del empalme. Puesto que los pernos de la quilla y el material en el empalme son deformados cuanto más alejados se encuentra del centro rotatorio, es probable que solamente los pernos más a proa están sometidos a tracción y que a popa de la quilla, el área de empalme común quilla-casco está sujeta a la máxima presión [2].

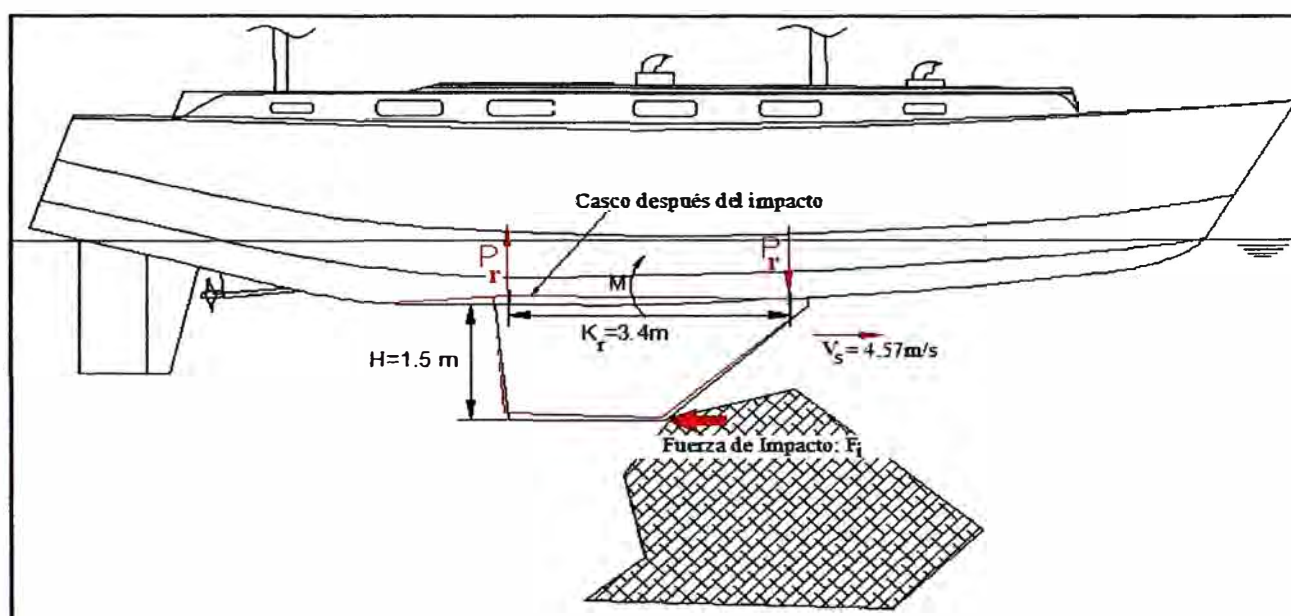


Fig. 5.18 Carga producida por el impacto de una roca submarina sobre la quilla y finalmente sobre la unión quilla-casco.

Una manera razonable de calcular el esfuerzo de tensión requerida (σ_{y25}) para los pernos más a proa de la quilla, es asumir que el número de los pernos (n_{kb25}) situados dentro del 25% delantero de la quilla están al cuidado de las fuerzas de encallado (P_r). En el Velero Yate UNI tenemos cuatro pernos en el área real, así que el esfuerzo de tensión requerida es 99.5 N/mm^2 , ver Tabla 5.21. Puesto que

la resistencia de fluencia para el acero inoxidable AISI-316 es 195 N/mm^2 , ver Anexo B, es obvio que no hay riesgo de rotura en los pernos de la quilla, pese a la condición crítica del encallamiento. El área más sensible es la parte de popa, donde la quilla puede ocasionar problemas al casco, que normalmente se salvaguarda con un laminado extra en esa zona (ver Anexo C).

Los resultados de los cálculos efectuados se muestran en la Tabla 5.22, donde podemos notar que el requerimiento mínimo de módulo de sección de las 4 varengas implicadas (2 a popa y 2 a proa) es $354.5/2 = 177.26 \text{ cm}^3$, ver Tabla 5.22 y Fig. 5.5, pero felizmente la varenga seleccionada anteriormente (teniendo en cuenta el momento transversal generado por el lastre-quilla, sección 5.5) también cubre los requerimientos de esta sección, ver Fig. 5.19.

	Valor	Unidades	Ecuaciones
F_i	361210.4	N	5.61
M_{kl}	545427.7	Nm	5.62
P_r	162814.2	N	5.63
σ_{v25}	131.5	N/mm^2	5.64
M_{fl}	54949.8	Nm	5.65
SM_{fl}	354.5	cm^3	5.66

Tabla 5.22. Resumen de cálculos de la quilla, considerando las cargas longitudinales, como consecuencia de la varada o encalladura. El módulo de sección requerido en las varengas, implica una altura de varenga representativa que afecte la disposición general de interiores, por tanto se considerará cuatro varengas al cuidado de la carga P_r (2 a popa y 2 a proa, ver Fig. 5.5 y Fig. 5.18).

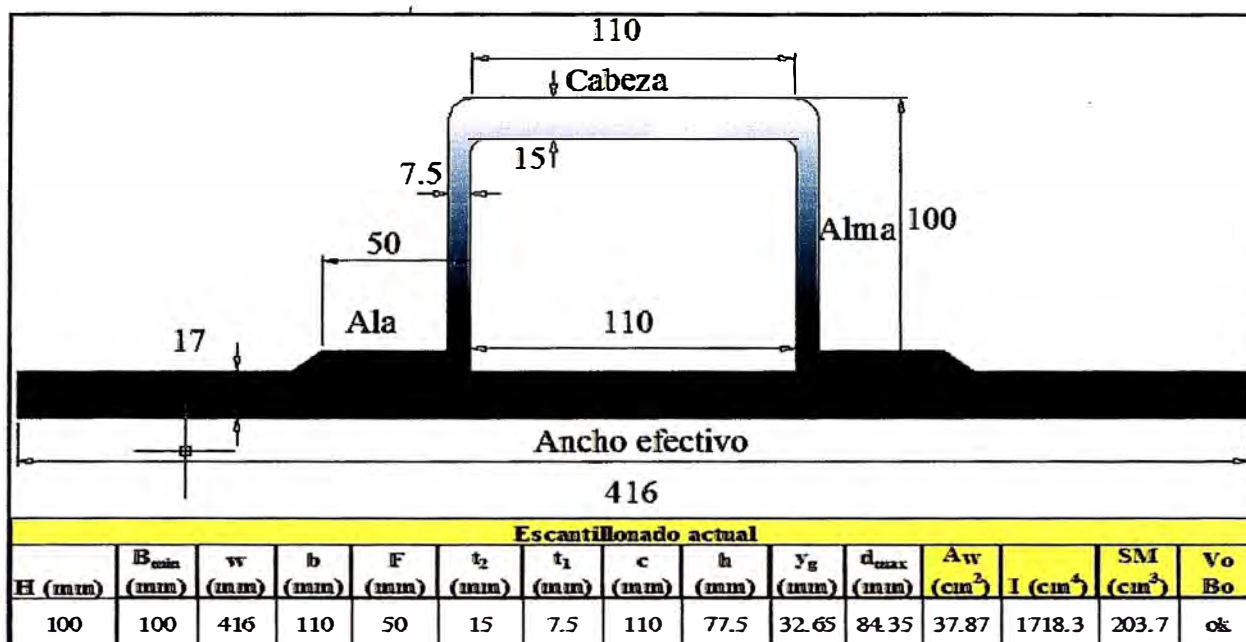


Fig.5.19. Dimensiones y escantillado de la varenga que soporta satisfactoriamente: a) cargas relativas de diseño (ver Tabla 5.9), b) las cargas transversales y longitudinales en la quilla (Tabla 5.21).

5.6. Cálculo del soporte del mástil.

El análisis y cálculo del soporte del mástil (varenga), inicialmente no fue considerado en el índice, pero a bien del proyecto y gracias a la sugerencia del Ing. Nicolás Cortez (Profesor Principal de la especialidad de Ingeniería Naval) ahora, en las siguientes paginas, podemos ver su importancia. Los cálculos se realizaron 2 dos formas, la primera utilizando únicamente la buena práctica de ingeniería [2,4] y la segunda usando las reglas de estandarización de la ISO 12215-9 [30] y la buena práctica de la ingeniería [2,4].

5.6.1 Cálculo del soporte del mástil del yate velero, según la buena práctica de la ingeniería.

Según lo descrito en el capítulo 2 **“Sobre un yate a vela normalmente lastrado, la carga acumulada en el soporte del mástil, que vienen de los stays, obenques y de la tensión de driza puede alcanzar un valor del doble del desplazamiento de la embarcación (ver Fig. 2.2 y Fig. 2.3)”** podemos obtener la carga axial del mástil, ver Tabla 5.23. Del mismo modo como se cálculo las varengas de soporte de la quilla, es decir, considerando los casos típicos de condiciones de carga en las que pueden trabajar las vigas (ver Fig. 5.20), es posible calcular los requerimientos mínimos de resistencia en el soporte del mástil (ver Tabla 5.23)

	Valor	Unidades
Fuerza axial en el mástil, F_{mssu}	355320	N
Longitud no soportada de la varenga	0.5	m
Momento de flexión en la varenga, M_{fl}	44415	Nm
Módulo de sección mínima de la varenga, SM_{fl}	287	cm ³

Tabla 5.23 Cálculo del soporte del mástil considerando los refuerzos longitudinales 5 (ver Fig. 5.5)

Cabe mencionar que las varengas comunes “4b” (ver Fig. 5.5) tienen una longitud no soportada de 1.5m, pero a bien de reducir el módulo de sección de la varenga-soporte del mástil se colocó los refuerzos longitudinales “5” (ver Fig. 5.5) con la finalidad de distribuir longitudinalmente las cargas producidas en la

varenga-soporte del mástil y reducir así la longitud no soportada de la varenga a 0.5m. En caso contrario los resultados serian como se muestra en la Tabla 5.24.

	Valor	Unidades
Fuerza axial en el mástil, F_{mssu}	355320	N
Longitud no soportada de la varenga	1.5	m
Momento de flexión en la varenga , M_{fl}	128804	Nm
Módulo de sección mínima de la varenga, SM_{fl}	834	cm ³

Tabla 5.24 Cálculo del soporte del mástil sin considerar los refuerzos longitudinales 5 (ver Fig. 5.5)

5.6.2 Cálculo del soporte del mástil del yate velero, según la ISO 12215-9 [30] y la buena práctica de la ingeniería.

La carga vertical total sobre la base del mástil (o sobre el puntal bajo cubierta si el mástil llega solo a cubierta) es la suma de las cargas inducidas por la arboladura longitudinal y transversal fijada en el mástil en cuestión.

$$F_{mru} = F_v k_{mru} \quad (5.67)$$

$$F_{mcs} = F_v k_{mcs} \quad (5.68)$$

$$F_{mssu} = F_{mru} + F_{mcs} = F_v k_{mssu} \quad (5.69)$$

Donde:

F_{ru} : Carga axial de rotura en el mástil causada por los stays (N), ecuación (5.67).

F_{cu} : Carga axial de rotura en el mástil causada por los obenques (N), ecuación (5.68).

F_{mssu} : Carga axial de rotura total en el soporte del mástil causada por los stays y obenques (N), ecuación (5.69).

k_{mru} , k_{mcsu} y k_{msu} : Factores cuyo primer subíndice indica el elemento a analizar (m: mástil ms: soporte del mástil), ver Tabla 5. 25

F_v : Carga axial de compresión en el mástil debido al escoramiento (N), ecuación (5.70).

$$F_v = \frac{M_{HD}}{b_c} \quad (5.70)$$

$$M_{HD} = fw (3,3 R_{M15} + R_{Mcrew}) \quad (5.71)$$

$$R_{Mcrew} = 140.n.B_H \quad (5.72)$$

M_{HD} : Momento de escoramiento de diseño, ver ecuación (5.71)

R_{M15} : Momento de adrizamiento a 15° de escora en la condición de máxima carga según la ISO 12217, con toda la tripulación ubicada en la línea de crujía, 43997.8 Nm (según datos obtenidos de De la Torre [1])

R_{Mcrew} : Momento de adrizamiento adicional por la tripulación, solo será calculada si $75 n \geq 0,05 m_{LDC}$

n : Número de tripulantes, ver Tabla 1.1.

m_{LDC} : Definido en Tablas 5,6 y 1.1.

B_H : Manga total, ver Tabla 1.1.

f_w : Factor de categoría de diseño, 1 en nuestro caso, ver Tabla 5.7.

b_c : Distancia horizontal entre la ubicación de los chainplates y crujía (1.6 m en nuestro caso).

Una vez obtenido la fuerza axial de rotura total en el soporte del mástil causada por los stays y obenques (N), ecuación (5.69), es posible calcular el momento flector máximo y el módulo de sección requerido en el soporte del mástil (varenga), mediante las ecuaciones (5.73) y (5.74), sencillamente deducibles de la Fig. 5.20. Estos resultados se muestran en la Tabla 5.26

$$M_{fl} = \frac{F_{mssu} \cdot l_f}{4} \quad (5.73)$$

$$SM_{fl} = \frac{M_{fl}}{\sigma_{ut}} \quad (5.74)$$

Donde:

F_{mssu} : Carga axial de rotura total en el soporte del mástil causada por los stays y obenques (N), ecuación (5.69).

l_f : Longitud no soportada del soporte del mástil (m), longitud entre los refuerzos longitudinales 5, ver Fig. 5.5.

M_{fl} : Momento de flexión del soporte del mástil (varenga), ver Fig. 5.20 (Nm)

SM_{fl} : Mínimo módulo de sección requerido en el soporte del mástil
(varenga) (cm^3)

σ_{ut} : Resistencia a la rotura en tensión del laminado a usar, ver Tabla 4.8.

Disposición y elementos transversales de la arboladura	Relación entre carga y carga de diseño en la arboladura					
	Carga sobre la arboladura		Cargas sobre chainplate		Carga de conexión chainplate/ estructura	
Transversal	k_{rm}	k_{ru}	k_{cn}	k_{cu}	k_{sn}	k_{su}
	1.00	2.00	1.50	3.00	2.50	5.00
One set of spreader V1 transversal spreaders	0.45	0.90	0.68	1.35	1.13	2.25
One set of spreader V1 aft swept spreaders	0.55	1.10	0.83	1.65	1.38	2.75
One set of spreader D1 single	0.65	1.30	0.98	1.95	1.63	3.25
One set of spreader D1 double fore/aft	0.33	0.66	0.50	0.99	0.83	1.65
2 or 3 sets of spreader V1	0.55	1.10	0.83	1.65	1.38	2.75
2 or 3 sets of spreader V1 aft swept spreaders	0.65	1.30	0.98	1.95	1.63	3.25
2 or 3 sets of spreader D1 single	0.40	0.80	0.60	1.20	1.00	2.00
2 or 3 sets of spreader D1 double fore/aft	0.25	0.50	0.38	0.75	0.63	1.25
Longitudinal	k_{rm}	k_{ru}	k_{cn}	k_{cu}	k_{sn}	k_{su}
Headstay Masthead rig	0.45	0.90	0.68	1.35	1.13	2.25
Headstay Fractional rig	0.40	0.80	0.60	1.20	1.00	2.00
Headstay Masthead rig	0.45	0.90	0.68	1.35	1.13	2.25
Backstay Masthead rig	0,43 lb/lh	0,86 lb/lh	0,65 lb/lh	1,29 lb/lh	1,1 lb/lh	4,2 lb/lh
Soporte del mástil	k_{rm}	k_{ru}	k_{cn}	k_{cu}	k_{sn}	k_{su}
Headstay Masthead rig	1.85	3.70	2.78	5.55	4.63	9.25
Headstay Fractional rig	1.75	3.50	2.63	5.25	4.38	8.75

Tabla 5.25. Valores de los coeficientes k_{id} y k_{iu} [30]

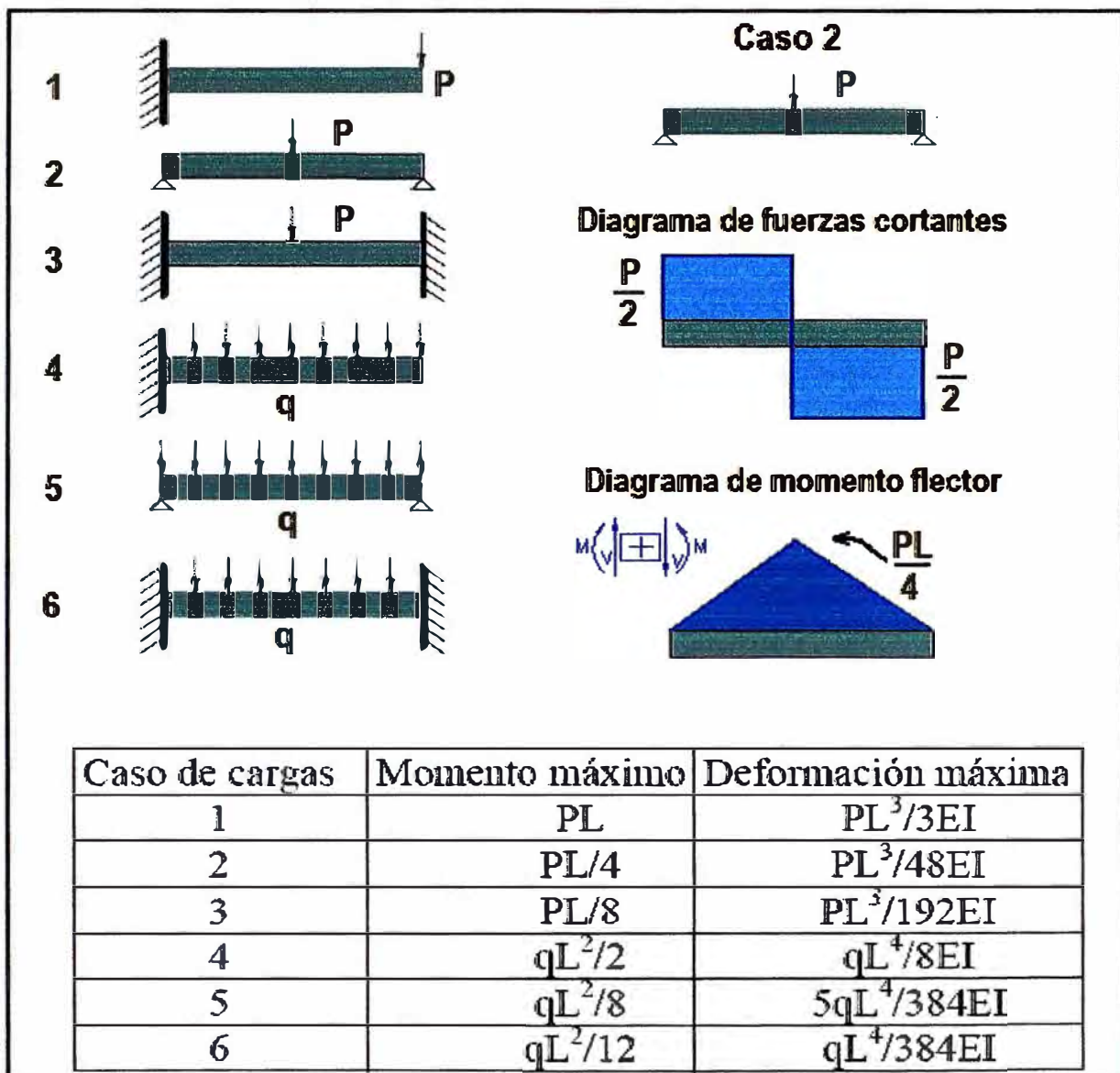


Fig. 5.20. Algunos casos típicos de condiciones de carga en las que pueden trabajar las vigas [4], como los soportes de mástil (caso 2).

	Valor	Unidades
Fuerza axial de rotura total en el soporte del mástil, F_{mssu}	254362	N
Longitud no soportada del soporte del mástil, l_f	0.5	m
Momento de flexión en el soporte del mástil, M_{fl}	31795	Nm
Módulo de sección mínima del soporte del mástil, SM_{fl}	206	cm ³

Tabla 5.26 Cálculo del soporte del mástil considerando los refuerzos longitudinales 5 (ver Fig. 5.5)

A decir verdad, la varenga que diseñamos, está directamente relacionada con la altura de las longitudinales de fondo como se muestra en la Fig. 5.17, por tanto la altura de las varengas es aproximadamente 240 mm en la parte central. Esta altura, con área de cabeza (con perfil similar al de la Fig. 5.19) de 8 cm² y 1.15 cm de espesor produce un módulo de sección de 360 cm³ y un momento de inercia de 6890 cm⁴, por tanto soporta satisfactoriamente la carga de rotura del mástil (ver Tablas 5.23 y 5.26) con una deflexión máxima del orden de 6 10⁻³ mm (ver Fig. 5.20). Así no se necesitará de 4 varengas representativas (2 a cada extremo longitudinal de la quilla, ver Tabla 5.22), sino simplemente 2 (ver Fig. 5.5).

CAPITULO 6

COSTOS

6.1 Introducción.

Como parte fundamental de este proyecto se trato el tema de costos, no pretendiendo entrar en detalle al plano financiero, la intención es dar a conocer, de un modo generalizado, el costo aproximado para la construcción del yate velero en estudio. En todo proyecto de ingeniería siempre es necesario realizar un análisis de costos y este proyecto no es la excepción.

6.2. Costos de construcción del yate velero.

En la construcción de toda embarcación, según el Ing. Orlando Perez [25], existen 3 factores económicos importantes: **costo de materiales** (costo de materiales para la construcción de la estructura del yate velero), **costos de construcción** (costo de mano de obra, sea obrera o especializada) y **costos de equipamiento** (costo de equipos e instalaciones para la comodidad y seguridad de los tripulantes, costo de motor, costo eléctricos, gastos generales, gasto). Otro criterio importante para evaluar los costos que involucran el proyecto completo y cuyos elementos de costos se presentan en la Tabla 6.1, lo adoptamos de la tesis para obtener el Título de Ing. Naval del Ing. Enrique Bonilla [26], los elementos de la estructura tradicional de costos se presentan en dicha tabla.

Para calcular los costos totales de producción de nuestra embarcación, ambos criterios fueron de mucha ayuda, ya que estos involucran los mismos factores económicos, pero ordenados de forma distinta. Por tanto para nuestro cálculo, en lo que respecta a costos, usaremos ambas informaciones [25,26], pero principalmente tomaremos en cuenta los elementos de costo presentado por Ing. Enrique Bonilla [26] (ver tabla 6.1)

CAPAS EN LOS PANELES		Capas de CSM (0.25mm=0.1kg/m ²)			Capas de WR (0.16mm=0.1kg/m ²)		Espesor exterior real (mm)	Capas de CSM (0.25mm=0.1kg/m ²)		Capas de WR (0.16mm=0.1kg/m ²)		Espesor interior real (mm)	Espesor real total (mm)	Espesor requerido según cálculos, ver Tabla 5.5 (mm)
		# de capas (0.45kg/m ²)	# de capas (0.6kg/m ²)	Espesor de CSM (mm)	# de capas (0.6kg/m ²)	Espesor de WR (mm)		# de capas (0.45kg/m ²)	Espesor de CSM (mm)	# de capas (0.6kg/m ²)	Espesor de WR (mm)			
Elemento	Localización (ver Fig. 5.8)													
Panel A1	Fondo: de 60% LWL hasta 100% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel A2	Fondo: de 50% LWL hasta 60% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel A3	Fondo: alrededor de la quilla	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel B1	Fondo: de 37.5% LWL hasta 50% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel B2	Fondo: de 25% LWL hasta 37.5% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel B3	Fondo: de 12.5% LWL hasta 25% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel C	Fondo: limera, más a popa de LWL	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.00
Panel D1	Costado: de 60% LWL hasta 100% LWL	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.50
Panel D2	Costado: de 50% LWL hasta 60% LWL	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel E1	Costado: de 0% LWL hasta 50% LWL	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.50
Panel F	Costado: espejo de popa	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.50
Panel G	Cubierta: altura de mamparo de colisión	1.00	1.00	2.63	1.00	0.96	3.59	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.80	6.00
Panel H	Cubierta: altura de la sección media	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00
Panel I	Mamparo de colisión de proa	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00
Panel J	Mamparo estructural	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00
Panel K	Mamparo estructural	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.50
Panel L	Mamparo estructural de tanque	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00
Panel M	Mamparo estructural	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	2.00	2.25	1.00	0.96	3.21	6.42	5.50
Panel N	Mamparo estructural	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00
Panel Ñ	Mamparo colisión de popa	2.00	0.00	2.25	1.00	0.96	3.21	1.00	1.13	1.00	0.96	2.09	5.30	5.00

Tabla 6.3. Tipo y número de capas que se usarán en el laminado de los paneles tipo sándwich (laminado interior y exterior).

COSTO DE LOS PANELES		Área del panel (m ²)	Número de capas					PVC					Peso (kg)					Costo (\$)											
Ítem	Localización (ver Fig. 5.8)		Gelcoat	CSM 300	CSM 450	CSM 600	WR 600	Espesor real (mm)	espesor del núcleo (mm)	r (kg/m ³)	Volumen (m ³)	Gelcoat	CSM 300	CSM 450	CSM 600	WR 600	PVC	Gelcoat	CSM 300	CSM 450	CSM 600	WR 600	Resina P4	Monoestireno	Mekp	Cobalto	Thinner	PVC	Total
Panel A1	Fondo: de 60% LWL hasta 100% LWL	10.95	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	29.00	120	0.32	0.94	3.5	16	7	14	38.1	3.9	13	47	24	25	974	78	7.7	4.92	274	2694	4144.9
Panel A2	Fondo: de 50% LWL hasta 60% LWL	12.11	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	27.00	120	0.33	1.04	3.9	17	7.8	16	39.2	4.31	14	52	26	28	840	67	6.7	4.24	237	2771	4050.7
Panel A3	Fondo: alrededor de la quilla	6.14	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	27.00	120	0.17	0.53	2	8.9	3.9	7.9	19.9	2.19	7.2	26	13	14	426	34	3.4	2.15	120	1405	2054.2
Panel B1	Fondo: de 37.5% LWL hasta 50% LWL	6.96	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	22.00	120	0.15	0.6	2.2	10	4.5	8.9	18.4	2.48	8.2	30	15	16	483	39	3.8	2.44	136	1299	2034.2
Panel B2	Fondo: de 25% LWL hasta 37.5% LWL	8.33	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	22.00	100	0.18	0.71	2.7	12	5.3	11	18.3	2.97	9.8	36	18	19	578	46	4.6	2.92	163	1079	1959.6
Panel B3	Fondo: de 12.5% LWL hasta 25% LWL	5.84	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	20.00	100	0.12	0.5	1.9	8.4	3.7	7.5	11.7	2.08	6.9	25	13	13	405	32	3.2	2.05	114	687.4	1304.1
Panel C	Fondo: limera, más a popa de LWL	0.85	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	100	0.01	0.07	0.3	1.6	0	1.1	1.37	0.3	1	4.9	0	0	52.6	4.2	0.4	0.27	14.8	80.41	158.96
Panel D1	Costado: de 60% LWL hasta 100% LWL	16.65	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	100	0.27	1.42	5.3	32	0	21	26.6	5.93	20	95	0	0	1027	82	8.2	5.19	289	1568	3100.6
Panel D2	Costado: de 50% LWL hasta 60% LWL	7.72	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	20.00	100	0.15	0.66	2.5	11	5	9.9	15.4	2.75	9.1	33	17	18	536	43	4.3	2.71	151	909.8	1726.1
Panel E1	Costado: de 0% LWL hasta 50% LWL	22.19	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	100	0.36	1.9	7.1	43	0	28	35.5	7.9	26	127	0	0	1369	109	11	6.92	386	2091	4133.1
Panel F	Costado: espejo de popa	3.71	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	100	0.06	0.32	1.2	7.1	0	4.8	5.94	1.32	4.4	21	0	0	229	18	1.8	1.16	64.5	349.8	691.42
Panel G	Cubierta: altura de mamparo de colisión	27.16	1.00	1.00	3.00	1.00	2.00	6.80	20.00	80	0.54	2.32	8.7	39	17	35	43.5	9.67	32	117	59	62	1884	150	15	9.52	531	2047	4917
Panel H	Cubierta: altura de la sección media	19.65	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	10.00	60	0.20	1.68	6.3	28	0	25	11.8	7	23	84	0	0	961	77	7.6	4.86	271	416.6	1851.6
Panel I	Mamparo de colisión de proa	1.76	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	10.00	80	0.02	0.15	0.6	2.5	0	2.3	1.41	0.63	2.1	7.6	0	0	86.1	6.9	0.7	0.44	24.3	66.37	194.99
Panel J	Mamparo estructural	4.19	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	16.00	80	0.07	0.36	1.3	6.1	0	5.4	5.36	1.49	4.9	18	0	0	205	16	1.6	1.04	57.7	252.6	558.64
Panel K	Mamparo estructural	8.37	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	80	0.13	0.72	2.7	16	0	11	10.7	2.98	9.9	48	0	0	516	41	4.1	2.61	145	504.6	1274.8
Panel L	Mamparo estructural de tanque	3.69	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	10.00	80	0.04	0.32	1.2	5.3	0	4.7	2.95	1.32	4.4	16	0	0	181	14	1.4	0.91	50.9	139.2	408.9
Panel M	Mamparo estructural	8.05	1.00	1.00	4.00	0.00	2.00	6.42	16.00	80	0.13	0.69	2.6	16	0	10	10.3	2.87	9.5	46	0	0	497	40	3.9	2.51	140	485.6	1226.8
Panel N	Mamparo estructural	5.23	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	10.00	80	0.05	0.45	1.7	7.6	0	6.7	4.19	1.86	6.2	22	0	0	256	20	2	1.29	72.1	197.3	579.52
Panel Ñ	Mamparo colisión de popa	4.83	1.00	1.00	3.00	0.00	2.00	5.30	10.00	80	0.05	0.41	1.6	7	0	6.2	3.87	1.72	5.7	21	0	0	236	19	1.9	1.2	66.6	182.2	535.24
Otros																													5000
																													41905

Tabla 6.4. Costo total de materiales usados en la fabricación de los paneles sándwich, incluyendo el núcleo; complementar con Tabla 6.2.

Costo total del proyecto	6.2. Costo de construcción del yate velero	
	6.2.1. Costo directo	6.2.1.1 Materiales
		Costo de casco
		Costo de equipo e instalaciones
		Costo motor
		Costos eléctricos
		Gastos generales
		Gastos de ingeniería
		Gastos de imprevistos
		Utilidad
		6.2.1.2 Mano de obra
		H-H de casco y estructura total
		H-H de equipo e instalaciones
		H-H de instalación de sala de maquinas
		H-H de equipos eléctricos
	H-H de cerrajería y varios	
	H-H de revisión general, pruebas de mar e imprevistos	
	6.2.2. Costo indirecto	Gastos de operación
		Gasto en materiales indirectos (elementos esenciales de diseño, planos, etc.)
		Gastos en mano de obra indirecta (como mínimo 1 ingeniero 1 practicante de ingeniería y un ayudante en un astillero menor)
		Gastos Generales (imprevistos)
		Gastos de comercialización
		Gastos de administración
		Gastos de venta (publicidad)
		Gastos Financieros
	Costo pre-construcción del yate velero	
	• Costo del prototipo	
• Costo del molde		
• Costo de mano de obra del prototipo y molde		

Tabla. 6.1 Costo total del proyecto de construcción [26]

6.2.1. Costos directos.

6.2.1.1 Materiales

Costos casco

Para el cálculo de los costos de materiales empleados en la construcción del casco (paneles sándwich y refuerzos internos en laminado sólido simple), se utilizaron criterios prácticos de cálculo que se adoptaron de astilleros de embarcaciones en fibra de vidrio. El costo de la fibra de vidrio no se calcula considerando el peso o volumen del laminado [26], pero si se considerara el espesor de la fibra de vidrio (no espesor del panel) y el contenido de resina, gelcoat y demás constituyentes (ver Tabla 6.2) en proporción a éste, entonces si podríamos calcular, de manera práctica y aproximada, el costo total de los materiales empleados utilizando el peso de los materiales empleados, tal y como se muestra en la Tabla 6.3, 6.4, 6.5 y 6.7

Costo (\$/kg)										
Gelcoat	CSM 300	CSM 450	CSM 600	WR 600	Resina P4	Monoestireno	Mekp	Cobalto	Thinner	PVC (80kg/m ³)
4.16	3.7	3	3.4	4	2.98	2.4	4.7	5	2.1	47.11

Tabla 6.2. Costo de los constituyentes del laminado de fibra de vidrio (Astillero Ballota)

Elemento	Cabeza del perfil									Alma y ala del perfil								Costo (\$)										
	Área total	Número de capas				Peso (kg)				Área total	Número de capas				Peso (kg)				Gelcoat	CSM 300	CSM 450	WR 600	Resina P4	Monoestireno	Mekp	Cobalto	Thinner	Total
		Gelcoat	CSM 300	CSM 450	WR 600	Gelcoat	matt 300	matt 450	WR 600		Gelcoat	CSM 300	CSM 450	WR 600	Gelcoat	matt 300	matt 450	WR 600										
Anillo 1	0.6	1.0	1.0	6.0	6.0	0.1	0.2	1.9	2.5	2.3	1.0	1.0	3.0	3.0	0.2	0.7	3.3	4.4	1.0	3.5	15.4	24.6	388.4	31.0	3.1	2.0	109.5	578.4
Anillo 2	1.1	1.0	1.0	7.0	7.0	0.1	0.4	3.7	4.9	2.9	1.0	1.0	4.0	3.0	0.3	0.9	5.6	5.6	1.4	4.7	27.7	37.7	627.7	50.1	5.0	3.2	176.9	934.6
Anillo 3	1.1	1.0	1.0	7.0	6.0	0.1	0.4	3.7	4.2	3.2	1.0	1.0	4.0	3.0	0.3	1.0	6.2	6.2	1.5	5.1	29.3	37.1	638.4	51.0	5.1	3.2	180.0	950.6
Longitudinal de fondo	1.9	1.0	1.0	6.0	5.0	0.2	0.6	5.6	6.2	6.3	1.0	1.0	3.0	3.0	0.5	2.0	9.1	12.1	2.9	9.7	43.5	65.3	1058.4	84.5	8.4	5.3	298.3	1576.3
Longitudinal de costado	2.0	1.0	1.0	6.0	6.0	0.2	0.6	5.7	7.6	7.0	1.0	1.0	3.0	3.0	0.6	2.2	10.1	13.4	3.2	10.5	46.8	75.0	1183.6	94.5	9.4	6.0	333.6	1762.7
Varengas, 4a	0.9	1.0	1.0	6.0	5.0	0.1	0.3	2.7	3.0	6.9	1.0	1.0	3.0	3.0	0.6	2.2	10.0	13.4	2.8	9.3	37.7	58.3	940.9	75.1	7.5	4.7	265.2	1401.5
Refuerzos longitudinales, 6	0.4	1.0	1.0	5.0	5.0	0.0	0.1	0.9	1.2	1.6	1.0	1.0	3.0	2.0	0.1	0.5	2.4	2.1	0.7	2.4	9.8	11.9	214.8	17.2	1.7	1.1	60.5	320.0
Carlingas del motor, 7	0.3	1.0	1.0	5.0	5.0	0.0	0.1	0.7	1.0	1.5	1.0	1.0	3.0	2.0	0.1	0.5	2.2	1.9	0.6	2.1	8.7	10.5	190.7	15.2	1.5	1.0	53.8	284.2
Refuerzo de mamparo I	0.1	1.0	1.0	6.0	6.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	1.0	1.0	3.0	3.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.1	0.3	1.5	2.4	37.5	3.0	0.3	0.2	10.6	55.8
Refuerzo de mamparo J	0.3	1.0	1.0	6.0	5.0	0.0	0.1	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	3.0	3.0	0.1	0.3	1.3	1.7	0.4	1.4	6.1	9.1	148.2	11.8	1.2	0.7	41.8	220.7
Refuerzo de mamparo K	0.7	1.0	1.0	7.0	6.0	0.1	0.2	2.3	2.6	1.8	1.0	1.0	4.0	3.0	0.2	0.6	3.5	3.5	0.9	2.9	17.2	21.9	375.6	30.0	3.0	1.9	105.9	559.3
Refuerzo de mamparo M	0.7	1.0	1.0	7.0	6.0	0.1	0.2	2.3	2.6	1.8	1.0	1.0	4.0	3.0	0.2	0.6	3.5	3.5	0.9	2.9	17.2	21.8	374.7	29.9	3.0	1.9	105.6	557.9
Refuerzo de mamparo Ñ	0.2	1.0	1.0	6.0	6.0	0.0	0.1	0.7	0.9	0.5	1.0	1.0	3.0	3.0	0.0	0.2	0.8	1.0	0.3	0.9	4.4	7.1	111.0	8.9	0.9	0.6	31.3	165.3
Refuerzo de espejo de popa	0.2	1.0	1.0	6.0	5.0	0.0	0.1	0.6	0.7	0.7	1.0	1.0	3.0	3.0	0.1	0.2	1.0	1.3	0.3	1.1	4.8	7.2	116.3	9.3	0.9	0.6	32.8	173.2
Otros																												1500
																												11041

Tabla 6.6. Costo total de materiales usados en el moldeado de los refuerzos tipo laminado simple; complementar con Tabla 6.2. Con el cálculo del escantillonado (realizado en el capítulo 5) se calculó la cantidad en kilogramos de fibra de vidrio y núcleo PVC requerido en la construcción del casco, y con los costos por kilogramo de fibra de vidrio, PVC, resina y demás constituyentes (Tabla 6.2), se calculó el costo necesario para la construcción del casco. El costo total de materiales es la suma de todos costos de materiales usados en los paneles y refuerzos internos del casco, ver Tabla 6.4 y 6.6 (\$ 52946 o s/. 148249 según el tipo de cambio del 02/06/08 (1\$=2.8 soles)).

Elemento	Cabeza del perfil									Alma y ala del perfil								
	Capas de CS 0.45kg/m ² (0.25mm=0.1kg/m ²)	Espesor de CSM	Capas de WR 0.6kg/m ² (0.16mm=0.1kg/m ²)	Espesor de WR	Espesor total real	Espesor total requerido	Longitud total del perfil	Ancho de la cabeza	Área total	Capas de CS 0.45kg/m ² (0.25mm=0.1kg/m ²)	Espesor de CSM	Capas de WR 0.6kg/m ² (0.16mm=0.1kg/m ²)	Espesor de WR	Espesor total requerido	Espesor total real	Longitud total del perfil	Ancho del alma y ala	Área total
Anillo 1	6.0	6.8	6.0	5.8	12.5	12.0	8.6	75.0	0.6	3.0	3.4	3.0	2.9	6.0	6.3	8.6	265.9	2.3
Anillo 2	7.0	7.9	7.0	6.7	14.6	14.5	11.4	96.6	1.1	4.0	4.5	3.0	2.9	7.3	7.4	11.4	257.1	2.9
Anillo 3	7.0	7.9	6.0	5.8	13.6	13.5	12.3	88.9	1.1	4.0	4.5	3.0	2.9	6.8	7.4	12.3	259.9	3.2
Longitudinal de fondo	6.0	6.8	5.0	4.8	11.6	11.5	27.7	69.6	1.9	3.0	3.4	3.0	2.9	5.8	6.3	27.7	227.2	6.3
Longitudinal de costado	6.0	6.8	6.0	5.8	12.5	12.0	26.2	75.0	2.0	3.0	3.4	3.0	2.9	6.0	6.3	26.2	265.9	7.0
Varengas, 4a	6.0	6.8	5.0	4.8	11.6	11.5	13.3	69.6	0.9	3.0	3.4	3.0	2.9	5.8	6.3	13.3	520.5	6.9
Refuerzos longitudinales, 6	5.0	5.6	5.0	4.8	10.4	10.3	7.1	53.7	0.4	3.0	3.4	2.0	1.9	5.1	5.3	7.1	231.0	1.6
Carlingas del motor, 7	5.0	5.6	5.0	4.8	10.4	10.3	2.9	107.3	0.3	3.0	3.4	2.0	1.9	5.1	5.3	2.9	520.5	1.5
Refuerzo de mamparo I	6.0	6.8	6.0	5.8	12.5	12.0	1.1	75.0	0.1	3.0	3.4	3.0	2.9	6.0	6.3	1.1	165.7	0.2
Refuerzo de mamparo J	6.0	6.8	5.0	4.8	11.6	11.0	4.0	63.6	0.3	3.0	3.4	3.0	2.9	5.5	6.3	4.0	228.0	0.9
Refuerzo de mamparo K	7.0	7.9	6.0	5.8	13.6	12.8	8.2	82.4	0.7	4.0	4.5	3.0	2.9	6.4	7.4	8.2	222.0	1.8
Refuerzo de mamparo M	7.0	7.9	6.0	5.8	13.6	12.8	8.2	82.4	0.7	4.0	4.5	3.0	2.9	6.4	7.4	8.2	222.0	1.8
Refuerzo de mamparo Ñ	6.0	6.8	6.0	5.8	12.5	12.0	3.3	75.0	0.2	3.0	3.4	3.0	2.9	6.0	6.3	3.3	165.7	0.5
Refuerzo de espejo de popa	6.0	6.8	5.0	4.8	11.6	11.5	3.0	69.6	0.2	3.0	3.4	3.0	2.9	5.8	6.3	3.0	227.2	0.7

Tabla 6.5. Tipo y número de capas que se usarán en el moldeo de los perfiles tipo laminado sólido simple o laminado simple.

Costo de equipos de instalación

Los equipos que se emplearán en la embarcación y el costo respectivo de cada quien, se muestran en la Tabla 6.7.

Elementos constituyentes (Materiales)	Costo (soles)
Equipos de acomodaciones; mesa protocolar, asientos, colchones frazadas, armarios, etc.	11050
Equipo de salvamento	10982
Equipo de cocina y baño	4299
Equipo de fondeo; molinete, ancla, cadenas, cabos, giratorios de ancla, etc.	5248
Sistema de gobierno; timón, codaste, soportes de timón y mecanismos	6000
Aparejos en general; mástil principal, mástil de mesana, velas, stays, obenques, cornamusas, cables y cabos, etc.	122080
Equipos contra incendio; 2 extinguidores, mangueras, etc.	1453
Otros	15966
	177079

Tabla 6.7 Costo de equipos de la embarcación.

Costo de maquinaria de propulsión

El conjunto de la maquinaria de propulsión motriz que usará la embarcación y sus respectivos costos se muestra en la Tabla 6.8

Elementos constituyentes	Costo (soles)
Motor principal, incluye: silenciador, cambio de marcha, reductor y tablero	84000
Equipo propulsor completo con hélice de bronce, tubo codaste, prensa estopa, eje de acero y accesorios	7000
Bomba; sistema de achique (galvanizado), manifold, válvulas y filtros	2800
2 tanques de petróleo, 1 tanque de agua	1000
	94800

Tabla 6.8 Costo del conjunto de la maquinaria de propulsión.

Costos eléctricos

Se consideraron todos los elementos constituyentes que producen y/o conducen energía para el alumbrado y la navegación, ver Tabla 6.9.

Elementos constituyentes	Costo (soles)
Equipos de navegación	20000
Luces en general y brújula	4424
Baterías y cables usados	3672
Otros	2810
	30906

Tabla 6.9 Costo del conjunto del sistema eléctrico.

Costos generales

Se estimara un costo general basado es una embarcación tomado como referencia y que corresponde a: revestimientos, carpintería, barandas, seguros de puertas, claraboyas, ventiladores, cachimbas, puertas y otros (se incluye la depreciación de las herramientas y otros. **6000 soles**

Gastos de ingeniería

En vista que el proyecto fue elaborado en su totalidad por ingenieros locales (no fue un proyecto comprado) el porcentaje del costo total asignado a costo de ingenierota es aproximadamente 6-7% del costo del casto y mano de obra.

17728 soles

Gastos de imprevistos

La estimación de los imprevistos, tales como: fletes, importaciones, recargos, etc. Se estima normalmente en un 3%, pero como en nuestro caso se trata de un proyecto que se construirá por primera vez en nuestro país, es razonable pensar en un 6% del costo directo, sin considerar utilidades. **34786 soles**

Utilidades

En todo proyecto de inversión siempre es importante ver la rentabilidad o utilidad del proyecto (en este caso, por parte del astillero), así un porcentaje de utilidad normalmente usado es 8%. **49165 soles**

Costos total de materiales	Costo (soles)
Costo de casco	148249
Costo de equipo e instalaciones	177079
Costo motor	94800
Costos eléctricos	30906
Gastos generales	6000
Gastos de imprevistos	34786
Gastos de ingeniería	17728
Utilidad	49165
Mano de obra	105012
	663724

Tabla 6.10 Costos total de materiales.

6.2.1.2 Mano de obra

Considerando 10 y 8 soles el costo promedio por hora hombre, según sea el caso, el costo de la mano de obra es como se muestra en la Tabla 6.11.

Actividad	Horas hombre (H-H)	Soles/ H-H	Costo (soles)
Construcción del casco y estructura	7271	8	58170
Instalación de equipos y sistemas	2424	10	24238
Instalación de sala de máquinas	1060	10	10604
Instalación del sistema y equipos eléctricos	400	10	4000
Cerrajería y varios	500	8	4000
Revisión general, pruebas de mar e imprevistos	400	10	4000
			105012

Tabla 6.11 Costos de mano de obra, según actividad.

6.2.2. Costos indirectos.

Entre los gastos indirectos, ver Tabla 6.12, tenemos los gastos adicionales generados en la construcción, como por ejemplo: planos, reportes técnicos, mano de obra del ingeniero residente y su ayudante, etc.

Elementos		Costo (soles)
Gastos de operación	Planos, reportes técnicos, etc.	2400
	Ingeniero residente	12000
	Ayudante residente	4500
	Gastos generales varios	10000
Gastos de comercialización (5% costo total)	Administración	33186
	Ventas	
	Financiación	
	Gastos generales varios	
		62086

Tabla 6.12 Costos indirectos

El costo total del proyecto no solo incluye costos directos e indirectos (ver Tabla 6.1), sino también los costos de pre-construcción, ver Tabla 6.13.

Ítem		Costo (soles)
Costo directo		663724
Costo indirecto		62086
Costo de pre-construcción del yate velero	Costo del prototipo	61294
	Costo del molde	73920
	Costo de mano de obra del prototipo y molde	20400
		881425

Tabla 6.9 Costos total, el costo del prototipo es aproximadamente el 50% del costo de una embarcación de madera [26]; el costo del molde es el 80% del costo de construcción de un casco de fibra de vidrio de similares características al prototipo, sin considerar cubierta ni mamparos [26]. Los datos de cálculo de costos de una embarcación de madera se obtuvieron del proyecto de investigación “embarcación pesquera artesanal multipropósito” desarrollado por la empresa naval SINAMC en el mes de mayo del presente año (2008).

CONCLUSIONES

1. Luego de estudiar las cargas globales y locales al cual esta sometido un yate velero, podemos concluir que la resistencia estructural de una embarcación menor ($L_H < 24m$) se calcula considerando únicamente las cargas locales, es decir, la influencia de las cargas globales esta garantizada. Esto se debe a que el módulo de sección que obtiene luego de calcular el escantillonado (usando solamente las cargas locales) es muy superior al módulo de sección requerido por las cargas globales de oleaje y arboladura. Es por ello que las sociedades de clasificación solo consideran cargas hidrodinámicas e hidrostáticas, es decir, cargas locales. Sin embargo, en yates extremos, con los aparejos extraordinariamente grandes, pequeño puntal (altura de la viga-casco) y contruados con capas delgadas de materiales exóticos, es necesario comprobar la resistencia de la viga casco y especialmente las tensiones de compresión en cubierta.
2. Es importante conocer la magnitud y dirección de las cargas, para ello es necesario el uso de bibliografía referida, estudios de investigación o software's de modelamiento, con la finalidad de distribuir coherentemente los refuerzos internos y salvaguardar la resistencia estructural de la embarcación en su conjunto. Así se podrá definir acertadamente el tipo de sistema de refuerzos a

utilizar. En Yate Velero UNI, siendo fundamental la influencia de los aparejos en la resistencia longitudinal (en la sección crítica) y los pantocazos en la resistencia transversal (entre el mamparo de pique de proa y la sección crítica), lo ideal es usar un sistema de construcción mixto.

3. El cálculo estructural en sándwich indirectamente requiere del cálculo estructural en laminado sólido simple, como se pudo ver en secciones correspondientes del capítulo 5, es así que como llegamos a la conclusión, luego de un procedimiento de cálculo sencillo, que el plástico reforzado con fibra de vidrio en el laminado sándwich es el 44.4% del PRF del laminado sólido simple; también se pudo notar una disminución de peso de aproximadamente 51.5%. La verdadera razón por el cual se escogió este tipo de laminado no solo fue el peso, sino también la rigidez a la flexión, la capacidad de absorber esfuerzos cortantes y la capacidad de ser un buen aislante térmico y sonoro.

4. Se requiere un mayor esfuerzo en investigación de los materiales compuestos a fin de calcular propiedades mecánicas de materiales diversos, mediante el cálculo, con un mayor grado de confiabilidad. Entretanto los cálculos experimentales proveen los resultados más acertados. En nuestro proyecto utilizamos propiedades mecánicas de materiales que han sido obtenidas experimentalmente, pero las propiedades de materiales con características específicas de proyectos particulares no siempre estará a disposición.

5. Si bien en el cálculo del escantillado se utilizó la buena práctica de ingeniería, el uso de reglas de estandarización y normas de las sociedades de clasificación normalmente sobredimensiona el escantillado, por ello no debe descartarse el uso de las herramientas de modelamiento por elementos finitos a fin de conseguir la optimización estructural, partiendo de los cálculos efectuados tradicionalmente. El método de elementos finitos es una herramienta muy útil para obtener mapas del estado de tensiones de la estructura de un casco, permite además una adecuada identificación de zonas de concentración de tensiones.

6. Frente a la creciente economía peruana, la disminución del riesgo país en inversión y los requerimientos de armadores, desde el punto de vista comercial, el proyecto de diseñar embarcaciones es serie no está lejos de darse. Es evidente que este tipo de proyectos implican muchos factores que van desde la cultura náutica, calidad de mano de obra, análisis de costos (estudio de mercado, oferta, demanda, VAN, TIR, impuestos y otros), financiación, etc. Pero una economía de libre mercado, un ambiente globalizado y la seguridad social están creando un ambiente favorable para este tipo de proyectos.

RECOMENDACIONES

1. Para el cálculo estructural de todo artefacto flotante es necesario conocer las cargas globales y locales a los que estará sometido, luego un vistazo cualitativo de intensidad relativa, ubicación y dirección de las diferentes áreas de carga es de gran utilidad en la disposición de refuerzos. El conocimiento de los materiales compuestos es fundamental para el cálculo del escantillonado, **finalmente** un análisis de optimización estructural sería fundamental.
2. La regla de estandarización de la ISO 12215-5 del año 2000, comparativamente con la ISO 12215-5 del año 2004 no tiene variación significativa en el cálculo de las cargas de diseño, a excepción en la zona de pantocazos donde las reglas de estandarización del año 2004 para veleros fija un factor de reducción de área de 0.75 (donde era 0.4). Pero es recomendable utilizar la versión más reciente.
3. Considerar la pala de timón propuesta en esta tesis, una pala de timón tipo espada sin codaste ni tintero. Este timón cumple todas las características básicas que todo timón debe tener, un buen balance, una área proyectada del timón más a proa del eje de pala no mayor al 17% de área proyectada total del timón [16] y un área proyectada total en concordancia con el área proyectada de carena y área vélica según lo indicado por De La Torre [1].

4. Complementar el proyecto integral realizando el diseño y cálculo del sistema de propulsión, como un proyecto de tesis. El reciente desarrollo de los materiales compuestos hace interesante el estudio de este sistema ya que en la actualidad se diseñan y construyen ejes, bocinas y hasta hélices con materiales compuestos. La capacidad de calcular estructuras en materiales compuestos es ya madura en otras industrias, y las formas de cálculo tradicional en ingeniería naval siempre ha existido. La necesidad por lo tanto es la de aunar las dos.

5. La revisión y mejora integral del proyecto, como parte de la espiral de diseño, incluyendo la implementación de los demás sistemas sería otro tema de tesis de mucho interés para quienes se inclinan por la náutica comercial y de recreo, un sector nuevo en nuestro medio, desde el punto de vista de la ingeniería,.

OBSERVACIONES

1. El diseño de un yate velero es una iteración “ensayo y error” procedimiento donde el resultado final tiene que satisfacer determinados requerimientos [2]. Siguiendo la espiral de diseño naval que se muestra en la Fig.1 [2,31], podemos darnos cuenta que los procedimientos del perfil operacional son: el conocimiento de los conceptos de cada una de las áreas del diseño, el análisis de viabilidad en todas las áreas, el análisis preliminar y luego el afinamiento de este para dar con el proyecto constructivo y finalmente el proyecto final [2].

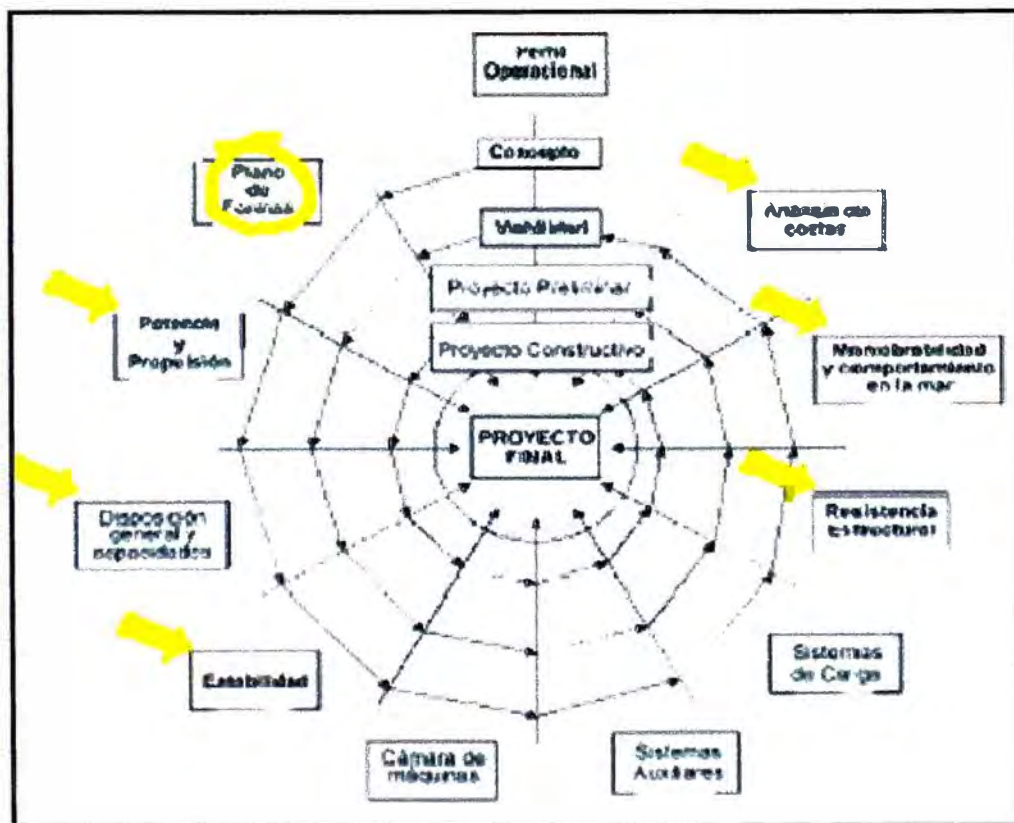


Fig.1. La espiral de diseño [2,31]

Centrándonos en la fase del proyecto del buque “resistencia estructural”, ver Fig. 1 y Tabla 1, podemos darnos cuenta que en un proyecto preliminar es necesario: calcular la resistencia longitudinal, el proyecto de la cuaderna maestra y los escantillonados típicos, análisis de áreas críticas y la estimación de pesos basado en escantillonados calculados, ver Tabla 1. En la tesis de De la Torre [1] no se tuvieron en cuenta dichos criterios, por lo que, en esta tesis, **dichos cálculos contribuyen al proyecto integral**. Adicionalmente a lo que se debe calcular en un proyecto preliminar, nosotros realizamos nuestros cálculos a nivel de la fase contractual proyecto, ver Tabla 1.

Fases del Proyecto del Buque	Proyecto de la Estructura
Proyecto conceptual	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios paramétricos. • Identificación de las cuestiones principales de resistencia, validación de la viabilidad. • Estimación de pesos basados en proyectos anteriores.
Anteproyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo de resistencia longitudinal. • Proyecto de la cuaderna maestra y escantillonados típicos. • Análisis de áreas críticas. • Estimación de pesos basado en escantillonados calculados.
Proyecto de contrato	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecto de todos los elementos estructurales. • Detalle de áreas críticas.
Proyecto de detalle	<ul style="list-style-type: none"> • Detalle de todos los elementos estructurales. • Planificación de la producción. • Selección de juntas.

Tabla 1. Objetivo del proyecto estructural en las fases del proyecto del buque [29].

2. Con el desarrollo de esta tesis, ahora, estamos en la capacidad de calcular la estructura de cualquier embarcación en fibra de vidrio, esto es si se siguen los procedimientos presentados en cada capítulo de esta tesis, además es el primer precedente de cálculo estructural en fibra de vidrio de una embarcación en la Facultad de Mecánica de la UNI. Con los cálculos realizados por De la Torre [1], seríamos incapaces de realizarlo, **lo cual es una contribución al proyecto integral.**

3. La disposición general es un proceso que no se definió sino hasta efectuar los cálculos estructurales propiamente. Es decir, la disposición de refuerzos realizada en el capítulo 3 de esta tesis (Fig. 3.5) [4] (que por cierto es totalmente diferente a la presentada por el Ing. De la Torre [1]) fue modificada en el proceso iterativo que se tuvo que realizar para escantillonar (paneles y refuerzos), finalmente la disposición de refuerzos quedó como lo que se muestra en la Fig.5.5.

Por lógica, a mayor número de refuerzos internos menores son las luces en los paneles y refuerzos, por tanto menores son las dimensiones de escantillonado, pero esto no se hace notar en los cálculos del diseño de De la torre [1] ya comparativamente nuestro cálculo es más óptimo ya que desarrollamos procesos iterativos de cálculo para dar con el sistema de refuerzos más ligero, pero a la vez más resistente. Esto se debe a que el objetivo del Ing. De la Torre [1] no fue

garantizar la resistencia estructural a toda prueba, pero en nuestro caso si lo es, lo cual indica complemento y mejora en el proyecto integral. Para más detalles:

- a) Nosotros calculamos todos los refuerzos y paneles de costado fondo y cubierta, ver Tabla 5.15 y 5.19.
 - b) Con pocos refuerzos tenemos menor escantillonado, comparativamente con el diseño preliminar [1] (es más óptimo y ligero), ver Tabla 5.15.
 - c) Calculamos el escantillonado en laminado simple y en laminado tipo sándwich (ver Tabla 5.15), logrando así comparar pesos, ver sección 5.3.3.1. Cálculos que no se realizaron anteriormente.
 - d) Adicionalmente se calcularon quilla, timón y soporte del mástil.
4. En el proyecto preliminar se menciona el uso del sistema de construcción tipo sándwich, además se mencionó el uso de las fibras mat y woven roving y el núcleo de PVC, pero no se mencionan el porque de su uso. Además no se mencionan el tipo de resina que se usará, la geometría de las fibras, la direccionalidad de las fibras y otras propiedades importantes de las resinas, fibras y núcleos, ver Capítulo 4 [4].

Lo que desarrollamos en esta tesis, complementariamente al proyecto preliminar [1], es una investigación teórica de materiales compuestos que finalmente nos permitió determinar, con suficiente base, las propiedades mecánicas se muestran

en la tabla 4.8 y 4.9 [4]. Adicionalmente podemos notar los siguientes puntos importantes que todo calculista, en fibra de vidrio, debe conocer:

- a) Matrices termoestables (Resinas), ver Tabla 4.1. [4]
- b) Geometría de los refuerzos, Fig. 4.2 [4]
- c) Carga y direccionalidad, Fig. 4.3 [4]
- d) Cuadro comparativo-cualitativo, principales materiales de núcleo, Tabla 4.4 [4].

Anexo A

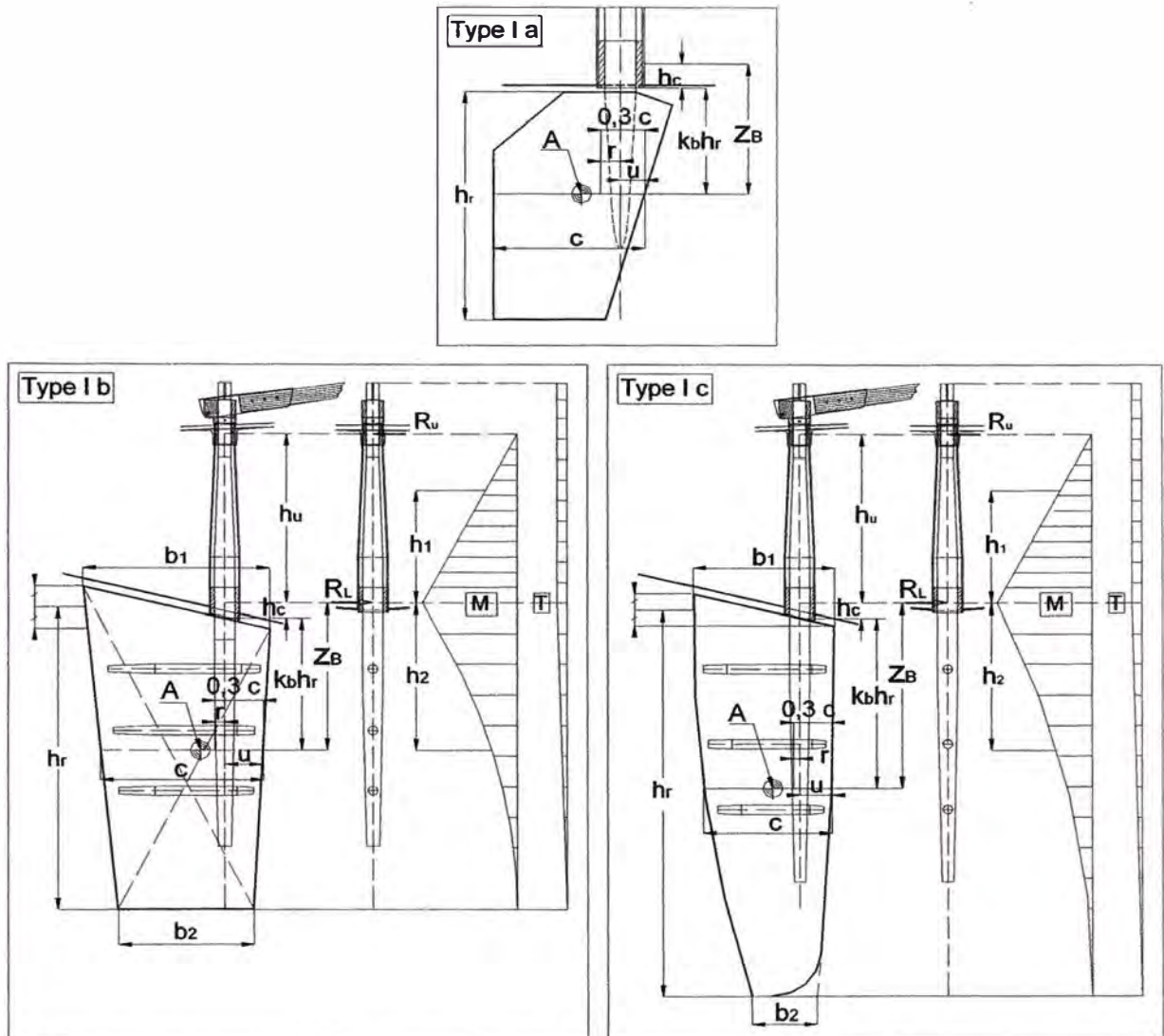


Fig. A.1 Tipos de pala de timón sin codaste [27].

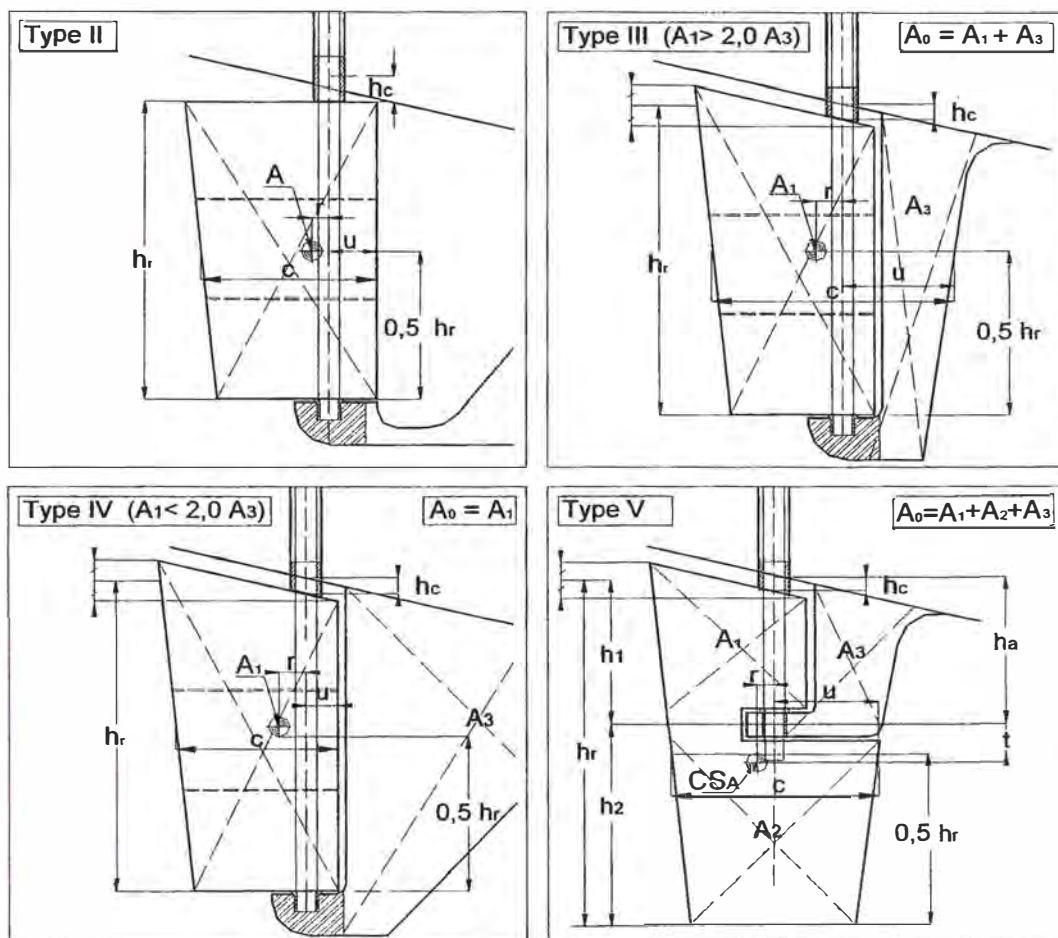


Fig. A.2 Tipos de pala de timón con codaste [27].

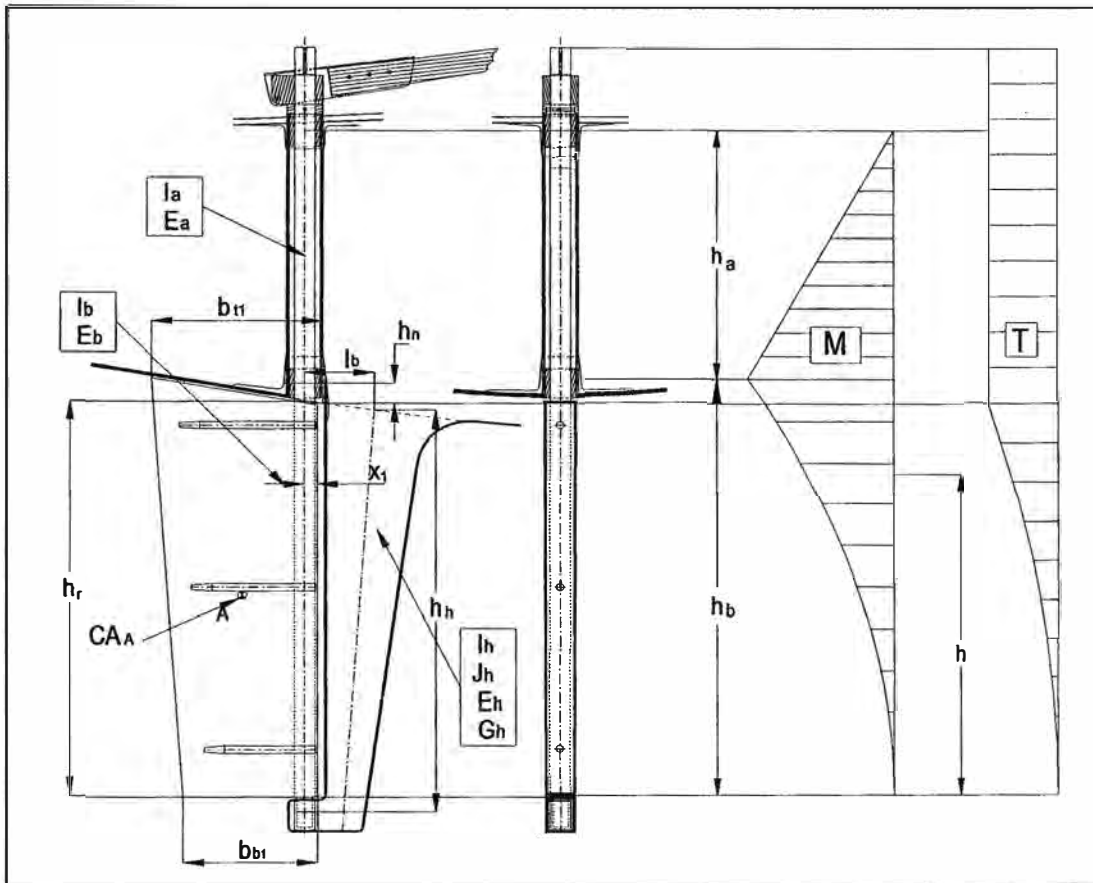


Fig. A.3 Distribución típica del momento flector y torsor en un timón con tintero y codaste [27].

Type	Skeg type	$K_b (Z_b = K_b h_r + h_c)$																				
I _a and I _b	None	See ^{a)}																				
I _c	None	According to centre of surface ^{b)}																				
II	None	0,16																				
III & IV	Rigid ^{c)}	0,16																				
	Flexible	According to centre of surface ^{b)}																				
V ^{c)}	Rigid ^{c)}	$\frac{0,16 \cdot h_1 \cdot A_1 - 0,5 \cdot h_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2}$																				
	Flexible	According to centre of surface ^{b)}																				
<p>^{a)} k_b is the ratio between position of centre of surface divided by h_r. For trapezoidal rudder shapes, it shall be chosen according the following table</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>b_2/b_1</th> <th>1,00</th> <th>0,90</th> <th>0,80</th> <th>0,70</th> <th>0,60</th> <th>0,50</th> <th>0,40</th> <th>0,30</th> <th>0,20</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>k_b</th> <td>0,50</td> <td>0,49</td> <td>0,48</td> <td>0,47</td> <td>0,46</td> <td>0,44</td> <td>0,43</td> <td>0,41</td> <td>0,39</td> </tr> </tbody> </table> <p>Where b_1 and b_2 are respectively the top and bottom chords of the rudder blade</p> <p>^{b)} k_b is the ratio between position of centre of surface divided by h_r; It may be approximated as a rectangle and use ^{a)}</p> <p>^{c)} A skeg is considered rigid if $(EI)_{skeg} \geq 2 (EI)_{rudder}$. In that respect rudder stock and eventual rudder blade shall be considered. This is usually not the case for metal rudder stock and GRP skeg.</p>			b_2/b_1	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	k_b	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,41	0,39
b_2/b_1	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20													
k_b	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,44	0,43	0,41	0,39													

Tabla A.1 Valores de k_b según el tipo de timón [27]

Type	r	r_{min}
I	0,3 c - u	0,1 c
II	0,3 c - u	0,1 c
III	0,5 c - u	0,05 c
IV	0,25 c - u	0,05 c
V	$\left(0,2 \frac{h_1}{h_r} + 0,3\right) \cdot c$	$\left(0,1 - 0,05 \frac{h_1}{h_r}\right) \cdot c$

Tabla A.2 Valores de r y r_{min} , según la configuración del timón, ver Fig. A.1 y A.2 [27]

Anexo B

Material	ISO or other	σ_d N/mm ²	σ_d welded N/mm ²	σ_d bearing N/mm ²	σ_y N/mm ²	σ_u N/mm ²	σ_{du} N/mm ²	σ_{dy} N/mm ²
AISI 304	A2 Bolts and screws	176	176	316	195	500	250	176
AISI 316, 316 L	A4 Bolts and screw	176	176	316	195	500	250	176

— σ_d es el esfuerzo de diseño en tensión (N/mm²)

— σ_u es la resistencia a la rotura en tensión (N/mm²)

— σ_y es la resistencia en fluencia en tensión (N/mm²)

Tabla B.1 Propiedades mecánicas de aceros inoxidables [27]

Material AISI name or other	EN or other	σ_d N/mm ²	k_m *	σ_d welded N/mm ²	k_m welded *
Stainless Steels					
AISI 304, 304L	X5 Cr Ni 18.9, X2 Cr Ni 18.9	176	1,00	176	1,00
AISI 316, 316 L	X5 Cr Ni Mo 17.2.2, X5 Cr Ni Mo 17.2.2	176	1,00	176	1,00
17-4 PH, F16 PH	X5 Cr Ni Cu Nb 16.4, AISI Gr 630	500	0,71	NR	
DX45, Uranus	X2 Cr Ni No N 22.5.3, AISI F51	330	0,81	330	0,81
Mild Steel					
A42		210	0,94	210	0,94
Aluminium Alloys					
5083 H 111		113	1,16	113	1,16
6005 A T6 d=<50 mm		135	1,09	135	1,09
6005 A T6 d>50 mm		130	1,11	130	1,11
6061 T6		145	1,07	145	1,07
6082 T6		155	1,04	78	1,31
Titanium Alloys					
UTA 6V		450	0,73	405 ^{a)}	0,76
Copper Alloys					
Bronze-Manganese		221	0,93		
Bronze-Ni-Al		351	0,79		
Monel 400		275	0,86		
Monel 500		480	0,72		
^{a)} To be welded in neutral atmosphere (argon)					

Tabla B.2 Esfuerzo de diseño para ejes de timón metálicos [27]

Anexo C

Áreas reforzadas	Laminado simple	Laminado sándwich capa exterior/capa interior en porcentaje de espesor de laminado simple
Alrededor de la línea central ($160B_H$) mm	$t_{k1}=(1+1.5.t_{\min(\text{fondo})})$	50%/40% ⁽¹⁾
Alrededor de la unión quilla casco ($80B_H$) mm	$t_{k2}=1.2.t_{k1}$	No aplicable
Área de los pernos de quilla	Consideración especial	No aplicable
En el área de pantocazos	$t_s=(1+1.5.t_{\min(\text{costado})})$	50%/40% ⁽¹⁾

B_H : Manga total (m), ver Tabla 1.1

$t_{\min(\text{fondo})}$: Ver ecuación 5.27

$t_{\min(\text{costado})}$: Ver ecuación 5.28

Puesto que la ISO 12212-5 2004, no menciona nada respecto de las áreas críticas, pero si considera factores de reducción de carga más grandes con respecto a la versión del año 2000, por tanto es de suponer que esta regla (propuesta en el libro de Larson L. & Eliasson R.E. [2]) debe ser evaluada, antes de ser usada.

Tabla C.1 Laminado adicional en áreas críticas [2]

Anexo D

Figuras en las Reglas de Estandarización ISO 12215-5

A	Máximo	Mínimo
Relación eslora/desplazamiento $\frac{L_{WL}}{\nabla^{1/3}}$	$3,6 + 0,06 L_{WL}$	$6,2 + 0,04 L_{WL}$
Máxima velocidad	50 nudos	

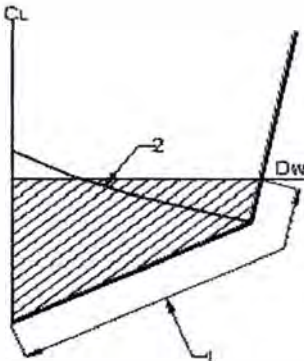
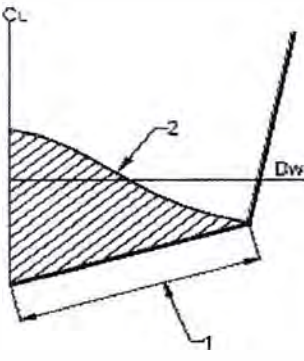
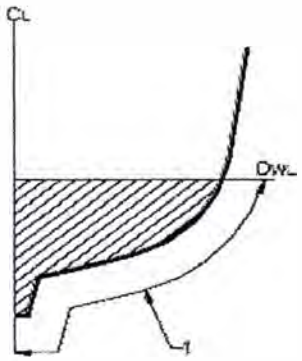
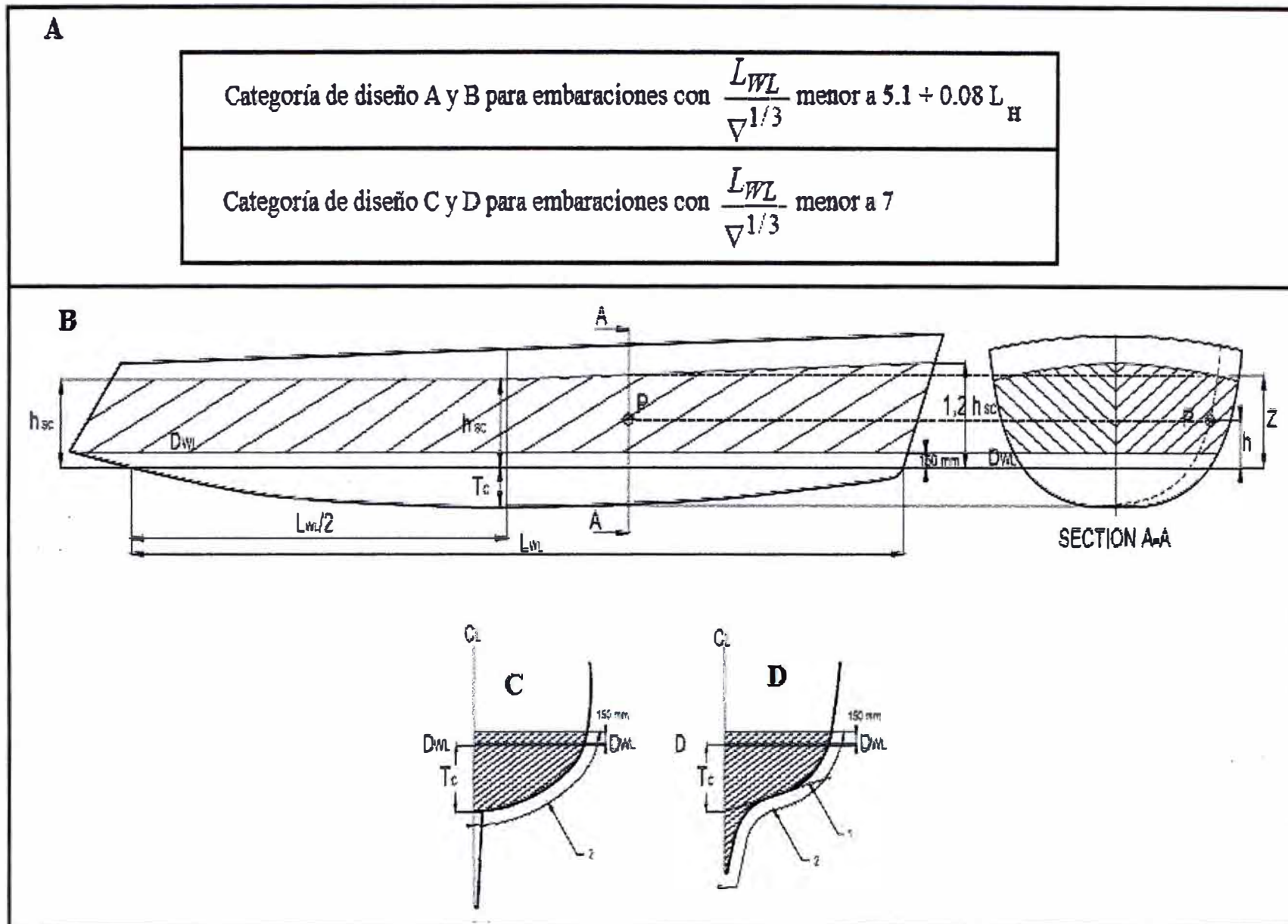
B		
		
<p>Casco con codillo</p> $\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} \leq 3,6$	<p>Casco con codillo</p> $\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} > 3,6$	<p>Casco redondo</p> $\frac{V}{\sqrt{L_{WL}}} > 3,6$
<p>Significados:</p> <p>1 Contorno del área de fondo 2 Codillo</p>		

Fig. D.1 Límites de aplicación de la ISO N° 12215-5, para embarcaciones a motor [24].

Fig. D.2 Límites de aplicación de la ISO N° 12215-5, para embarcaciones a vela [24].



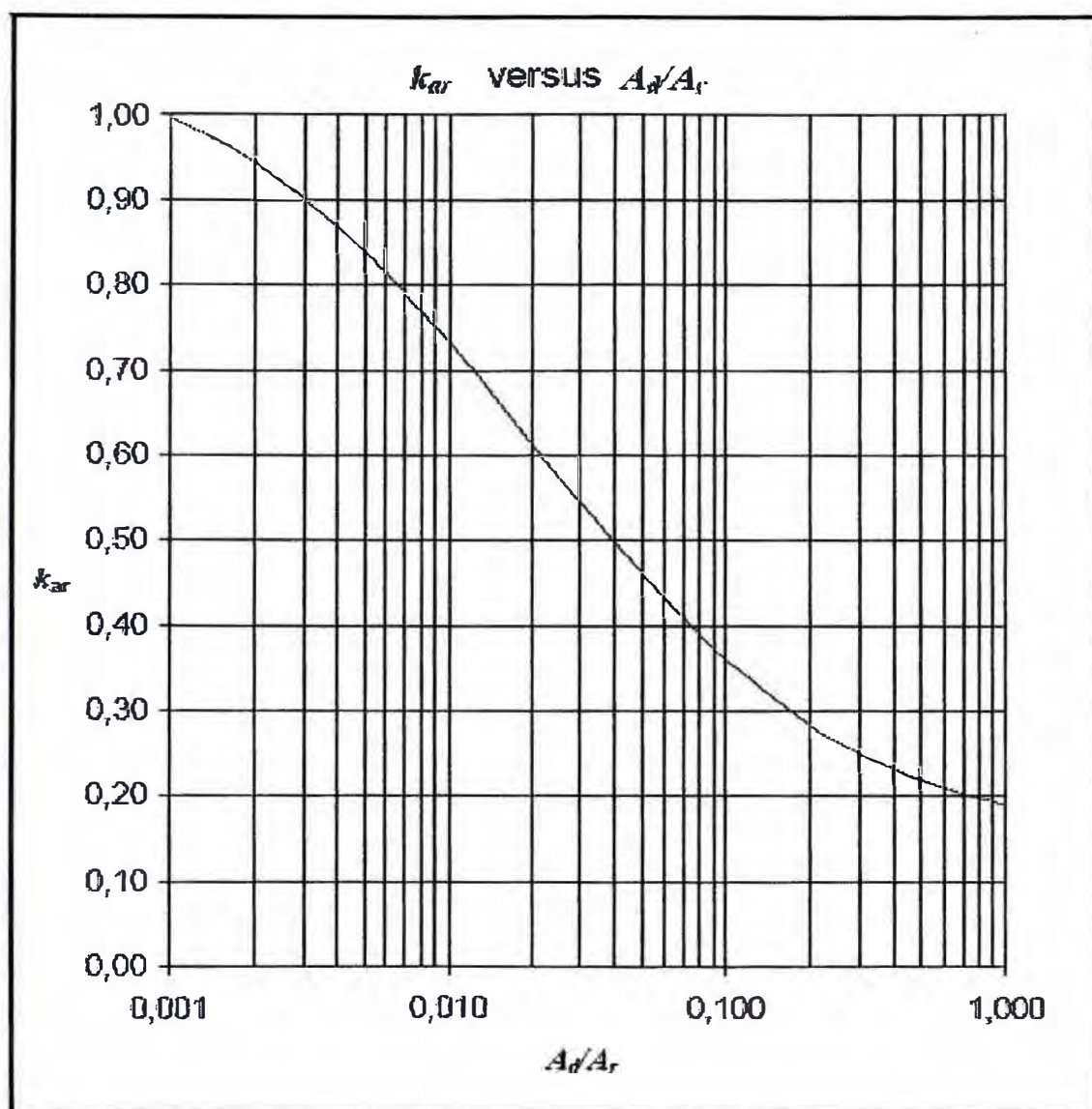


Fig. D.3 Factor de reducción de área (k_{ar}) [2,22,24]

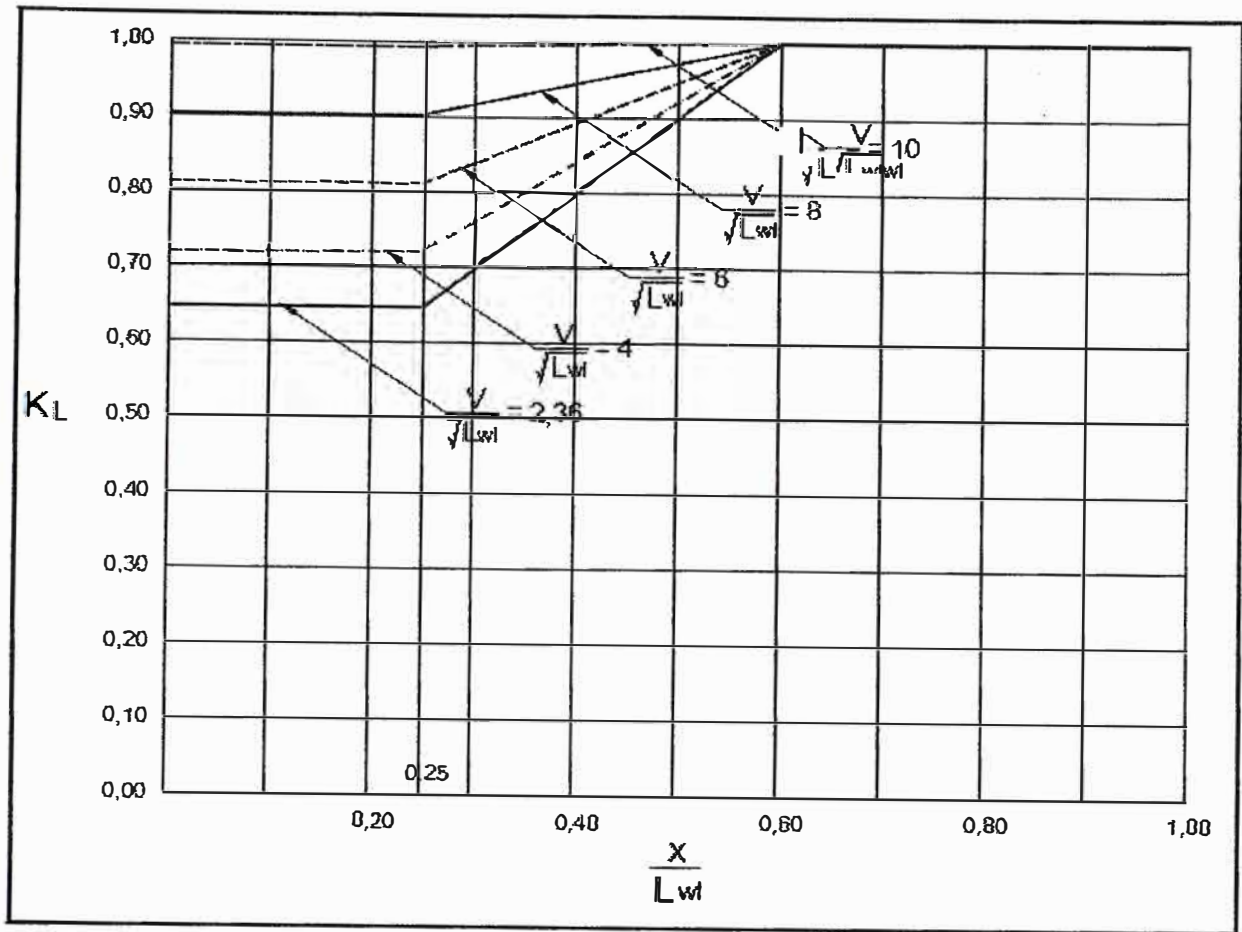


Fig. D.4 Factor de distribución de impacto longitudinal (k_L) [2,22,24]

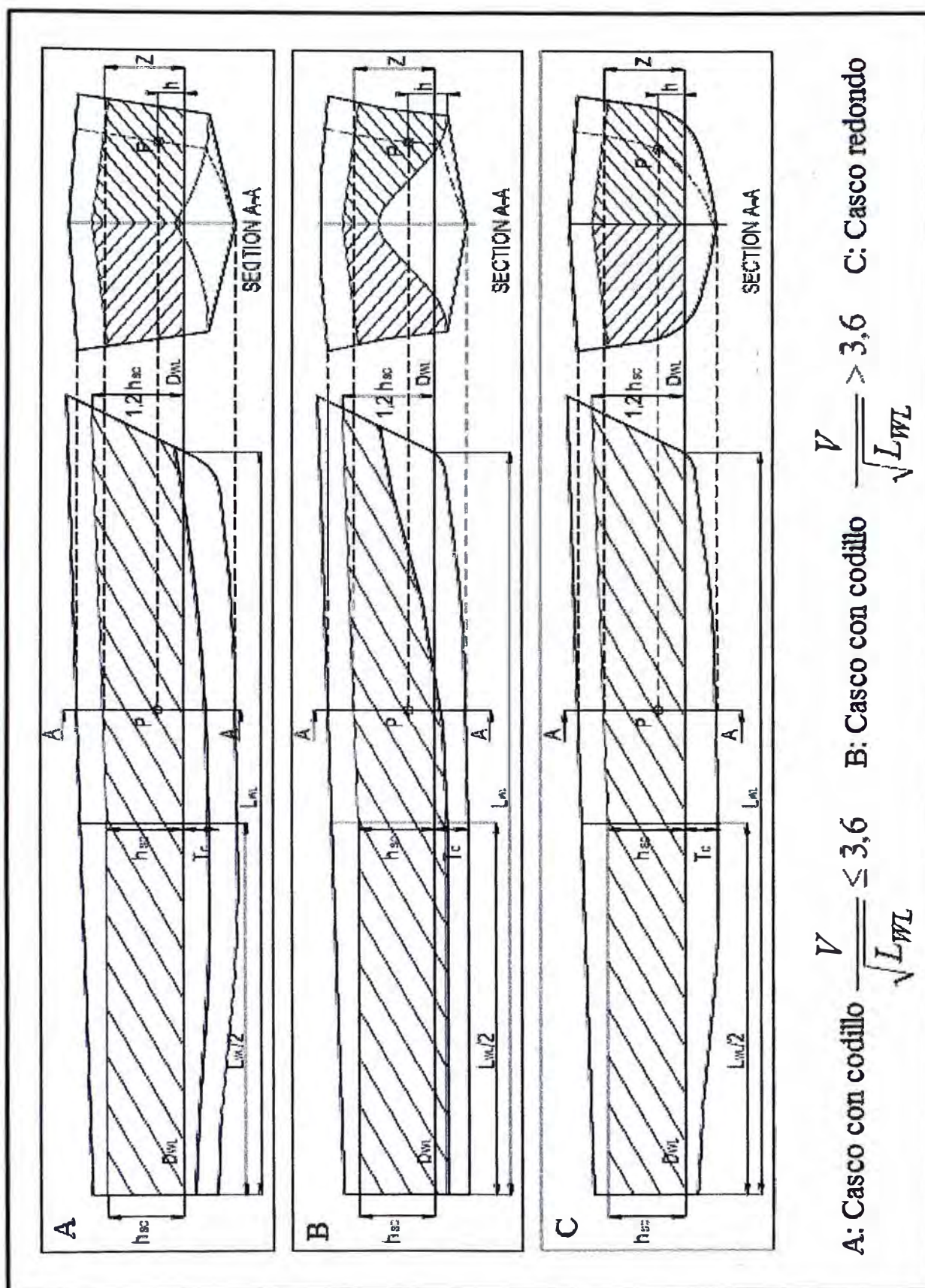


Fig. D.5 Parámetros de cálculo del factor de distribución de presión vertical (k_v) [24].

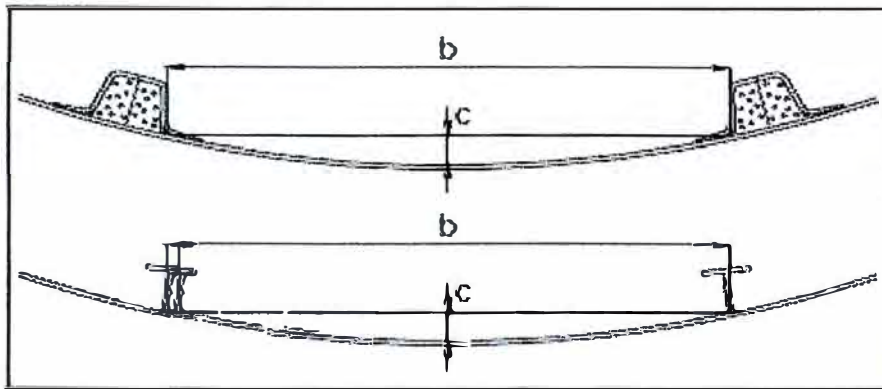


Fig. D.6. Medida de la curvatura cóncava [24]

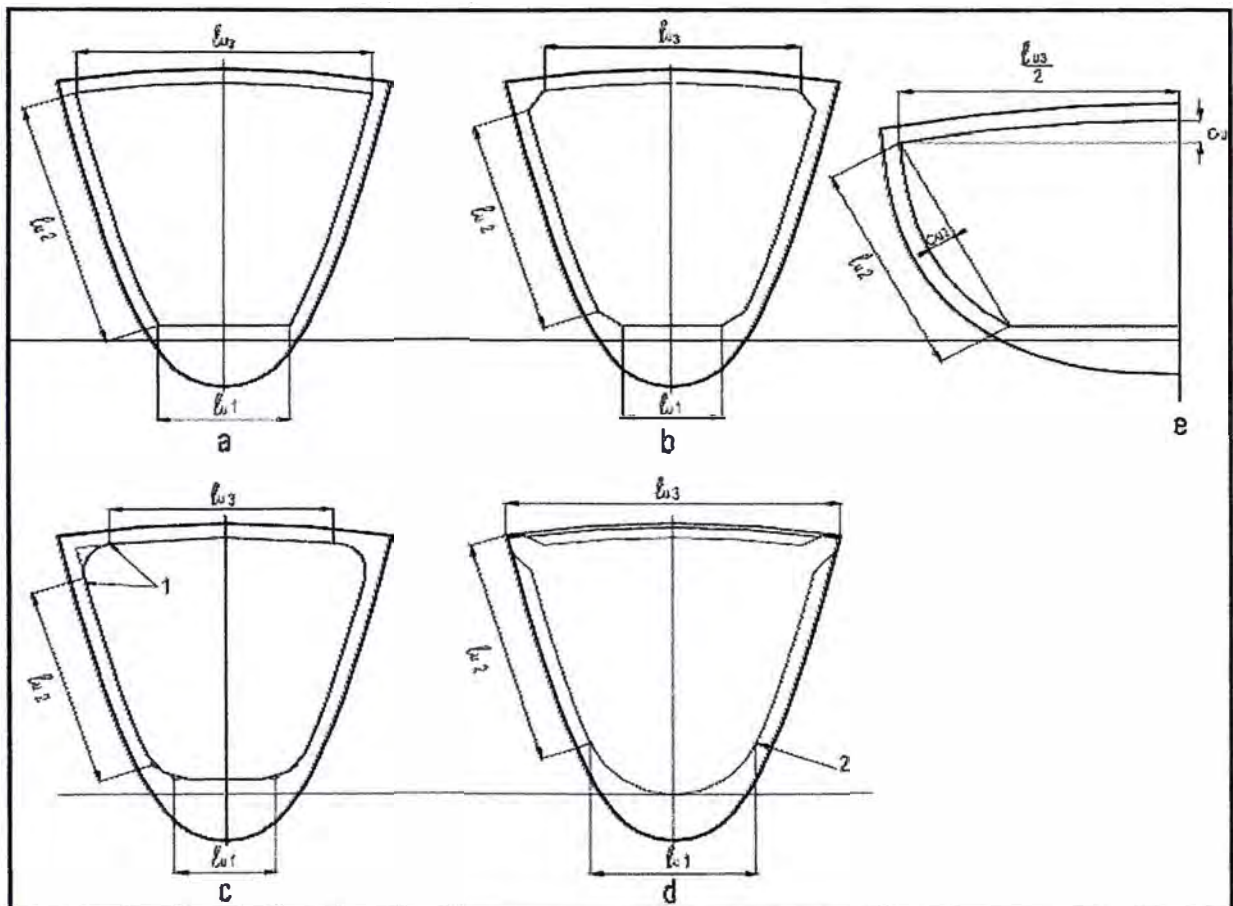


Fig. D.7. Ejemplos de las dimensiones de refuerzos de un yate velero en PRF [24].

Anexo E

Glosario

1. **ABS-ORY.** Reglas de la sociedad de clasificación ABS, para yates de competencia oceánicos.
2. **Acelerador.** Material que cuando es mezclado con el catalizador o la resina incrementa la velocidad de las reacciones químicas entre el catalizador y la resina (en polimerización de resinas o vulcanización de jebes). También es llamado promotor.
3. **Acelerante de cobalto.** Aditivo químico que acelera el curado de la resina, basado en naftenato de cobalto.
4. **Acarteladas.** Se dice refuerzos internos acarteladas, cuando los refuerzos o estructuras se unen a un miembro estructural adyacente mediante una cartela.
5. **Aparejos.** Conjunto de velas, cables, cabos, etc.
6. **Aparejos keche.** Es un tipo especial de aparejos, se usa especialmente en yates veleros de dos mástiles; tiene mayor área vélica y es ideal para la navegación en bolina.

7. Arboladura. Conjunto de elementos sobre cubierta que ayudan a la navegación a vela, incluye los aparejos.
8. Aramida. Es un tipo de material orgánico altamente orientado, se deriva de la poliamida (nylon) con la incorporación de estructuras de anillos aromáticos. Usado principalmente fibra de alta resistencia y módulo. El kevlar y el nomex son ejemplos de aramidas.
9. Autoclave. Un autoclave es un recipiente donde se introducen piezas de materiales compuestos, generalmente preimpregnados, a efectos de someter al laminado a una mayor presión de compactación y a una temperatura de curado más elevada. La primera razón es la de obtener un material más denso, con menor contenido de poros, que proporcione un material más resistente. La temperatura más elevada persigue dos razones: ciclos de curado más cortos y mejores propiedades finales de la pieza.

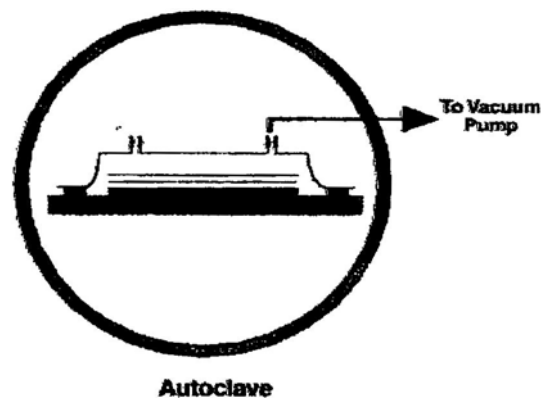


Fig. E.1 Autoclave

El moldeo con autoclave no es aplicable a la construcción de embarcaciones, fundamentalmente por razones dimensionales, esta técnica se utiliza para un sin fin de pequeñas piezas relacionadas con el sector. Dichas piezas suelen ser piezas exclusivamente estructurales, donde se requiere máxima resistencia con un mínimo peso.

10. Buque. El termino buque limita a un tamaño mayor a 50 m de eslora.
11. Catalizador. Un producto químico que inicia la polimerización de la resina.
12. Chainplate. Pieza metálica empotrada al mamparo o casco, usada para distribuir cargas producidas por los obenques y stays sobre el casco de un velero.

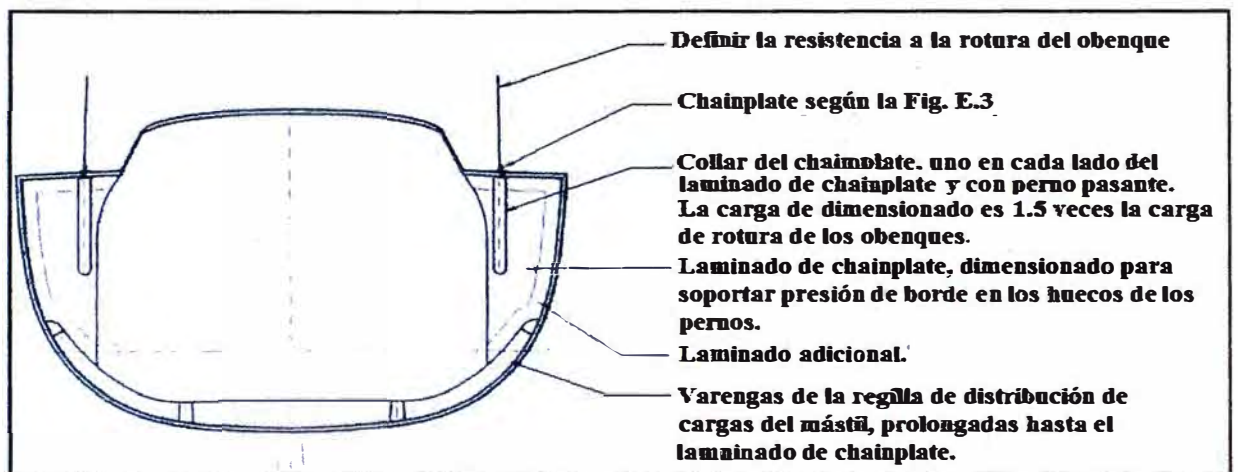


Fig. E.2 Dimensionamiento típico de un chainplate.

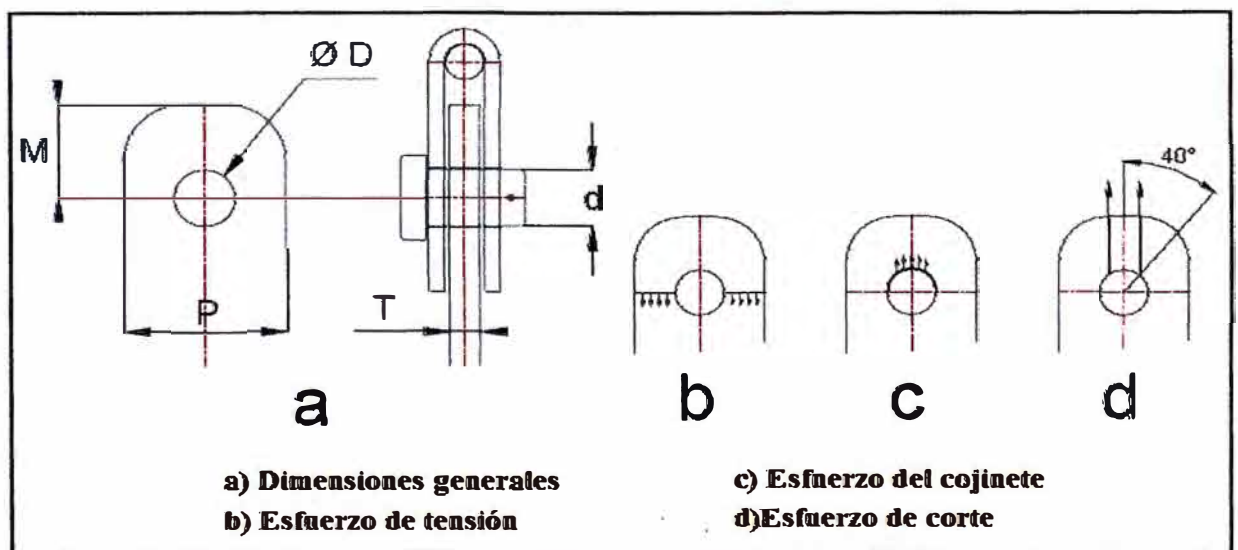


Fig E.3 Disposición de medidas y cargas de un chainplate.

13. Curado. Es el endurecimiento químico en una mezcla de resina.
14. Delaminaciones. Se produce cuando las fibras se separan de la matriz, producto de los golpes o esfuerzos cíclicos.
15. Embarcación. El termino embarcación limita un tamaño menor a 50 m de eslora.
16. Escantillonado. Tamaño o dimensiones de los miembros estructurales que conforman un artefacto naval.
17. Endurecedor. Catalizador.
18. Gelcoat. También llamado capa de acabado, resina viscosa y pigmentada para dar un acabado liso a la capa exterior del casco.
19. Impregnado. Proceso de aplicación de resina al refuerzo.
20. Isotrópico. Material que presenta las mismas características cuando es
21. Infusión. Es una técnica de moldeo en vacío. En un esfuerzo por reducir emisiones de estireno y probar las cualidades completas de un laminado, se están usando o experimentando con técnicas de infusión de resinas. Este proceso tradicionalmente usa moldes hembras (ver Fig. E.5), pero permite al

fabricante construir un laminado con materiales de refuerzo secos llamados preforms. En general la cantidad de fibra de vidrio en el laminado aumenta.

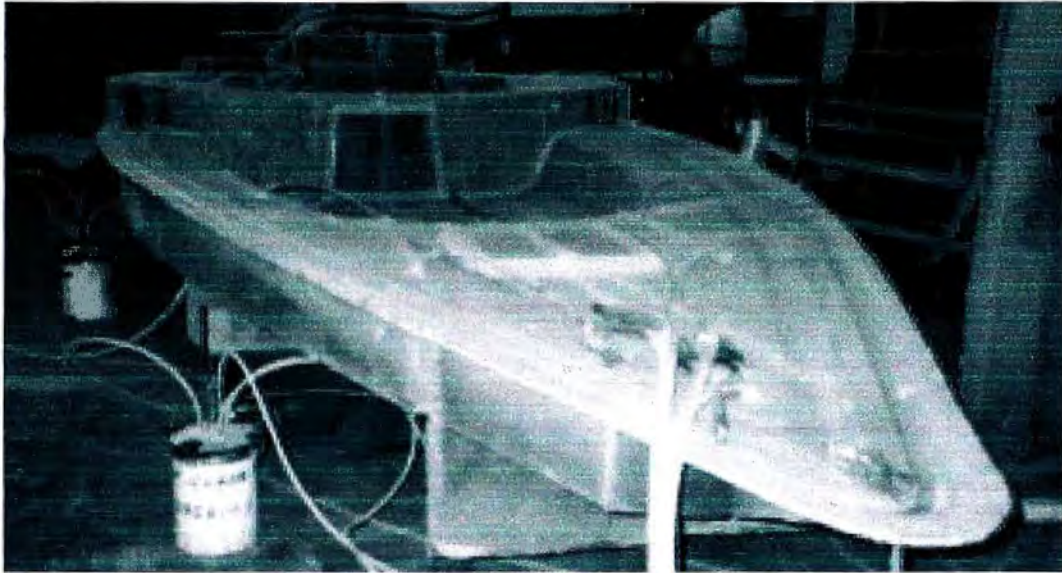


Fig. E.4 Aplicación real del moldeado por infusión (SCRIMP)

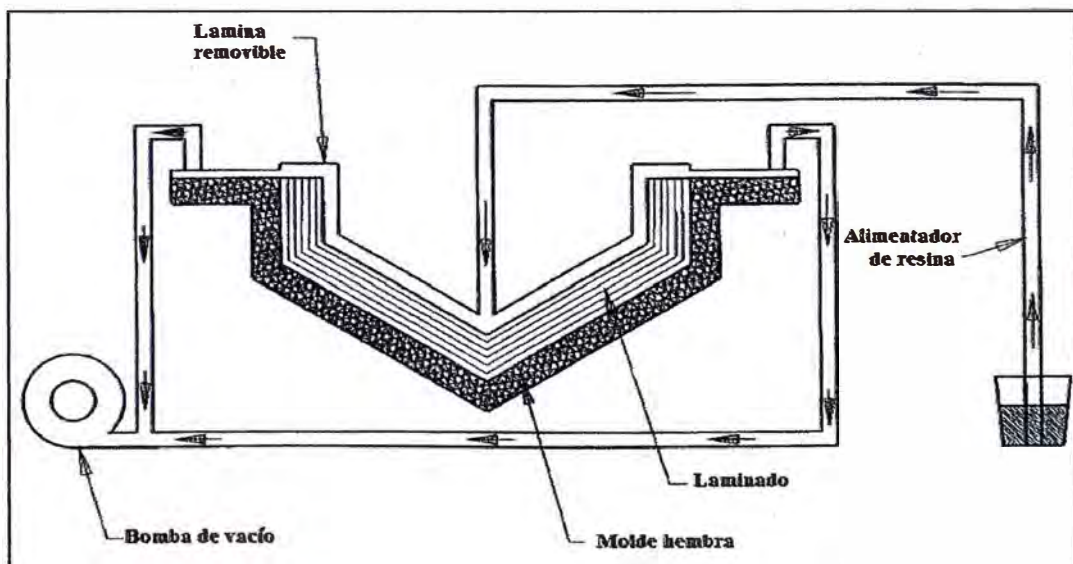


Fig. E.5 Aplicación del moldeado por infusión, esquema de principio.

Las técnicas de vacío nos permiten obtener materiales compuestos con mejores propiedades físicas y mecánicas que los métodos tradicionales de moldeo por contacto. Se sirven de presión externa para prensar el laminado y reducir fundamentalmente el contenido de matriz en el material compuesto, mejorando la adhesión interlaminar entre capas y obteniendo un laminado con una densidad mayor. Dentro de esta técnica podemos distinguir el laminado manual asistido por vacío, laminado con preimpregnados asistido por vacío y la infusión de film de resina preimpregnada asistido por vacío.

22. Jarcia fija. Los obenques y stays que están permanentemente fijados al mástil.
23. Kevlar. Es un refuerzo de fibra de aramida de alta tecnología.
24. Monómero de estireno. Solvente de la resina que reacciona con ella para formar un polímetro. Tiene un olor característico.
25. Moldeado. Proceso de aplicación o moldeado, existen diversos modos de aplicación, por ejemplo, la aplicación manual (hand luy-up), aplicación por inyección o rociado (spray luy-up), etc.
26. Obenques. Cabos o cables, usualmente es pares, que van del mástil a los chainplates a nivel de cubierta para impedir que el mástil caiga hacia los lados, parte de la jarcia fija.

27. Osmosis. Es un defecto en el laminado. En el proceso de laminado no siempre se consigue una interfase laminado-gelcoat con una perfecta unión. Existen zonas, de muy poca extensión, en las cuales, por diferentes causas no se ha conseguido la unión entre ambos.
28. Pantocazos. También llamado carga de sacudida, son cargas producidas por las olas en el curso de navegación de una embarcación; normalmente se da entre la sección media y la parte más a proa, por debajo de la línea de flotación.
29. Polímero. Cadena molecular principal cuando comienza la reacción de la resina.
30. PRF. Conocido también como PRFV, plástico reforzado con fibra de vidrio.
31. Preimpregnados. Los materiales preimpregnados fueron desarrollados para aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, que requerían un elevado contenido de refuerzo en la composición del material compuesto, así como una perfecta uniformidad del contenido de resina. Aunque en el sector naval actualmente sólo se construyen embarcaciones de altas prestaciones, debido al elevado coste de dichos materiales, se cree que en los próximos años su utilización será más frecuente en los sectores de mayor producción, a medida que se descubran otras aplicaciones industriales que les permitan ser más

competitivos económicamente frente a las técnicas tradicionales de construcción, ver glosario 13.

32. Stays. Cable o cabo que soporta el mástil en una dirección longitudinal; parte de la jarcia fija.

BIBLIOGRAFÍA

1. Dennys Dunker De La Torre Cortez “Tesis Profesional: Yate Crucero Insignia UNI – Eduardo de Habich”, año 2004.
2. Larson L. & Eliasson R.E. “Principles of Yacht Design”. International Marine. Camden – USA, año 2000.
3. Rosanne Hooper “The Sailor’s Handbook, The Essential Sailing Manual”. Marshall Editions Ltd, Londres, año 1983.
4. Copias de Ing. Naval Ana Arevalos, “Maestría en Diseño y Tecnología de la Construcción de Embarcaciones de Recreo y Competición”, España, año 2005.
5. ABS, “Guide for Building and classing Offshore Racing Yachts”, año 1997.
6. Tesis de Maestría - Universidad Federal de Rio, A. Lessa Veiga, “Contribución al Programa Nacional Brasileño de Veleros de Competencia”, Brasil, año 2000.
7. Dag Pike “Motorsailers”. Stanford Maritime Limited, Great Britain, año 1976.
8. Dr. Ing. Naval, Jorge Tegedor Del Valle “Construcción de Buques de Pesca en Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio”. Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos de España, año 2004.

9. Ned Coackley “Construcción de Embarcaciones Pesqueras en Fibra de Vidrio”. Documento técnico de la FAO N° 321, Reino Unido, año 1994.
10. Juan Baader. “Cruceros y lanchas veloces”. Náutica Baader, Argentina, año 1951.
11. E. F. Bruhn, B. S., M.S., C.E. “Análisis and Design of Flight Vehicle Structures”. Tri- State Offset Company, USA, año 1973.
12. Profesional Boatbuilder Magazine N° 72- año 2001 “Factors of Safety in Marine Structures”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 22-37.
13. Profesional Boatbuilder Magazine N° 73- año 2001 “The Checklist of a Cruising Sail Boat”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 103.
14. Profesional Boatbuilder Magazine N° 79- año 2002 “Case Study in Lightweight Engineering”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 48-66.
15. Profesional Boatbuilder Magazine N° 84- año 2003 “The Neighbors”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 36.
16. Profesional Boatbuilder Magazine N° 98- año 2006 “Steering System Fundamentals”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 76-94.

17. Capitán L. Suarez Gil “Diccionario Técnico Marítimo”, Editorial Alhambra, S.A., año 1981.
18. Heller, S.R., Jasper, N.H. “On the Structural Design of Planing Craft”, RINA, Quarterly Transactions, año 1960.
19. Profesional Boatbuilder Magazine N° 67- año 2000 “Structural Design for High-Speed Craft”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 31-47.
20. Jay R. Bendford, “Small Ships”, Words&Pictures Inc., USA, año 2002.
21. Profesional Boatbuilder Magazine N° 99- año 2006 “Single-Skin vs. Sandwich Construction”. Wooden Boat Publications Inc., USA. Pag. 104-113.
22. Eric Greene Associates “Marine Composite”. Second Edition
<http://www.marinecomposite.com.org>
23. Antonio Bonilla de la Corte “Construcción Naval y Servicios” Hijos de E. Minuesa, S. L., España, año 1984.
24. ISO TC 188/ISO N° 12215-5.3, “Hull construction – Scantling – Part 5: Design pressure for monohulls, design stress, scantling determination, validation version”, año 2004.

25. Ing. Orlando Pérez, Ing. R. Ortiz, Ing. N. Ramírez “Diseño de una embarcación pesquera artesanal en madera, de 10.5 m de eslora total”, Chile, año 1984.
26. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Naval de Enrique Alberto Bonilla Serrano, “Diseño y anteproyecto de un pesquero en plástico reforzado en fibra de vidrio”, Chile, año 1985.
27. ISO TC 188/ISO N° 12215-8, “Rudders– Part 8”, año 2004.
28. Steve Killing and Douglas Hunter “Yatch Design Explained” W.W. Norton & Company Inc., 500 Fifth Avenue, New Work, N.Y. 10110, año 1998.
29. Fulgencio Garcia Hernandez “ La estructura de los buques de plástico reforzado” España, año 1997.
30. ISO TC 188/ISO N° 12215-9, “Hull construction – Scantling – Part 9: Sailing boats- Appendages and rig attachment”, año 2004.
31. R. Alvariño, J.J. Aspíroz y Meizoso, FEIN. Madrid 1997