

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

ISSN 1909-8642



COTECMAR  
COLOMBIA

Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques

Carlos Rodríguez Jaraba

Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso Smaw y metal de aporte ferrítico de alta resistencia

Iván Castilla, Jimmy Unfried



Avances en la estimación de la resistencia de catamaranes

Marcos Salas, Prasanta K. Sahoo, Richard Luco

Análisis de requerimientos mediante la aplicación de *AHP* como base para el desarrollo del diseño conceptual de un buque tipo *LCU*

Luis E. Aranibar, Rafael L. Callamand

# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

## SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

Número 3, volumen 2

Julio de 2008

ISSN 1909-8642

Cotecmar

Presidente

Contralmte. **Daniel Iriarte Alvira**

Vicepresidente

Cap. de navío **Juan Carrillo Quintana**

Editor

Cap. de navío **Jorge E. Carreño Moreno, Ph. D. (c)**

Comité editorial

**Marcos Salas Inzunza, Ph. D.**  
Universidad Austral de Chile

**Juan Vélez Restrepo, Ph. D.**  
Universidad Nacional de Colombia

**Jairo Useche Vivero, Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia

**Antonio Bula Silvera, Ph. D.**  
Universidad del Norte, Colombia

**Juan Contreras Montes, Ph. D.**  
Escuela Naval Almirante Padilla, Colombia

**Robert G. Latorre, Dr. Eng.**  
University of New Orleans, USA

**Carlos Cano Restrepo, M. Sc.**  
Cotecmar, Colombia

Comité científico

**Richard Luco Salman, Ph. D.**  
Universidad Austral de Chile

**Carlos Paternina Arboleda, Ph. D.**  
Universidad del Norte, Colombia

**Francisco Pérez Arribas, Ph. D.**  
Universidad Politécnica de Madrid, España

**Bienvenido Sarría López, Ph. D.**  
Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia

**Rui Carlos Botter, Ph. D.**  
Universidad de Sao Paulo, Brasil

Cap. de fragata **Óscar Tascón Muñoz, Ph. D. (c)**  
Cotecmar, Colombia

*Ciencia & Tecnología de Buques es una publicación especializada en temas relacionados con ingeniería naval, arquitectura naval, ingeniería marina e ingeniería oceánica. La revista publica semestralmente artículos científicos producto de proyectos de investigación de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial, y de otras instituciones y/o investigadores que constituyan una contribución original al desarrollo en las áreas mencionadas. Se distribuye nacional e internacionalmente por canje o suscripción.*

Una publicación de

Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la  
Industria Naval, Marítima y Fluvial - Cotecmar  
Versión electrónica: [www.cytbuques.com](http://www.cytbuques.com)



COTECMAR  
COLOMBIA



Coordinación editorial

Mario Ruíz Barreto

Asesoría editorial y corrección de textos  
Lilia Carvajal Ahumada

Traducción y revisión de textos en inglés  
Álvaro Bernat Gómez

Diagramación  
Mauricio Sarmiento Barreto

Diseño de portada  
Germán Ortíz Rincón

Impresión  
Publicidad & Marketing, Bogotá, D. C.



# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES

## SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

Número 3, volumen 2

Julio de 2008

ISSN 1909-8642

5

Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques  
*Comparative study of the calculation methodology of the thermal charge for air conditioning systems on ships*  
Carlos Rodríguez Jaraba

25

Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso *Smaw* y metal de aporte ferrítico de alta resistencia  
*Weldability of a micro-alloyed steel utilizing iron filler metal and SMAW manual process*  
Iván J. Castilla, Jimmy Unfried S.

39

Avances en la estimación de la resistencia de catamaranes  
*Advances in the estimation of the catamaran resistance*  
Marcos Salas, Prasanta K. Sahoo, Richard Luco

47

Análisis de requerimientos mediante la aplicación de *AHP* como base para el desarrollo del diseño conceptual de un buque tipo *LCU*  
*Analysis of requirements by means of the application of AHP as a basis for the development of the conceptual design of a LCU type ship*  
Luis E. Aranibar, Rafael L. Callamand



# Estudio comparativo del método de cálculo de carga térmica para sistemas de aire acondicionado en buques

Carlos Rodríguez Jaraba<sup>a</sup>  
Bienvenido Sarría López<sup>a</sup>  
Juan Fajardo Cuadro<sup>a</sup>  
Ricardo Lugo Villalba<sup>b</sup>

## Resumen

Este artículo presenta el estudio comparativo entre las prácticas recomendadas por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos –*Sname*– para el diseño de sistemas de acondicionamiento de aire en buques y la metodología de cálculo de carga térmica CLTD/CLF desarrollada por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire –*Ashrae*–. Para verificar la diferencia en los resultados obtenidos al emplear las consideraciones y ecuaciones de cálculo propuestas se utilizaron datos de diseño del buque de río tipo nodriza VI construido por Cotecmar, y se demostró que mediante el uso de la metodología de la *Sname* se obtienen sistemas de acondicionamiento de aire sobredimensionados. También se evaluaron los coeficientes globales de transferencia de calor comparando los resultados tabulados por la *Sname* con los valores obtenidos a través del método de zona. Por último, se determinó la influencia de las cargas térmicas calculadas en la capacidad del equipo de enfriamiento requerido en un local del buque.

**Palabras clave:** Metodología de cálculo de carga térmica, CLTD/CLF, carga térmica, método de zona, coeficiente global de transferencia de calor.

## Abstract

This article presents a comparative study between the practices recommended by the Society of Naval Architects and Marine Engineers –*SNAME*– for the design of air conditioning systems on ships and the methodology of thermal charge calculation CLTD/CLF developed by the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers –*ASHRAE*–. To verify the difference in the results obtained when applying the proposed considerations and equations of calculus, ship design data of the VI riverine patrol and supply ship built by Cotecmar, it demonstrated that by means of the use of the methodology of the *SNAME*, over-sized air conditioning systems are obtained. And the global coefficients of heat transference were also evaluated comparing the results tabulated by the *SNAME* with the values obtained through zone method. Finally, the influence of the calculated thermal charges in the capacity of the equipment of cooling required on the premises of the ship was determined.

**Key words:** Thermal charge calculation method, CLTD/CLF, thermal charge, zone method, global coefficients of heat transference.

Fecha de recepción: 2 de noviembre de 2007  
Fecha de aceptación: 17 de diciembre de 2007

<sup>a</sup> Universidad Tecnológica de Bolívar. Departamento de Ingeniería Mecánica.

<sup>b</sup> Cotecmar. Departamento de Maquinaria y Propulsión.

Autor corresponsal: cmrodriguezjaraba@yahoo.es

## Introducción

Las prácticas recomendadas para los cálculos de diseño de sistemas de aire acondicionado en buques, y en particular las referentes al cálculo de la carga térmica publicada por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos –*Sname*– en 1980<sup>1</sup>, empleada en el astillero de Cotecmar, evalúa los espacios que se van a acondicionar usando el concepto de ganancias de calor instantáneas el cual considera que todas las ganancias de calor, internas y externas son transmitidas directa e inmediatamente al local.

Asimismo, por ser esta una evaluación del flujo de calor estable, recomienda también el uso de coeficientes o factores que evalúan mediante un solo cálculo la transferencia por conducción y radiación a través de superficies de vidrio (ventanas) y no considera la variación diaria en los diferenciales de temperaturas requeridos para determinar los componentes externos de carga (conducción a través de estructuras expuestas a la radiación solar: casco, cubiertas superiores, ventanas) debido a la latitud y mes considerados en el diseño.

Al realizar cálculos basados en las recomendaciones de la *Sname* no se tiene en cuenta el efecto de almacenamiento de calor o efecto de retardo térmico. La mayor parte de las fuentes de ganancia de calor transfieren energía tanto por convección como por radiación. La energía radiante es la absorbida por las paredes, pisos, muebles y otros objetos; solo cuando estos alcanzan una temperatura mayor a la del aire interior se transfiere el calor por convección al espacio. Este efecto de almacenamiento térmico es muy importante en la determinación de la capacidad del equipo de acondicionamiento de aire y evita sobredimensionar el sistema ya que la carga de enfriamiento determinada será menor a la ganancia de calor máxima instantánea de un espacio en un momento dado. En las diferentes metodologías desarrolladas por la *Ashrae* para el cálculo de la carga térmica o carga de enfriamiento se considera el efecto de almacenamiento, una de ellas es la método CLTD/CLF propuesto inicialmente en 1977<sup>2</sup>.

Por otro lado, la metodología de la *Sname* recomienda el uso de coeficientes globales de transferencia de calor (factor  $U$ ) para estructuras navales que datan de un reporte de aislamiento térmico de 1963 (*Sname*), los cuales hoy son inadecuados por ser para dimensiones y características geométricas diferentes al tipo de estructuras que se emplean en la industria naval. Adicional a esto, los valores tabulados en el reporte fueron determinados en ensayos experimentales en paneles con aislamiento de fibra de vidrio, mientras que en las patrulleras de río construidas en Cotecmar se emplea poliuretano expandido.

Por lo tanto, es necesario evaluar la metodología para determinar la carga térmica y los valores del factor  $U$  con el propósito de mejorar y optimizar los diseños de los sistemas de acondicionamiento de aire en la construcción de buques.

## Estado del arte

Dentro del presente artículo se abordan dos áreas específicas relacionadas con el cálculo de carga térmica o de enfriamiento: La primera hace referencia a las ecuaciones y consideraciones de cálculo empleadas para evaluar los diferentes componentes de la carga térmica (las cargas externas por transmisión o conducción en superficies soleadas y no soleadas, por conducción y radiación en vidrios, y las cargas internas por conducción a través de particiones internas, carga por personas, por equipos y por iluminación). La segunda tiene que ver con los valores del coeficiente global de transferencia de calor empleados en el cálculo de la carga por transmisión a través del casco y los mamparos.

En estudios preliminares de Hart, Fulton y Cox (2004), se determinó que los valores de  $U$  establecidos por la *Sname* en su *Reporte de Aislamiento Térmico* (1963) no son adecuados puesto que no han venido a la par con los cambios en las configuraciones y materiales aislantes usados en la construcción naval, a diferencia de los aislamientos térmicos en envolventes de edificios. Mientras las normas de aislamientos térmicos en edificios residenciales y comerciales y ambientes industriales han cambiado de forma dramática en los últimos cuarenta años

<sup>1</sup> Technical and Research Bulletin 4-16.

<sup>2</sup> Fundamentals Handbook. Ashrae. 1977.

debido a los aumentos significativos en los costos de la energía y a la mayor comprensión del desempeño de los aislamientos, las normas para la industria naval no han cambiado.

Hart, Fulton y Cox (2004), demostraron que el uso de los valores propuestos produce espesores de aislamientos mayores a los realmente requeridos, principalmente porque las configuraciones de los refuerzos empleados en la construcción naval, así como la profundidad, espesores y espaciado de los mismos han variado a lo largo de los años. Esto afecta considerablemente el flujo de calor en las estructuras navales, debido a que a través de los refuerzos metálicos, de mayor conductividad que el aislamiento, se producen puentes térmicos.

Por otro lado, mientras hay varias opciones disponibles para la selección de diferentes materiales como aislamientos en un buque, los datos publicados por la *Sname* en su reporte se enfocan en los valores del coeficiente global para estructuras aisladas con fibra de vidrio semirrígida. En el caso particular del buque Nodriza VI el aislamiento empleado es poliuretano expandido, por lo que los valores del factor  $U$  utilizados en el momento de determinar la carga por transmisión son inadecuados.

Los datos contenidos en la publicación de la *Sname* fueron obtenidos mediante ensayos térmicos que se desarrollaron para determinar el desempeño del aislamiento en combinación con refuerzos angulares bidimensionales, mientras que los refuerzos de la nodriza son de geometría en T y de bulbo.

Como conclusión Hart, Fulton y Cox (2004) establecieron que es necesario reevaluar los valores del factor  $U$  debido a que los requerimientos térmicos inadecuados por el uso de valores errados resultan en exceso de peso y de costos en consumo de combustible, así como por generadores y equipos de acondicionamiento de aire y de ventilación sobredimensionados.

## Desarrollo de la metodología de cálculo de carga térmica

A lo largo de los últimos años la *Ashrae* ha venido desarrollando diferentes proyectos de investigación

en aras de cálculos más exactos y de obtener mejores resultados en la determinación de la carga térmica (también llamada carga de enfriamiento). Es así como las metodologías empleadas para el diseño de sistemas de acondicionamiento de aire han evolucionado.

En la edición del *Manual de Fundamentos* de la *Ashrae* de 1972 se describieron dos métodos de cálculo de la carga de enfriamiento. En el primer procedimiento, el método de la Diferencia Total de Temperatura Equivalente (*TETD* por sus siglas en inglés), varios componentes de la ganancia de calor del espacio se conjugan para obtener una tasa instantánea total de la ganancia de calor del espacio, de donde se obtiene la carga de enfriamiento instantánea usando factores de peso (*Ashrae*, 1977).

El segundo procedimiento se introdujo por primera vez en el volumen del año de 1972, y fue el método de las Funciones de Transferencia (*TFM*). Aunque utilizaba un principio similar al primero, empleaba factores de respuesta completamente diferentes para convertir la ganancia de calor en carga de enfriamiento. Estos factores fueron llamados coeficientes de las funciones de transferencia.

Para eliminar las discrepancias entre estos métodos la *Ashrae* realizó investigaciones que condujeron al CLTD/CLF (Diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento / Factor de carga de enfriamiento), desarrollado como método de cálculo manual, que utilizaba los valores de CLTD y CLF tabulados. Los valores fueron calculados haciendo uso del método de las funciones de transferencia el cual proporciona las cargas de enfriamiento para condiciones ambientales y tipos de zonas estandarizadas. Esas cargas fueron normalizadas, de tal forma que el diseñador podía determinarlas para cada hora con una multiplicación sencilla.

En trabajos posteriores (McQuiston et al., 1993) se realizaron revisiones al método CLTD/CLF, con la finalidad de obtener resultados más exactos, lo cual condujo al CLTD/SCL/CLF en el que se introduce un nuevo factor, la carga de enfriamiento solar (SCL), para calcular la carga por radiación en vidrios (fenestración). Este era más exacto y fácil de usar. También se generaron datos para CLTD y CLF a partir de los nuevos coeficientes de funcio-

nes de transferencia por conducción y factores de respuesta desarrollados en el proyecto de investigación de la *Ashrae* RP-472. Debido al número de datos disponibles de forma impresa se desarrolló un *software* para elaborar las tablas de CLTD y CLF.

En volúmenes más recientes del *Manual de Fundamentos* de la *Ashrae* (2005) se muestra el método de Balance de Calor (*HB*) y el de Serie Radiante en el Tiempo (*RTS*). Ambos están fundamentados en que la estimación de la carga de enfriamiento implica cálculos de balance de calor por conducción, convectivos y radiantes de superficie a superficie, para cada una de las superficies de los locales y un balance de calor convectivo para el aire del local.

El método de balance de calor resuelve de forma directa el problema que se basa en la aplicación del primer principio de la termodinámica. La ventaja es que no contiene ningún conjunto de parámetros arbitrarios, ni ninguno de los procesos se deja de lado. Es necesario el uso de computadores para algunos cálculos que requieren aproximaciones rigurosas.

El de serie radiante en el tiempo es un método simplificado para desarrollar cálculos de carga de enfriamiento que se derivan del método de balance de calor, y reemplaza de forma efectiva los demás métodos simplificados (sin balance de calor), tales como el de funciones de transferencia (*TFM*), el de diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento/factor de carga de enfriamiento, y el método de diferencia total de temperatura equivalente.

Las series radiantes en el tiempo se desarrollaron para ofrecer un método riguroso que no requiera cálculos iterativos y cuantifique la contribución de cada componente a la carga de enfriamiento total. Tiene la característica de permitir al usuario inspeccionar y comparar los coeficientes para diferentes tipos de construcción y de zonas en una forma que ilustra su efecto relativo en los resultados, por tal motivo facilita el uso del juicio del ingeniero durante el proceso de cálculo de la carga de enfriamiento.

Aunque el método de serie radiante en el tiempo es simple en conceptos, implica demasiados cálculos

para ser usado de forma práctica como método manual, no obstante, puede ser fácilmente implementado en una sencilla hoja de cálculo computarizada.

## Comparación de metodologías de cálculo

En vista de lo anterior, es necesario comparar los resultados obtenidos por la metodología recomendada por la *Sname*, con aquellos logrados al emplear otras más modernas como la CLTD/CLF propuesta por la *Ashrae*, que si bien no es la más actual, es de cálculo manual, permite estimar la carga hora a hora y sirve para evaluar la carga térmica de un local con mayor exactitud que con el método de la *Sname*, que realiza solo un cálculo y no considera la variación en el tiempo de cada carga ni evalúa la ocurrencia simultánea de las mismas.

En el proceso comparativo se realizaron cálculos ejemplo para las diferentes ganancias de calor o componentes de carga. Aquí se muestran las ecuaciones empleadas en cada una de las metodologías, y se determina la diferencia resultante. Los valores que no variaron o se consideraron iguales para una u otra metodología están indicados y se calculó el porcentaje de variación de la carga (reducción o incremento) al emplear la metodología de la *Ashrae*. Posteriormente se realizó el análisis comparativo del cálculo del coeficiente global de transferencia de calor por métodos propuestos por la *Ashrae* con los valores tabulados en el reporte de la *Sname* (1963), y finalmente fue evaluada la carga térmica usando ambas metodologías en un espacio de la Nodriza VI, para determinar la capacidad requerida del equipo de acondicionamiento de aire y la influencia de la carga térmica en la misma.

Todos los cálculos realizados se basan en las condiciones de diseño reales del buque y en las características del cuarto de radio de la Nodriza VI; estos datos son indicados a continuación.

### Condiciones de diseño

Considerando las áreas de ronda de las patrulleras de río, se establecen las siguientes condiciones de diseño para el cálculo:

- Temperatura de diseño exterior: 95°F.
- Humedad relativa exterior: 80%.
- Temperatura de diseño interior: 80°F, según recomendaciones de la *Sname* para buques de guerra (*Sname*, 1992).
- Humedad relativa interior: 50%.
- Variación diaria de temperatura: 21°F (valor asumido).
- Latitud aproximada de las zonas de navegación entre 0° y 6° latitud norte; se considera para los cálculos una latitud de 0° LN.
- Mes de diseño: julio.

### Datos del local

- Cubierta superior expuesta al sol con área de 70,80 ft<sup>2</sup>, compuesta por lámina de acero de 1/4" de espesor más aislamiento de poliuretano expandido de 3".
- Cubierta inferior de acero naval de 1/4" de espesor, zona adyacente acondicionada.
- Mamparo lateral de babor termoacústico de lana de roca mineral con  $U= 0,1739$  Btu/h.ft<sup>2</sup> °F, (CYMP), espacio adyacente a un pasillo acondicionado indirectamente (se considera una temperatura de 0,5°F por encima de la temperatura de diseño interior), con un área de 56,47 ft<sup>2</sup>.
- Mamparo lateral de babor al exterior de acero naval de 1/4" de espesor más aislamiento de poliuretano expandido de 3" con un área de 16,66 ft<sup>2</sup>. Se considera una superficie no soleada.
- Mamparo lateral de estribor termoacústico de lana de roca mineral con  $U= 0,1739$  Btu/h.ft<sup>2</sup> °F, con un área de 74,28 ft<sup>2</sup>, adyacente a espacio no acondicionado a una temperatura de 95°F.
- Mamparo de proa termoacústico de lana de roca mineral, adyacente a espacio acondicionado.
- Mamparo de popa expuesto al sol de acero naval de 1/4" de espesor más aislamiento de poliuretano expandido de 3" con un área de 33,08 ft<sup>2</sup>. En este mamparo se encuentra un vidrio blindado con un área de 3,15 ft<sup>2</sup>; con un espesor de 1<sup>27</sup>/<sub>32</sub>" (47 mm).
- Iluminación: Dos lámparas de techo de 600 mm T8 de 2 x 17 W con balastro magnético.

- Equipos: Una unidad terminal (*fan coil*) de 1 TR con 1 motor de 1/15 HP y consumo de potencia de 124 W, puede operar a tres velocidades, y equipos varios de comunicación.
- Nivel de ocupación: El espacio es ocupado por dos personas.

A continuación se explican las cargas evaluadas.

### Ganancia de calor por transmisión

#### Según la *Sname*

La carga por transmisión  $q_t$  para superficies no soleadas según la *Sname* se determina mediante la ecuación:

$$q_t = U \times A \times \Delta T \quad (1)$$

Los valores de  $U$  recomendados son los contenidos en el *Reporte de Aislamiento Térmico* 4-3 de 1963, como ya se mencionó.

Para determinar la carga por transmisión para superficies externas expuestas al sol se emplea la siguiente ecuación:

$$q_{ss} = U \times A \times T_e \quad (2)$$

Los valores de temperatura exterior que se toman para determinar la diferencia de temperatura equivalente  $T_e$  son dados por la *Sname* (1980) y se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Temperaturas efectivas y factores de vidrio

Cálculos para superficie única	
Vertical	125°F
Horizontal	145°F
Factor solar para vidrio	160 Btu/h ft <sup>2</sup>
Cálculos para superficies múltiples	
Vertical	115°F
Horizontal	130°F
Factor solar para vidrio	120 Btu/h ft <sup>2</sup>

Fuente: *Sname* (1980).

### Según la *Ashrae*

La carga por conducción para superficies no soleadas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_i = U \times A \times \Delta T \quad (3)$$

La carga por conducción para superficies externas verticales (paredes) expuestas al sol se calcula mediante la ecuación:

$$q_{ssv} = U \times A \times CLTD_c \quad (4)$$

El valor del CLTD aparece tabulado en el *Fundamentals Handbook* de la *Ashrae* (1989 y 1997) y debe ser corregido cuando se diseña para una latitud diferente a 40°N y un mes de diseño diferente a julio mediante el factor LM, y cuando se tiene una variación diaria de temperatura diferente a 21°F y temperaturas de diseño exterior e interior diferentes a 95°F y 78°F respectivamente. También se aplica un factor de corrección por el color exterior de la superficie ( $k$ ). Todas estas correcciones se expresan en la siguiente ecuación:

$$CLTD_c = [(CLTD + LM) \cdot k + (78 - Tr) + (To - 85)] \quad (5)$$

La carga por transmisión para superficies externas horizontales (techos) expuestas al sol se calcula mediante la ecuación:

$$q_{ssh} = U \times A \times CLTD_c \quad (6)$$

Siendo para el caso de superficies horizontales (techos):

$$CLTD_c = [(CLTD + LM) \cdot k + (78 - Tr) + (To - 85)] \cdot f \quad (7)$$

Donde  $f$  es un factor de ventilación aplicable a ventiladores o conductos sobre techo falso (cielo raso); si no existen allí conductos ni ventilación este factor es igual a 1, lo cual ocurre en el buque Nodriza VI.

### Cálculo ejemplo

Para el caso de superficies no expuestas al sol se observa que la ecuación correspondiente es similar en ambos métodos, esto si se consideran que tienen valores iguales para el coeficiente global de transferencia de calor o factor  $U$ . Posteriormente se realiza un análisis de las diferencias entre el valor

de  $U$  tabulado por la *Sname* y los calculados por un método de la *Ashrae*.

#### Superficie horizontal

Para efectos de comparación de la carga por transmisión de superficies expuestas al sol, se realiza un cálculo ejemplo para una superficie horizontal soleada (cubierta superior) con área de 70,80 ft<sup>2</sup>, compuesta por lámina de acero de ¼" de espesor más aislamiento de poliuretano expandido de 3". Se considera para ambos casos el mismo valor de  $U$ .

Resultados obtenidos según la *Sname*:

$$q_{ssh} = U \times A \times Te = U \times 70,80 \times (145-80) = 4602 \cdot U$$

Resultados obtenidos según la *Ashrae*:

$$q_{ssh} = U \times A \times CLTD_c = U \times 70,80 \times (72,5) = 5133 \cdot U$$

El resultado detallado para el CLTD<sub>c</sub> se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} CLTD_c &= [(79 + (-4)) \cdot (1) + (78 - 80) + (84,5 - 85)] \cdot (1) \\ &= 72,5 \end{aligned}$$

Para determinar este valor se consideran las condiciones de diseño previamente establecidas, y adicional a ello se selecciona el tipo de techo n.º1 por ser el grupo que más se acerca a las características de construcción del buque (lámina de acero con 1" o 2" de aislamiento). Se toma el mayor valor de CLTD tabulado para techos que corresponde a las 14 horas (2 p.m.), *Ashrae* (1989).

#### Superficie vertical

Para evaluar superficies soleadas verticales se realiza el cálculo para el mamparo de popa expuesto al sol de acero naval de ¼" de espesor más aislamiento de poliuretano expandido de 3" con un área de 33,08 ft<sup>2</sup>; igual que en el caso anterior se considera el  $U$  igual para ambas metodologías.

Resultados obtenidos según la *Sname*:

$$q_{ssv} = U \times A \times Te = U \times 33,08 \times (125-80) = 1488,6 \cdot U$$

Resultados obtenidos según la *Ashrae*:

$$q_{ssv} = U \times A \times CLTD_c = U \times 33,08 \times (66,5) = 2199,82 \cdot U$$

El resultado detallado para el CLTDc se muestra a continuación:

$$\text{CLTDc} = [(72 + (-3)) \cdot (1) + (78 - 80) + (84,5 - 85)] = 72,5$$

El grupo de pared utilizado para seleccionar el CLTD fue el G, que corresponde a cortinas metálicas con aislamiento de 1" a 3". Se toma el mayor valor de CLTD tabulado para el grupo de pared que corresponde a una superficie con orientación oeste a las 17 horas (5 p.m.) y se corrige por latitud y mes de diseño para esa orientación (*Ashrae*, 1989).

### Superficies no soleadas o particiones internas

Como ya se mencionó, la ecuación para ambos casos es igual y por lo tanto, la carga térmica será igual siempre que el  $U$  empleado sea el mismo, pues los valores de temperatura se suponen iguales y el área será la misma.

Para efectos de comparación de la carga por transmisión de superficies no soleadas, se realiza un cálculo ejemplo para el mamparo lateral de babor, que es termoacústico, de lana de roca mineral, con  $U = 0,1739 \text{ Btu/h.ft}^2 \text{ }^\circ\text{F}$  y que tiene como espacio adyacente un pasillo el cual es acondicionado indirectamente (se considera una temperatura de  $0,5^\circ\text{F}$  por encima de la temperatura de diseño interior). El área es de  $56,47 \text{ ft}^2$ .

Resultados obtenidos según la *Sname*

$$q_i = U \times A \times \Delta T = 0,1739 \times 56,47 \times (80,5 - 80) = 4,91 \text{ Btu/h}$$

Resultados obtenidos según la *Ashrae*

$$q_i = U \times A \times \Delta T = 0,1739 \times 56,47 \times (80,5 - 80) = 4,91 \text{ Btu/h}$$

### Ganancia de calor a través de vidrios

#### Según la *Sname*

La ganancia de calor que combina la transmisión (conducción) y la radiación solar para vidrios se calcula mediante:

$$q_v = G_{sf} \times A \quad (8)$$

#### Según la *Ashrae* (1989)

Esta carga se divide en una carga por conducción a través de la superficie y en una carga debido a la radiación que es transmitida al interior del espacio acondicionado. Para la ganancia de calor por conducción a través de un vidrio se emplea la siguiente ecuación:

$$q_{condv} = U \times A \times \text{CLTDc} \quad (9)$$

$$\text{siendo: } \text{CLTDc} = \text{CLTD} + (78 - \text{Tr}) + (\text{Tr} - 85) \quad (10)$$

La ganancia de calor producto de la radiación solar a través de vidrios se determina mediante la siguiente ecuación:

$$q_{radv} = A \times SC \times \text{SHGF} \times \text{CLF} \quad (11)$$

La carga total por vidrios será:

$$q_v = q_{condv} + q_{radv} \quad (12)$$

#### Cálculo ejemplo

Se realizó el cálculo por ambos métodos para el vidrio blindado de  $1^{27}/_{32}$ " de espesor con un área de  $3,15 \text{ ft}^2$ .

Resultados obtenidos según la *Sname*

$$q_{radv} = G_{sf} \times A = 160 \times 3,15 = 504 \text{ Btu/h}$$

Resultados obtenidos según la *Ashrae*

$$q_{condv} = U \times A \times \text{CLTDc} = 1,04 \times 3,15 \times 11,5 = 37,674 \text{ Btu/h}$$

El  $U$  es para un vidrio plano sencillo por no tener datos tabulados para vidrio blindado. Se tomó el mayor valor de CLTD tabulado para conducción en vidrios, que corresponde a las 16 horas (4 p.m.) y se corrigió para las temperaturas de diseño.

$$q_{radv} = A \times SC \times \text{SHGF} \times \text{CLF} = 3,15 \times 0,87 \times 201 \times 206 \times 0,53$$

$$q_{radv} = 291,945 \text{ Btu/h}$$

El factor de sombreado ( $SC$ ) seleccionado es para un vidrio sencillo de 2" de espesor, y el mayor factor de ganancia de calor solar ( $SHGF$ ) elegido es

para la latitud de diseño de 0° N que corresponde a un vidrio con orientaciones noreste y/o noroeste. A partir de allí se selecciona el mayor factor de carga de enfriamiento *CLF* considerando el buque como una construcción media y para vidrios sin sombreado interior. El valor corresponde a las 18 horas (6 p.m.), por lo tanto la carga total a través del vidrio será:

$$q_v = 37,674 + 291,945 = 329,62 \text{ Btu/h}$$

### Ganancia de calor por iluminación

#### Según la *Sname*

La carga por iluminación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q_{il} = I.W. + F.W. \times B.F. \times 3,41 \quad (13)$$

*B.F.* es el factor de resistencia (equivale a 1,25 para buques mercantes) y 3,41 es el factor de conversión de vatios (W) a Btu/h.

#### Según la *Ashrae* (2005)

La carga por iluminación se determina mediante la ecuación:

$$q_i = 3,41 \times W \times CLF \times F_{ul} \times F_{sa} \quad (14)$$

siendo,

*W* = potencia en vatios de las luminarias.

*F<sub>ul</sub>* = potencia en vatios instalada / potencia en vatios usada.

*F<sub>sa</sub>* = factor especial de iluminación. Este depende del tipo de luminaria y de balastro.

*CLF* = factor de carga de enfriamiento, que depende del número de horas que permanecen encendidas las luces.

#### Cálculo ejemplo

Para el cálculo se considera la iluminación del cuarto de radio que consiste en dos lámparas fluorescentes dobles de techo de 600 mm T8 de 17 W con balastro magnético.

Resultados obtenidos según la *Sname*

$$q_{il} = 68 \times 1,25 \times 3,41 = 289,85 \text{ Btu/h}$$

Resultados obtenidos según la *Ashrae*

$$q_{il} = 3,41 \times 68 \times 1 \times 1 \times 0,91 = 211,01 \text{ Btu/h}$$

Se considera que se usa toda la potencia en vatios instalada por lo que *F<sub>ul</sub>* es igual a 1. El valor de *F<sub>sa</sub>* se obtiene de los valores tabulados para diferentes tipos de lámparas fluorescentes (*Ashrae*, 2005). El *CLF* se considera 1 suponiendo que las luces solo están prendidas cuando el equipo de acondicionamiento de aire está encendido.

### Ganancia de calor por personas

#### Según la *Sname* y la Armada de los Estados Unidos

Las ganancias de calor sensible y latente se determinan respectivamente mediante las siguientes ecuaciones:

$$q_{psen} = G_{sp} \times N \quad (15)$$

$$q_{plat} = G_{lp} \times N \quad (16)$$

Los valores recomendados por la *Sname* para la disipación de calor sensible *G<sub>sp</sub>* o latente *G<sub>lp</sub>* por personas aparecen tabulados en el *Technical and Research Bulletin* (1980) y varían con la temperatura del cuarto y el nivel de actividad. Este último se encuentra dividido en espacios de trabajo y de atención de mesas y todos los espacios restantes.

Por otro lado, la Armada de los Estados Unidos proporciona gráficas para determinar la disipación de calor sensible y latente para buques de guerra según el tipo de espacio y el valor de temperatura, como se observa en el Gráfico 1.

#### Según la *Ashrae* (2005)

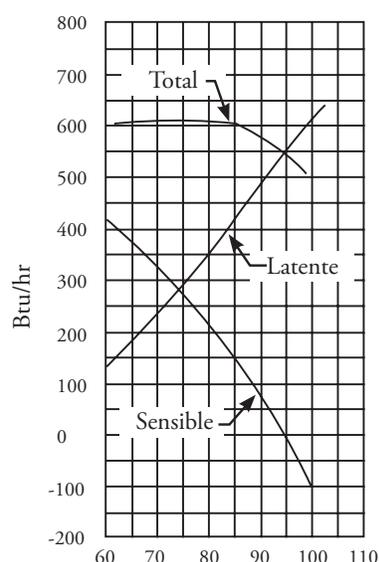
Las ganancias de calor sensible y latente se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$q_{psen} = G_{sp} \times N \times CLF \quad (17)$$

$$q_{plat} = G_{lp} \times N \quad (18)$$

El valor de *CLF* para la carga sensible depende del tiempo de ocupación del espacio.

Gráfico 1. Disipación de calor sensible y latente

Fuente: *Sname* (1992).

Los valores de disipación por personas están disponibles en el Cuadro 2 según el tipo de actividad y espacio.

Los valores tabulados se basan en una temperatura del espacio de 75°F. Para temperaturas de 80°F, el calor total permanece igual, pero los valores de calor sensible deben disminuirse en 20% aproximadamente, y los de calor latente incrementarse en igual proporción.

### Cálculo ejemplo

Se evaluó el cuarto de radio de acuerdo con las condiciones de temperatura de diseño considerando la ocupación permanente de dos personas.

Resultados según la *Sname*

$$q_{psen} = G_{sp} \times N = 240 \times 2 = 480 \text{ Btu/h}$$

Cuadro 2. Ganancia de calor por ocupantes de espacios acondicionados

Grado de actividad	Espacio	Calor total, Btu/h		Calor sensible Btu/h	Calor latente Btu/h
		Hombre adulto	Ajustado M/F <sup>2</sup>		
Sentado en el teatro	Teatro, matiné	390	330	225	105
Sentado en el teatro, noche	Teatro, noche	390	350	245	105
Sentado, trabajo muy ligero	Oficina, hoteles y apartamentos	450	400	245	155
Trabajo de oficina de actividad moderada	Oficina, hoteles y apartamentos	475	450	250	200
De pie, trabajo ligero; caminando	Almacén por departamento, almacén de ventas	550	450	250	200
Caminando, de pie	Droguerías, bancos	550	500	250	250
Trabajo sedentario	Restaurantes	490	550	275	275
Trabajo ligero en mesa	Fábricas	800	750	275	475
Baile moderado	Salón de baile	900	850	305	545
Caminando a 3 mph; trabajo ligero en máquina	Fábricas	1.000	1.000	375	625
Juego de bolos	Salón de boliche	1.500	1.450	580	870
Trabajo pesado	Fábricas	1.500	1.450	580	870
Trabajo pesado en máquinas; levantándose	Fábricas	1.600	1.600	635	965
Actividades atléticas	Gimnasio	2.000	1.800	710	1.090

Fuente: *Ashrae* (2005).

$$q_{plat} = G_{ip} \times N = 360 \times 2 = 720\text{Btu/h}$$

Se seleccionaron los valores para la columna de todos los espacios restantes por no ser un espacio de trabajo ni de atención de mesas.

Resultados según el gráfico de Armada de los Estados Unidos.

$$q_{psen} = G_{sp} \times N = 240 \times 2 = 480\text{Btu/h}$$

$$q_{plat} = G_{ip} \times N = 350 \times 2 = 700\text{Btu/h}$$

Se seleccionó el Gráfico 1 para oficinas, camarotes, cabinas y espacios electrónicos.

Resultados según la *Ashrae* (2005)

$$q_{psen} = G_{sp} \times N \times CLF = 245 \times 2 \times 1 \times 0,8 = 392\text{Btu/h}$$

$$q_{plat} = G_{ip} \times N = 155 \times 2 \times 1,2 = 372\text{Btu/h}$$

Se considera un grado de actividad en el cuarto de radio como "Sentado, trabajo muy ligero". Los valores de 0,8 y 1,2 en los cálculos para calor sensible y latente respectivamente representan el decremento e incremento del 20% recomendado para una temperatura de 80°F.

El valor de *CLF* se tomó igual a 1 debido a que la temperatura del espacio no se mantiene constante durante las 24 horas del día (*Ashrae*, 1977), esto se debe a que en ciertas horas el equipo de acondicionamiento de aire se apaga.

### Ganancia de calor por equipos

#### Según la *Sname*

La carga por equipos puede ser calculada cuando se conocen o estiman los datos de disipación de calor mediante las ecuaciones 19 y 20:

$$q_s = q_{sd} \times U.F. \times H.F. \tag{19}$$

$$q_l = q_{ld} \times U.F. \tag{20}$$

*UF* es el factor de uso (Cuadro 3), y *HF* representa el factor de campana. Se usa 0,5 para la carga sensible de equipos que tienen una campana de extrac-

ción, y se considera cero su carga latente. Se usa 1 cuando no hay campana de extracción sobre el equipo.

#### Según la *Ashrae*

La ganancia de calor sensible  $q_{sensible}$  para equipos genéricos de tipo eléctrico, de vapor y de gas, bajo una campana extractora, puede estimarse usando la siguiente ecuación:

$$q_{sensible} = q_{entrada} \times F_U \times F_R \times CLF \tag{21}$$

o,

$$q_{sensible} = q_{entrada} \times F_L \times CLF \tag{22}$$

Donde el  $F_L$  se define como la relación entre la ganancia de calor sensible y la energía nominal de entrada  $q_{entrada}$ , proporcionada por los fabricantes de los equipos.

Los factores de uso  $F_U$ , de radiación  $F_R$  y de carga  $F_L$  aparecen tabulados en el *Fundamental Handbook* (2005) de la *Ashrae*.

Una alternativa para determinar la ganancia de calor por equipos de cocina es hacer uso directo de los valores recomendados para estos, disponibles en los manuales de la *Ashrae* de 2001 y 2005.

Cuadro 3. Factores de uso recomendados para equipos típicos en aplicaciones marinas

Espacio	Factor de uso (U. F.)
Cuarto de equipo de propulsión	0,5
Cuarto de computo	1,0
Cuarto de control del motor	1,0
Cuartos de ventiladores	1,0
Cocina	0,5
Cuarto de equipo de giro	0,5
Dispensa	0,5
Cuarto de equipos de radar	0,5
Cuarto de radio	0,3
Espacios restantes	0,3

Fuente: *Sname* (1980).

El valor de carga latente se determina de los valores tabulados sin la necesidad de hacer ninguna corrección (ecuación 23).

$$q_l = q_{latente} \quad (23)$$

donde  $q_{latente}$  es la ganancia de calor latente del equipo disponible en diferentes tablas (Ashrae, 2005).

### Ganancia de calor por equipos de potencia (motores eléctricos)

#### Según la Sname

Para motores eléctricos la ganancia de calor sensible puede ser calculada usando una de las dos ecuaciones siguientes:

$$q_{motor} = \frac{\text{Potencia al freno del motor} \times 2545 \times U.F.}{\text{Eficiencia del motor}} \quad (24)$$

o,

$$q_{motor} = \text{Potencia nominal del motor Kw} \times 3412 \times U.F. \quad (25)$$

Las eficiencias de los motores se encuentran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Eficiencias de motores eléctricos

Potencia del motor, HP	Eficiencia del motor
De 1/8 o menos	0,50
De 1/6 hasta 1/4	0,60
De 1/3 hasta menos de 2	0,70
De 2 hasta 10	0,85
Mayores de 10	0,90

Fuente: Sname (1980).

#### Según la Ashrae

Para determinar la ganancia de calor producto de equipos que funcionan con motores eléctricos, es necesario tener en cuenta la ubicación tanto del equipo como del motor que lo acciona. Esta ganancia de calor puede ser determinada directamente (Cuadro 5) o a través de las ecuaciones que se explican a continuación.

Si tanto el equipo como el motor están ubicados dentro del espacio acondicionado la ecuación de cálculo de la ganancia de calor instantánea será:

$$q_{motor} = 2545 \times \left( \frac{P}{E_M} \right) \times F_{UM} \times F_{LM} \quad (26)$$

$P$  = la potencia nominal del motor en HP

$E_M$  = eficiencia del motor, como una fracción decimal menor a 1,0

$F_{UM}$  = factor de uso; puede ser igual a 1,0 o una fracción decimal menor a 1,0. El factor de uso se aplica cuando se conoce que el motor funcionará en forma intermitente con un tiempo significativo de no uso del total de las horas de operación. Para aplicaciones convencionales este valor será igual a 1,0.

$F_{LM}$  = factor de carga que corresponde a la fracción de la potencia nominal del eje que está siendo desarrollada por el equipo bajo las condiciones de la carga de enfriamiento estimada.

Cuando el motor está ubicado por fuera del espacio acondicionado pero el equipo se encuentra en el interior, la ganancia de calor instantánea será:

$$q_{motor} = 2545 \times P \times F_{UM} \times F_{LM} \quad (27)$$

Cuando el motor está ubicado dentro del espacio acondicionado pero el equipo conducido se encuentra en el exterior, la ganancia de calor instantánea será:

$$q_{motor} = 2545 \times P \left( \frac{1 - E_M}{E_M} \right) \times F_{UM} \times F_{LM} \quad (28)$$

El Cuadro 5 proporciona las eficiencias promedio y los datos representativos de motores eléctricos típicos.

Si la carga del motor eléctrico es una porción apreciable de la carga de enfriamiento, la eficiencia del motor debe obtenerse de los fabricantes.

Normalmente la ganancia de calor debe ser dividida en partes iguales entre los componentes radiante y convectivo para los cálculos de

carga de enfriamiento, a menos que la literatura técnica de los fabricantes indique otra cosa.

El componente radiante de la ganancia de calor sensible de equipos de potencia se retrasa para

convertirse en carga de enfriamiento de la misma manera que las otras categorías de carga. Por ello debe multiplicarse la ganancia de calor instantánea determinada mediante las ecuaciones 26, 27 y 28, por el factor *CLF*.

Cuadro 5. Ganancias de calor y eficiencias promedio de motores comunes

Datos de placa del motor o potencia nominal	Tipo de motor	Rpm	Eficiencia del motor a plena carga, %	Localización del motor y del equipo con respecto al espacio acondicionado		
				Motor y equipo dentro, Btu/h	Motor fuera, equipo dentro, Btu/h	Motor dentro, equipo fuera, Btu/h
0,05	De polo sombreado	1.500	35	350	130	240
0,08	De polo sombreado	1.500	35	580	200	380
0,125	De polo sombreado	1.500	35	900	320	590
0,16	De polo sombreado	1.500	35	1.160	400	760
0,25	Fase dividida	1.750	54	1.180	640	540
0,33	Fase dividida	1.750	56	1.500	840	660
0,50	Fase dividida	1.750	60	2.120	1.270	850
0,75	Trifásico	1.750	72	2.650	1.900	740
1,00	Trifásico	1.750	75	3.390	2.550	850
1,50	Trifásico	1.750	77	4.960	3.820	1.140
2,00	Trifásico	1.750	79	6.440	5.090	1.350
3,00	Trifásico	1.750	81	9.430	7.640	1.790
5,00	Trifásico	1.750	82	15.500	12.700	2.790
7,50	Trifásico	1.750	84	22.700	19.100	3.640
10,00	Trifásico	1.750	85	29.900	24.500	4.490
15,00	Trifásico	1.750	85	44.400	38.200	6.210
20,00	Trifásico	1.750	87	58.500	50.900	7.610
30,00	Trifásico	1.750	89	85.700	76.300	9.440
40,00	Trifásico	1.750	89	114.000	102.000	12.600
50,00	Trifásico	1.750	89	143.000	127.000	15.700
60,00	Trifásico	1.750	89	172.000	153.000	18.900
75,00	Trifásico	1.750	90	212.000	191.000	21.200
125,00	Trifásico	1.750	90	353.000	318.000	35.300
150,00	Trifásico	1.750	91	420.000	382.000	37.800
200,00	Trifásico	1.750	91	569.000	509.000	50.300
250,00	Trifásico	1.750	91	699.000	636.000	62.900

Fuente: *Ashrae* (2005).

Como no existe componente de carga latente para los equipos de potencia, la carga de enfriamiento por este tipo de equipos será:

$$q_{smotor} = q_{motor} \times CLF \quad (29)$$

$$\begin{aligned} q_{motor} &= 2545 \times \left( \frac{P}{E_M} \right) \times F_{UM} \times F_{LM} \\ &= 2545 \times \left( \frac{1/15}{0,35} \right) \times 0,75 \times 1 = 363,57 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

$$q_{smotor} = q_{motor} \times CLF = 363,57 \times 1 = 363,57 \text{ Btu/h}$$

### Cálculo ejemplo

Se evaluó el motor del ventilador-serpentin (*fan coil*) instalado en el cuarto de radio. El motor es de 1/15 HP y puede ser operado en tres velocidades con consumo de 124 W. Para efecto de comparación se realiza el cálculo considerando que el motor opera a plena carga y de forma continua durante ocho horas al día y se apaga por control de temperatura 15 minutos por cada hora de operación.

### Resultados según la Sname

$$\begin{aligned} q_{motor} &= \frac{HP_{Motor} \times 2545 \times U.F.}{\text{Eficiencia del motor}} = \frac{1/15 \times 2545 \times 0,3}{0,5} \\ &= 101,8 \text{ Btu/h} \end{aligned}$$

Se empleó el factor de uso y la eficiencia del motor recomendados (cuadros 3 y 4 respectivamente).

### Resultados según la Ashrae (2005)

El equipo y el motor están ubicados dentro del espacio acondicionado, por lo tanto se emplea la ecuación 26.

Se consideró el factor de uso igual a 0,75 y el *CLF* igual a 1, debido a que el equipo se apaga después de las horas de trabajo.

### Comparación de resultados obtenidos

A partir de los ejemplos previamente desarrollados se realizó un cuadro comparativo para determinar el incremento o decremento de la carga térmica al ser evaluada por ambos métodos (Cuadro 6).

### Coefficiente global de transferencia de calor

Una de las limitantes de los resultados obtenidos en los cálculos de carga térmica desarrollados por Lugo (2005) y Rodríguez (2006) fue hacer uso directo de los valores del coeficiente global de transferencia de calor tabulados en el *Reporte de Aislamiento Térmico 4-3* de 1963 de la *Sname*, los cuales se determinaron para estructuras aisladas con fibra de vidrio, mientras que en la nodriza se

Cuadro 6. Comparación de los componentes de carga

Tipo de carga	<i>Sname</i>	<i>Ashrae</i>	Variación	%
	Btu/h			
Conducción en superficies horizontales expuestas al sol	4602·U	5133·U	Aumentó	11,54
Conducción en superficies verticales expuestas al sol	1488,6·U	2199,82·U	Aumentó	47,78
Conducción a través de particiones (superficies no soleadas)	4,91	4,91	Igual	0,00
Ganancia a través de vidrios	504,00	329,62	Disminuyó	34,60
Iluminación	289,85	211,01	Disminuyó	27,20
Sensible por personas	480,00	392,00	Disminuyó	18,33
Latente por personas	720,00	372,00	Disminuyó	48,33
Equipos de potencia	101,8	367,57	Aumentó	257,00

Fuente: Resultado de la investigación.

utiliza poliuretano expandido. Es importante anotar que el uso de tales valores se justificó en sus estudios por no poseer datos disponibles para las estructuras navales aisladas con poliuretano ni las herramientas experimentales para evaluarlos. Tal limitante ha sido el punto de partida para justificar dentro de un proyecto en ejecución el desarrollo de un dispositivo de medición que permita determinar los coeficientes considerando las características de construcción de las envolventes de los buques en Cotecmar. El uso del reporte de la *Sname* para los cálculos de diseño del sistema de acondicionamiento de aire de las patrulleras de río no generó equipos con capacidades inferiores a las requeridas, por el contrario, se considera como un factor de seguridad adicional que se evidencia en el sistema instalado en la Nodriz VI el cual cumple con los requerimientos de temperatura y humedad en cada uno de los espacios del buque. Desde el punto de vista energético tal consideración produce sistemas sobredimensionados que representan pérdidas de energía, y por ende económicas, en la explotación del buque.

A partir de los valores de conductividad térmica tabulados por la *Ashrae* (2005), se observó que el poliuretano expandido con densidad de  $40 \text{ kg/m}^3$  empleado en la Nodriz VI es de menor conductividad ( $k= 0,18 \text{ Btu.in/ft}^2\text{.h.}^\circ\text{F}$ ), que el valor de las placas o losas de fibra de vidrio ( $0,230 \text{ Btu.in/ft}^2\text{.h.}^\circ\text{F}$ ) empleadas en el reporte de la *Sname* para determinar experimentalmente el valor de  $U$ . Basados en estos valores podríamos afirmar que el valor de  $U$  para las estructuras aisladas con poliuretano será menor que el valor del reporte con fibra de vidrio. Adicional a esto, las dimensiones de los refuerzos empleados en la actualidad en la construcción de buques son mucho mayores que los utilizados en los ensayos del reporte, y la geometría es diferente (refuerzo en L para el reporte frente a refuerzo en T y tipo bulbo de la nodriz), lo que incrementa el flujo de calor en los puentes térmicos generados por la configuración de la estructura. Eso trae consigo diferencias sustanciales en los valores de  $U$  con respecto a las configuraciones de refuerzos actuales, por lo que los valores de  $U$  tabulados no resultan adecuados (Hart et al., 2004).

Para respaldar dicha afirmación realizamos el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor empleando el *método de zona*, recomendado por la *Ashrae* para estimar de forma aproximada el factor  $U$  de estructuras en las que se producen puentes térmicos, aunque *Ashrae* manifiesta que si el panel tiene una estructura metálica interna unida en uno o ambos lados a una cubierta metálica se produce un problema especial de flujo de calor lateral que el método no cubre (*Ashrae*, 2005). Por lo tanto, los cálculos fueron realizados solo con el propósito de mostrar las variables que afectan el desempeño térmico de una estructura o panel que contiene un metal u otro material de alta conductividad que atraviesa total o parcialmente el aislamiento, y hacer comparaciones entre las diferentes geometrías de los refuerzos y aislantes empleados en la nodriz con respecto a los ensayados en el reporte de la *Sname*.

Resaltamos que para estructuras como las presentes en la nodriz es recomendable hacer evaluaciones experimentales mediante ensayos en la *caja caliente con caja de guarda* o la *caja caliente calibrada*, y/o hacer uso de herramientas de simulación computacional, para obtener resultados confiables y precisos (*Ashrae*, 2005).

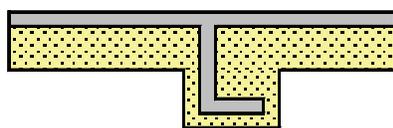
El *método de zona* requiere dos cálculos por separado: uno para una porción limitada escogida, *Zona A*, que contiene el elemento con alta conductividad; el otro para la porción restante más sencilla de la construcción, llamada *Zona B*. Se combinan los dos cálculos, y se calcula el factor  $U$  por unidad de área total.

Se aplican las leyes básicas de la transferencia de calor sumando las conductancias por áreas  $C \cdot A$  de los *elementos en paralelo*, y sumando las resistencias por áreas  $R \cdot A$  de los *elementos en serie*.

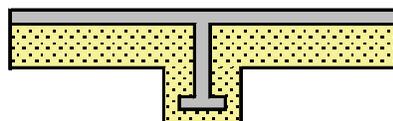
La forma de la superficie de la *Zona A* se determina a partir del elemento de metal. Para una viga de metal, la superficie de la *Zona A* es una tira de ancho  $W$ , en el centro de la viga. El valor de  $W$  se calcula de la ecuación empírica:

$$W = m + 2d \quad (30)$$

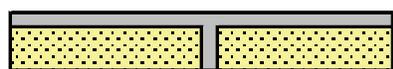
Gráfico 2. Esquemas de las estructuras o paneles evaluados



A. Panel con refuerzo angular más aislamiento



B. Panel con refuerzo "T" más aislamiento



C. Panel con refuerzo tipo bulbo más aislamiento

Fuente: Elaboración propia.

donde,

$m$  = ancho o diámetro del final de la trayectoria de calor en el metal, en pulgadas;

$d$  = distancia desde la superficie del panel al metal, en pulgadas. El valor de  $d$  no debe ser menor a 0,5 pulgadas (para aire quieto).

Mediante el método de *zona* se evaluaron tres geometrías de refuerzo y dos tipos de aislamientos. El primer cálculo fue realizado para el refuerzo de

acero angular (perfil en L) de 6" x 4" x 1/4", espaciados 36" entre refuerzos con 3" de aislamiento de fibra de vidrio y 1" de aislamiento alrededor del refuerzo; estas son las características del refuerzo ensayado en el reporte de la *Sname* (Gráfico 2A).

Luego se evaluaron las envolventes empleadas en Cotecmar en la construcción de la patrullera de río Nodriz VI.

La primera es un panel con refuerzo en T de 10" x 3" x 1/4" espaciados 24" entre refuerzos, con 3" de aislamiento de poliuretano expandido y 1" de aislamiento alrededor de la parte final del refuerzo (Gráfico 2B).

La segunda es un panel con refuerzo tipo bulbo de 3" x 1/4" espaciados 24" entre refuerzos, con 3" de aislamiento de poliuretano expandido; en los cálculos de este último no se consideró el bulbo del refuerzo (Gráfico 2C). En esta estructura en particular hay que anotar que en la práctica de instalación del aislamiento por parte de los contratistas responsables, se observaron errores puesto que la parte final del bulbo del refuerzo no es completamente aislada y logra estar en contacto con la lámina de acero galvanizado con la que se recubre el aislamiento, lo que genera un serio problema de flujo de calor debido a la alta conductividad de los materiales metálicos en contacto. Esto produce puntos o zonas de calor que resultan en mayores valores de  $U$ , y por ende menor desempeño térmico del sistema de aislamiento.

Cuadro 7. Comparación del factor  $U$  en Btu/h.ft<sup>2</sup>.°F para diferentes geometrías de refuerzo y aislamientos

Geometría del refuerzo	Aislamiento	Fuente	Determinado	Valor
En L	Fibra de vidrio	Tabla <i>Sname</i>	Ensayos	0,111
En L	Fibra de vidrio	Método de zona	Cálculo del autor	0,089
En L	Poliuretano	Método de zona	Cálculo del autor	0,071
En T	Poliuretano	Método de zona	Cálculo del autor	0,074
En I	Poliuretano	Método de zona	Cálculo del autor	0,107

Fuente: Resultado de la investigación.

Cuadro 8. Comparación entre componentes de carga

Componente de carga	<i>Sname</i>	<i>Asbrae</i>	Condición	% de cambio
Cubierta superior soleada	538,45	526,01	Disminuyó	2,3
Conducción mamparo a popa soleado	172,67	235,99	Aumentó	-36,7
Mamparo lateral a babor - partición	32,65	32,65	Igual	0,0
Mamparo lateral a estribor - partición	193,77	193,77	Igual	0,0
Vidrio	Conducción	503,74	Disminuyó	46,6
	Radiación	231,35		
Iluminación	289,85	211,01	Disminuyó	27,2
Equipo de potencia	101,80	363,57	Aumentó	-257
Personas	Sensible	480,00	Disminuyó	18,3
	Latente	720,00		
<b>Totales</b>	<b>3032,93</b>	<b>2596,03</b>	<b>Disminuyó</b>	<b>14,4</b>

Fuente: Resultado de la investigación.

Cuadro 9. Comparación de capacidades de refrigeración obtenidas

Característica	<i>Sname</i>	<i>Asbrae</i>
Calor sensible (Btu/h)	2312,93	2224,03
Calor latente (Btu/h)	720,00	372,00
Relación de calor sensible (SHF)	0,76	0,86
Temperatura del espacio °F	80,00	80,00
Temperatura de suministro °F	59,00	63,00
Aire de suministro (cfm)	101,51	120,58
h1 (Btu/lb)	31,40	31,40
h2 (Btu/lb)	24,50	26,50
Capacidad de refrigeración (Btu/h)	3151,92	2658,71
Capacidad de refrigeración (TR)	0,2627	0,2216
% Reducción		15,65%

Fuente: Resultado de la investigación.

Los resultados para el coeficiente global de transferencia de calor se resumen en el Cuadro 7.

### Cálculo de carga para un espacio del buque en estudio

Para determinar la influencia del método de cálculo de carga térmica en la capacidad final del equipo de acondicionamiento de aire se evaluaron cada una de los componentes de carga para el local estudiado, el cuarto de radio de la Nodriza VI, y mediante la metodología de las curvas del serpentín de la *Trane Corporation* (Rodríguez, 2006), se determinó la capacidad requerida para el cuarto de radio a partir de los resultados de carga térmica de ambas metodologías.

Se emplearon las ecuaciones previamente indicadas para cada componente de carga y se hizo uso de los factores  $U$  tabulados por la *Sname* en los cálculos de ambas metodologías debido a que los valores de  $U$  determinados por el método de zona (Cuadro 7) no pueden ser considerados como datos de diseño válidos por los problemas de flujo lateral que generan las estructuras evaluadas. Como ya se mencionó, para obtener valores aceptables es necesario llevar a cabo estimaciones experimentales o simulaciones computacionales.

Por lo tanto, en la comparación entre los métodos de cálculo de carga térmica solo se evalúa el procedimiento de cálculo y los resultados obtenidos de los componentes de carga considerados sin tomar en cuenta las diferencias en el coeficiente global de transferencia de calor y su efecto en las cargas por conducción.

En el Cuadro 8 se muestra un comparativo de las cargas calculadas. Los valores tabulados para la *Ashrae* difieren de los calculados previamente en los ejemplos, debido a que estos corresponden a los resultados obtenidos a la hora pico (16 horas / 4 p.m.) que representa la mayor carga total; esta resulta de las sumatorias de cada componente de carga individual para cada hora del día.

El Cuadro 9 muestra la comparación de las capacidades obtenidas a partir de los resultados de carga térmica para cada metodología; también se muestran los valores de temperatura y entalpías del aire obtenidos de la carta psicrométrica para el cálculo del flujo de aire de suministro y la capacidad del equipo.

Mediante la metodología CLTD/CLF se obtuvo una menor capacidad requerida por el equipo de acondicionamiento de aire para suplir la carga demandada por el cuarto de radio.

## Conclusiones

La metodología para el diseño de sistemas de aire acondicionado empleadas por el astillero de Cotecmar en la construcción de buques, y se puede decir que por la industria astillera en general, se encuentra desactualizada pues aún considera que la ganancia de calor producto de los diferentes componentes se transmite de manera instantánea al espacio, lo cual es errado ya que realmente se produce el efecto de almacenamiento y la ganancia de calor se transmite al espacio tiempo después de haber sido producida. Tal efecto es considerado por el método CLTD/CLF de la *Ashrae* mediante el factor de carga de enfriamiento CLF.

Las cargas por conducción de superficies expuestas no consideran la variación en la diferencia de tem-

peratura debido a la localización (latitudes diferentes), los meses de diseño y la orientación de las superficies.

Para el caso de la carga a través de vidrios no se consideran las características del tipo de vidrio, pues no se evalúa la carga por conducción que tiene en cuenta el factor  $U$  el cual depende de las características del vidrio empleado, y la carga producto de la radiación solar no considera las variaciones debido al ángulo de incidencia de la radiación y las características de sombra del vidrio.

En la carga por iluminación no se tiene en cuenta los efectos producidos por el tipo de luminaria y de balastro ni el efecto de almacenamiento térmico.

En la carga por personas se presentan diferencias entre los valores tabulados; los suministrados por la *Ashrae* son más actuales que los recomendados por la *Sname*.

La carga por equipos de potencia representa la de mayor diferencia entre los dos métodos de cálculo, siendo mucho menor el resultado de la *Sname*. Esto se debe a los bajos factores de uso que recomienda en comparación con el tiempo real de uso elevado del equipo evaluado (unidad terminal de suministro de aire) y las diferencias entre las eficiencias de los motores tabuladas por ambas metodologías. Es de anotar que los valores tabulados por la *Ashrae* corresponden a datos más actuales, además esta, a diferencia de la *Sname*, no considera el efecto de la ubicación del equipo y el motor en la ganancia de calor.

Por otro lado, en la actualidad los coeficientes globales de transferencia de calor tabulados por la *Sname* son inadecuados para el diseño del sistema de aislamiento de las patrulleras de río y de buques en general y en el cálculo del sistema de aire acondicionado debido a las diferencias presentes en las dimensiones y características geométricas de las envolventes del buque y en el tipo de aislamiento empleado.

El uso de la metodología de la *Ashrae* muestra una reducción de 15,65% en la capacidad real requerida para el local de estudio con respecto al valor obte-

nido por la metodología de la *Sname*, sin considerar en los cálculos las diferencias del factor  $U$ . Esto demuestra que el uso de las prácticas recomendadas por la *Sname* para el diseño de sistemas de acondicionamiento de aire en buques puede generar equipos sobredimensionados.

## Recomendaciones

Para determinar el factor  $U$  de estructuras como las presentes en el buque nodriza, en las cuales se producen puentes térmicos, se requiere hacer uso de evaluaciones experimentales basados en el método de caja caliente y/o herramientas de simulación computacional (*Ashrae*, 2005 y Hart et al., 2004), debido a que los métodos numéricos de solución disponibles en la literatura no cubren los efectos del flujo de calor en dos y tres dimensiones, producidos en paneles con estructuras metálicas internas que atraviesen total o parcialmente el aislamiento, y que están unidas en uno o ambos lados a una cubierta o revestimiento metálico. Como ya se afirmó, esto trae un problema especial de flujo de calor lateral el cual está presente en la Nodriza VI. Las evaluaciones experimentales y simulaciones computacionales aquí recomendadas serán desarrolladas dentro del marco del proyecto conjunto UTB-Cotecmar cofinanciado por Colciencias con código 1244-327-19801 titulado “Optimización Energética de Buques”.

Por otro lado, es necesario determinar los factores CLTD para las estructuras y tipos de zonas encontradas en la construcción de buques mediante el método de las funciones de transferencia, con el propósito de obtener valores más precisos de la carga de enfriamiento al considerar las características de diseño propias de los buques, antes que utilizar valores tabulados que no fueron determinados para el tipo de construcciones presentes en estos.

Se recomienda evaluar la totalidad de locales acondicionados del buque aplicando la metodología CLTD/CLF para determinar como influye el procedimiento de cálculo de carga térmica en la capacidad total del equipo de acondicionamiento de aire del buque Nodriza VI; adicional a ello verificar los resultados obtenidos al realizar los cálculos

de carga de enfriamiento con los métodos más actuales desarrollados por la *Ashrae* (método de balance de calor y/o de serie radiante en el tiempo) y obtener así sistemas.

Se requiere evaluar en las envolventes instaladas la generación de puntos calientes debido a los puentes térmicos generados por los refuerzos metálicos haciendo uso de termografía, y verificar qué tanto afecta el desempeño térmico de las estructuras aisladas la práctica de no aislar completamente la parte final de los refuerzos menores (Gráfico 2C).

## Abreviaturas

$A$	=	Área superficial de transferencia de calor, ft <sup>2</sup> .
$CLTD$	=	Diferencia de temperatura equivalente de la carga de enfriamiento.
$CLTD_c$	=	Diferencia de temperatura corregida para la carga de enfriamiento.
$F.W.$	=	Potencia en vatios de las luces fluorescentes.
$G_{sf}$	=	Factor solar del vidrio, BTU/h.ft <sup>2</sup> .
$I.W.$	=	Potencia en vatios de las luces incandescentes.
$N$	=	Número de ocupantes del espacio.
$T_o$	=	Temperatura promedio exterior, °F.
$T_r$	=	Temperatura de diseño interior, °F.
$U$	=	Coefficiente global de transferencia de calor, Btu/h.ft <sup>2</sup> .°F.
$\Delta t$	=	Diferencia de temperatura a través de la superficie de transferencia y/o aumento de temperatura permisible, °F.

## Referencias

- Ashrae, (1977), *Fundamentals Handbook*, Atlanta, USA.
- Ashrae, (1989), *Fundamentals Handbook*, Atlanta, USA.

- Ashrae, (1997), *Fundamentals Handbook*, Atlanta, USA.
- Ashrae, (2001), *Fundamentals Handbook*, Atlanta, USA.
- Ashrae (2005), *Fundamentals Handbook*, Atlanta, USA.
- CYMP. Accommodation Systemn. Catálogo de productos
- Hart G., H., Fulton P. y Cox G. (2004), "Ship Configurations: Insulation Design and Application" [en línea], disponible en: [http://www.sname.org/sections/san\\_diego/PCI%20Paper1.htm](http://www.sname.org/sections/san_diego/PCI%20Paper1.htm), recuperado el 14 de agosto de 2007.
- Lugo, R. (2005) "Cálculo de carga térmica Nodri-za Fluvial VI". Informe Técnico n.º ARC-019-514-02. Cotecmar, Cartagena, Colombia.
- Rodríguez, C. M. (2006) Diagnóstico energético del sistema de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial. [Monografía de grado]. Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.
- Sname (1963), *Thermal Insulation Report*. Technical and Research Bulletin 4-7. New York.
- Sname (1980), *Recommended Practices for Merchant Ship Heating, Ventilation and Air Conditioning Design Calculations*. Technical and Research Bulletin 4-16.
- Sname, (1992), *Marine Engineering*, cap. 21.
- Spitler, J. D., F. C. McQuiston y K. Lindsey. 1993. *The CLTD/SCL/CLF Cooling Load Calculation Method*, Ashrae Transactions. 99(1): 183-192.



# Soldabilidad de un acero microaleado utilizando el proceso *Smaw* y metal de aporte ferrítico de alta resistencia

Iván J. Castilla<sup>a</sup>  
Jimmy Unfried S.<sup>b</sup>

## Resumen

En esta investigación se estudió la soldabilidad de uniones de un acero templado y revenido para blindajes del tipo MIL A46100 (Fe; 0,28% C; 0,30% Cr; 0,24% Mo y 0,20% Ni), usando metal de aporte AWS E11018M, y el proceso *Smaw* (soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido), a través de relaciones generadas entre microestructura, variables del proceso y propiedades mecánicas (tracción, impacto Charpy V y microdurezas), en juntas de soldadura. Asimismo se evaluó el agrietamiento en frío a través de dos ensayos (severidad térmica controlada y placa H), y el desempeño en servicio (balístico) de las mismas, obtenidas al practicar uniones con dos entradas de calor, denominadas alta y baja. Se estableció la incidencia del aporte calórico sobre las propiedades y el desempeño.

**Palabras clave:** Soldabilidad, aceros para blindajes, ensayo de severidad térmica controlada, ensayos de placas en H, metal de aporte ferrítico.

## Abstract

In this research was studied the weldability of Q&T armor steel MIL A46100 (Fe; 0.28%C; 0.30%Cr; 0.24%Mo y 0.2%Ni), with AWS E11018M filler metal and SMAW manual process, through relations generated between of microstructure, process variables, mechanical properties (tension, toughness impact Charpy V and microhardness); in addition was evaluated the susceptibility of the HIC through CTS (Controlled Thermal Severity) test and H plates on the weldments and the performance of service (ballistic performance), in different input heats, named: high and low. Has been established the incidence of the input heat on the properties and the service performance.

**Key Words:** Weldability, armor steel, controlled thermal severity test, H plate test, ferritic filler metal.

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2008

Fecha de aceptación: 9 de mayo de 2008

<sup>a</sup> Cotecmar. Departamento de Gerencia de Nuevas Construcciones.

<sup>b</sup> Grupo de Investigación en soldadura. Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.  
Autor corresponsal: icastilla@cotecmar.com

## Introducción

Los estudios de soldabilidad de materiales implican diversos y complejos ensayos, que buscan establecer relaciones entre la sanidad, la microestructura obtenida en las diferentes zonas de soldadura, las propiedades mecánicas de las mismas y su desempeño. El anterior aspecto incluye actividades como: evaluación de diversas propiedades, uso de algunas técnicas de caracterización de microestructuras a escala morfológica y composicional, tanto en los materiales involucrados antes de la elaboración de la junta, como de los depósitos obtenidos en las condiciones de soldeo; así como el control y ajuste de las variables de los procesos de soldadura involucrados, y finalmente la estimación cualitativa y cuantitativa a través de ensayos, cuando sea posible, del desempeño en servicio de la junta soldada. Todo esto apunta hacia la elaboración y/o mejoramiento de los procedimientos de aplicación de algunos tipos de soldaduras.

La introducción de procesos de manufactura y de control de mayor versatilidad (por ejemplo el proceso de conformación termomecánico controlado -TMCP-), ha permitido mejorar ostensiblemente aspectos como el crecimiento del grano, las propiedades mecánicas y los tratamientos térmicos en el mismo tren de laminación, haciendo posible la fabricación de aceros adecuados para aplicaciones como los blindajes. En esos casos, resulta una buena alternativa los aceros constituidos con adiciones menores a un total del 5% en peso de elementos de aleación, principalmente Mn, V, Mo, Cr, Ni, entre otros, con contenidos de carbono entre 0,25% y 0,30% en peso y con tratamientos térmicos de temple y revenido, luego del laminado en caliente, para producir estructuras martensíticas y bainíticas (Kou, 2003).

Para construir estructuras complejas, en las que se requiera la protección del personal y la reducción del peso, como las de los vehículos militares, es necesario, dependiendo de su complejidad, aplicar procesos de manufactura, conformación y unión, en los cuales se adicionan ciclos térmicos y por ende cambios microestructurales importantes que deben ser controlados con el fin de mantener la integridad

de las propiedades útiles de manera que el material cumpla con el objetivo para el que fue creado.

Diversas investigaciones dedicadas al estudio del problema de la soldabilidad de aceros microaleados han contribuido a aclarar algunos aspectos involucrados en las dificultades encontradas en estos materiales debido a la acción del ciclo térmico inherente a la soldadura aplicada a la fabricación de uniones, tales como el efecto de los diferentes elementos de aleación (Olson, Liu y Edwards, 1990), el desarrollo microestructural de las zonas de soldadura, (Akselsen, Grong, Ryum y Christensen, 1986), la predicción de propiedades en la zona afectada térmicamente (ZAT) y la soldabilidad con técnicas modernas (N. Yurioka, 1990). Otros estudios importantes ligados a la ZAT, en aceros microaleados (Andersen, Kluken y Grong, 1993), determinaron la aparición de una zona blanda dentro de esta, como producto de la incidencia del ciclo térmico. Esto último resulta de gran importancia en la aplicación de soldaduras en aceros para propósitos de protección, debido a la reducción del poder de respuesta a los impactos a alta velocidad en algunas zonas de las juntas soldadas, lo que aumenta el riesgo de falla durante el servicio (Madhusudhan y Mohandas, 1994).

También hace parte de la problemática de estos aceros, la adecuada selección de electrodos para su soldadura, lo cual ha sido discutido (Gangopadhyay y Das, 1989) con fundamento en la interrelación de variables de soldadura, el proceso, junta de fabricación y características del metal base, entre otros aspectos. Se ha hecho énfasis en el cuidado de aspectos relacionados con cada uno de los tipos de soldabilidad, tratándose los conceptos alrededor de los problemas de agrietamiento en frío (*HIC* o agrietamiento inducido por hidrógeno), y en caliente, los cuales forman parte del concepto de soldabilidad de fabricación.

En este documento la selección de electrodos está dirigida indiferentemente a los ferríticos o los de acero inoxidable. En el Cuadro 1 se muestra cada uno de los pasos incluidos en el proceso de aprobación, desde el punto de vista de los fenómenos de agrietamiento en soldaduras.

Los materiales de aporte ferrítico, con respecto a la soldadura de este tipo de aceros, resultan ser adecuados por ciertas características tales como:

- Altas resistencia y tenacidad del depósito de soldadura.
- Bajo costo. El precio del electrodo E11018M es 50% menor que el de los electrodos austeníticos y duplex (E307, E312 y E308Mo) que son recomendados para soldar este tipo de aceros.
- Compatibilidad de estructuras cristalinas en la línea de fusión que favorecen el crecimiento epitaxial.

A pesar de estas cualidades se deben tener en cuenta los riesgos inherentes al ingreso de hidrógeno atómico al depósito, que aumentan la posibilidad de agrietamiento en frío. La familia de electrodos EXXX18, de alta resistencia (Código *Asme*), con bajo y extrabajo hidrógeno, representan a tales tipos de electrodos con este riesgo, por lo cual se extrema el cuidado y manipulación de los mismos para optimizar una correcta aplicación.

Cuadro 1. Pasos propuestos para la selección de electrodos para soldar aceros para blindajes<sup>1/</sup>

1	Determinación de la susceptibilidad de las juntas soldadas a la formación de grietas en frío
2	Determinación de la resistencia de las juntas soldadas a la formación de grietas en caliente
3	Determinación de las propiedades de resistencia a la tracción y doblaje de las juntas
4	Determinación de la microestructura del depósito de soldadura
5	Determinación de la composición química del depósito de soldadura
6	Determinación de las propiedades mecánicas del depósito de soldadura
7	Ensayos de desempeño balístico

<sup>1/</sup> Madhusudhan Reddy G. y Mohandas T. (1994)

El fenómeno de reducción de dureza de la ZAT, y su importancia para el desempeño en servicio de los blindajes, relacionan la problemática de los efectos del aporte calórico (entrada de energía) y las transformaciones microestructurales en las

zonas de soldadura con el proceso de soldadura y sus efectos sobre el desempeño en servicio (Madhusudhan, Mohandas y Papukutty, 1998). Algunos estudios llegan a evidenciar que el proceso de soldadura manual al arco con electrodo revestido –*Smaw*– puede llegar a ser el que menos afecte las propiedades balísticas en la soldadura de aceros microaleados creados para tal fin, a causa de sus bajas entradas de energía relativas a otros procesos de soldadura.

Con este artículo se pretende identificar la soldabilidad dentro de las condiciones planteadas (diseño de junta, material de aporte y de base) mediante pruebas de resistencia al agrietamiento en frío utilizadas para los materiales de alta susceptibilidad. Asimismo se analizarán los resultados de pruebas en servicio, principalmente balísticas, las cuales se describen y se exponen sus resultados a continuación.

## Materiales y equipos

El material base usado en este trabajo pertenece a la clasificación MIL A46100, que son aceros del tipo placas de alta dureza (*Hi-Hard plate*), fabricados por el proceso TMCP, templados @900°C y revenidos @200°C enfriados al aire, suministrado en forma de láminas con un espesor de 4,5mm. Su composición química se muestra en el Cuadro 2 y algunas propiedades pueden verse en el Cuadro 3. La lámina presenta propiedades homogéneas en todo su espesor. El Gráfico 1 muestra una micrografía que exhibe la estructura típica del material.

Cuadro 2. Composición química del metal base

C	0,284	Mo	0,243	P	0,01	Sn	0,008
Si	0,534	Al	0,02	Ni	0,192	Ti	0,031
Mn	0,899	Cu	0,177	Cr	0,3	V	0,007
S	0,002	Pb	0,005	Sb	0,001	Fe	Balance

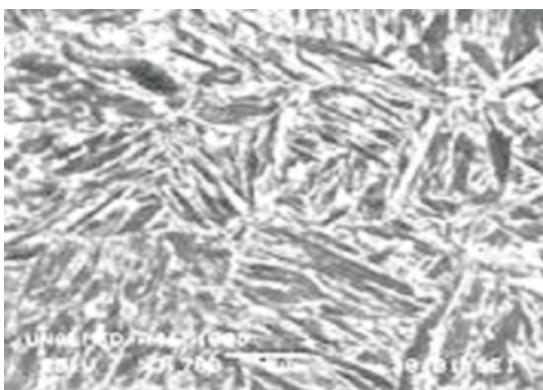
El metal de aporte usado fueron electrodos del tipo AWS E11018M de 2,4mm (Ø3/32") de diámetro y 300mm (12") de longitud, fabricados por West Arco. La microestructura del depósito sin dilución

de este material es esencialmente ferrita (>95%) con algo de carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C) (Vercesi y Surian, 1996). Su composición química puede verse en el cuadro 4.

Cuadro 3. Propiedades y características del metal base

Dureza superficial = 523 VHN/500grf/30s
Temperatura Eutectoide = 732°C
Temperatura Austenización = 835°C
Tamaño de grano previo = ASTM 7-8
Impacto Charpy V @ -40°C = 23 - 31J
Resistencia máxima a la tracción = 1700 MPa
Elongación = 9% Reducción Área = 25% CE = 0.6

Gráfico 1. Estructura martensítica <sup>1/</sup>



<sup>1/</sup> En paquetes de listones de la estructura del metal de base. SEM 3700X, modo SEI

Cuadro 4. Composición química del metal de aporte

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
0,05	1,64	0,02	0,01	0,46
<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Fe</b>
2,23	0,36	0,37	0,02	Balance

El depósito del electrodo sin dilución tiene una dureza promedio de 223VHN/500grf/30s, una resistencia al impacto Charpy V de 70,6J@-51° C y una resistencia máxima a la tracción de 880MPa (elongación del 20%), propia de los depósitos de este tipo de electrodo con bajo contenido de carbono (Surian y De Vedia, 1999).

El proceso de soldadura fue el de arco eléctrico con electrodo revestido, con una fuente de potencia DC multiprocesos de 400A máximo, marca Lincoln Electric Incorporated.

Para la soldadura de las probetas y los cupones necesarios fueron usadas dos entradas de energía denominadas como alta y baja, obtenidas con las variables de soldadura que se muestran en el Cuadro 5. Cada una de las entradas pretende simular las condiciones de energía presentes para una amplia gama de posiciones en fabricación, que incluyen, en la de baja, posiciones plana y horizontal y en la de alta las posiciones vertical y sobrecabeza.

## Método experimental

El método seguido para evaluar la soldabilidad del material de base con el electrodo E11018M, consistió en los siguientes pasos: i) elaboración de probetas en platinas a tope con las diferentes entradas de energía (alta y baja) para determinar sus características metalúrgicas y propiedades mecánicas; ii) elaboración de probetas en filetes con el ensayo de severidad térmica controlada (CTS) y evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento en frío (HIC) con baja restricción y el desempeño de zonas de soldadura, y iii) elaboración de placas H para susceptibilidad al agrietamiento con alta restricción y evaluación del desempeño balístico.

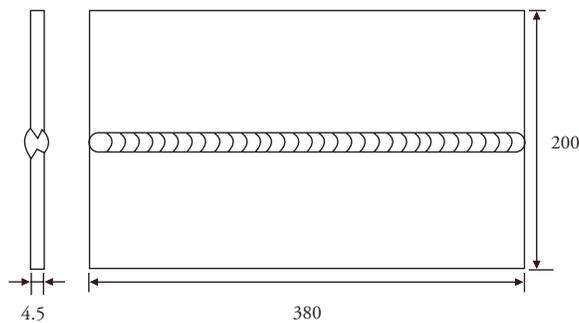
Cuadro 5. Variables usadas para generar las entradas de calor alta y baja

Cupón	Pos.	Pasada	Amp. (A)	Volt. (V)	Vel (mm/s)	Entrada de Energía (J/mm)
Baja	Plano	Inicial	84,0	21,0	2.8	626
		Respaldo	83,3	21,5	2.2	814
Alta	Vertical ascedt.	Inicial	63,6	21,0	1.5	890
		Respaldo	62,5	20,0	1.3	962

### Soldaduras en platinas a tope

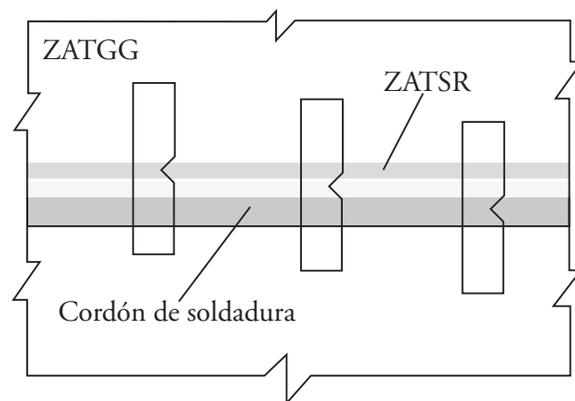
A partir de platinas del material base con dimensiones de 380x100x4,5mm, se elaboraron cupones de soldadura como los que se muestran en el Gráfico 2, usando dos pases de soldadura (inicio y respaldo) y una junta cuadrada de 1,5mm de apertura. Se elaboraron cupones diferentes con cada una de las condiciones de soldadura establecidas para las entradas de calor alta y baja, respectivamente.

Gráfico 2. Esquema del cupón de platinas a tope



A partir de estas platinas se extrajeron probetas para evaluar las propiedades mecánicas de: tracción en la junta de soldadura, impacto Charpy V, y barridos de microdurezas Vickers. Esta última también se aprovechó para realizar observación metalográfica; la microscopía óptica de luz reflejada (Molr) en un microscopio marca Olympus DM300 y la de barrido electrónico (SEM) en un Jeol LM3000. La ubicación de las probetas de impacto, con respecto al cordón de soldadura se muestra en el Gráfico 3, obsérvese que las entallas de estas probetas se ubican

Gráfico 3. Detalle de la ubicación de las probetas de impacto con respecto al cordón de soldadura en el cupón (Gráfico 2)

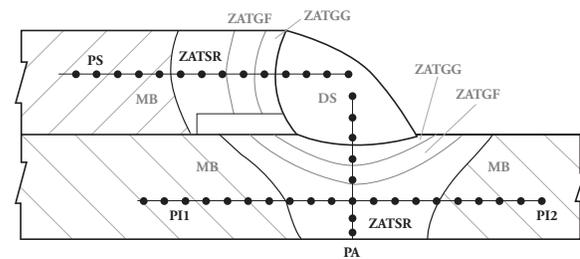


en diferentes zonas de la unión de soldadura (ZAT y cordón de soldadura). Cada zona fue situada a partir de la ubicación proporcionada por las durezas y la observación metalográfica.

### Soldadura en filete y ensayo CTS

Usando el procedimiento y la probeta propuesta para el ensayo de severidad térmica controlada (CTS), de la norma AWS B4.0-98 (1997), se elaboraron soldaduras a filete de restricción moderada, de las cuales se extrajeron probetas que fueron examinadas de dos formas: en la primera, se llevaron a cabo los pasos que exige la norma B4.0 para obtener los resultados de soldabilidad de fabricación que este ensayo permite, y en la otra, se estudiaron los perfiles de microdurezas con sus respectivas microestructuras en las zonas de soldadura, tal como lo muestra el esquema del Gráfico 4. En el primer caso, la evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento HIC, se hizo basada en la presencia de grietas en la ZAT o en el cordón de soldadura. A partir del esquema del Gráfico 4, es evidente la relación que se obtiene entre la ubicación de las zonas y las respectivas lecturas de dureza en ellas.

Gráfico 4. Detalle de los barridos de microdurezas Vickers 500grf/30s, en el ensayo CTS

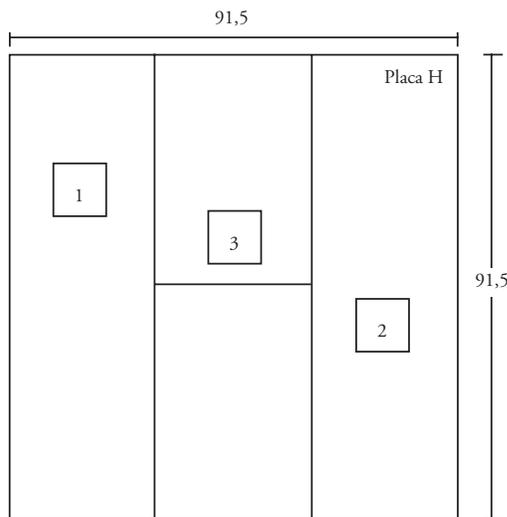


### Ensayos con placas H

Fue llevado a cabo el ensayo de soldabilidad estandarizado MIL STD 1941, denominado placas H, el cual consiste en soldar cuatro placas con cordones de soldadura formando una H con las condiciones de soldadura de interés, dejando la horizontal con una alta restricción por ser la última en hacerse. Este ensayo resulta ser de doble vía; por un lado, ofrece la oportunidad de evaluar la soldabilidad de fabricación, ya que brinda la posibilidad de realizar soldaduras con alta restricción por su configuración. Por otro, da la posibilidad de evaluar en las mismas

soldaduras altamente restringidas, su respuesta, al practicarle impactos balísticos en zonas seleccionadas para saber la respuesta de la junta fabricada según una secuencia de soldadura elegida; cuando el impacto atraviesa completamente o produce grietas en la zona estudiada la prueba es negativa. En el Gráfico 5, puede verse el esquema general de una placa H.

Gráfico 5. Esquema de la placa H y sus dimensiones



Luego de soldar la placa H con el proceso y las variables seleccionados, se procede a una inspección, visual y radiográfica, por medio de ensayos no destructivos (END), en busca de grietas y defectos. Si el cupón pasa las inspecciones, entonces es sometida a la prueba de impacto balístico para evaluar la respuesta de cada una de las zonas de soldadura a los proyectiles (Ade, 1991).

Dependiendo del tipo de acero que se encuentra en evaluación y los estándares del blindaje, se seleccionan los parámetros para la evaluación balística.

## Resultados y discusión

### Propiedades mecánicas de las juntas soldadas

Los resultados de los ensayos de tracción se presentan en el Cuadro 6. Todas las soldaduras exhibieron valores de tracción más bajos que los del metal base y fueron superiores a los del metal de aporte sin dilución. Los valores de tracción obtenidos fueron similares para ambas entradas de calor, la forma de fractura se ubicó en la mayoría de los casos en el metal de soldadura.

Cuadro 6. Valores de tracción de las juntas de soldadura<sup>1/</sup>

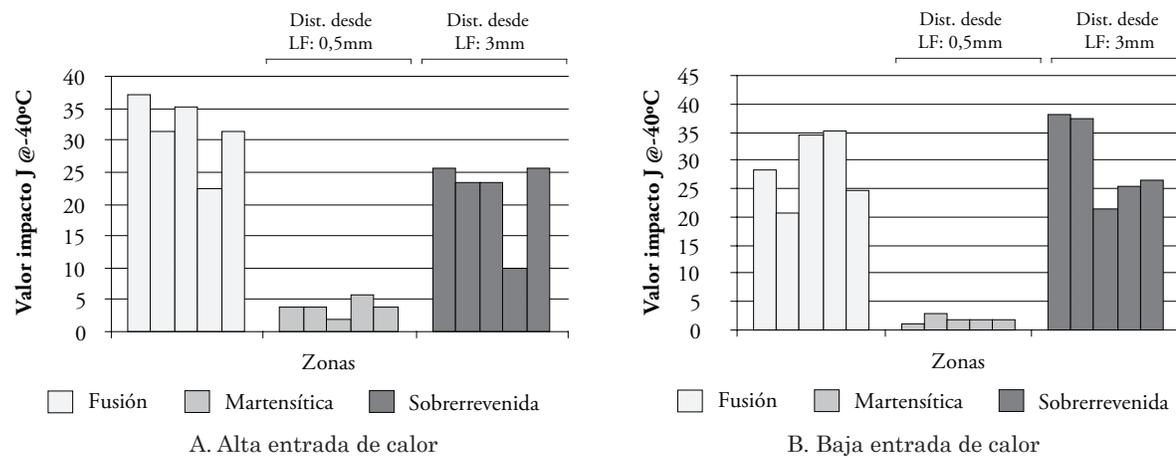
Entrada de calor (J/mm)	Área inicial (mm <sup>2</sup> )		Carga máxima (kgf)		Resistencia última [MPa]		Observaciones sobre localización y apariencia de fractura
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 1	Probeta 2	
Baja	100,8	102,0	10600	10800	1030,6	1037,6	Fractura normal con bordes agudos.
Alta	102,0	100,4	11300	10700	1085,7	1044,4	La probeta 1 se fracturó en forma normal y la probeta 2 se fracturó por la ZAT.

<sup>1/</sup> Obtenidas con las condiciones de soldadura para entrada de energía alta y baja. Máquina de tracción universal Monsanto 100 de 10 Ton de capacidad – Probetas planas de ¼ de reducción en cuello.

En el Gráfico 6 se muestran los resultados del ensayo de impacto para cada una de las regiones de soldadura en las probetas de platinas a tope. Las tres zonas en donde se realizaron los ensayos presentan tolerancia al impacto Charpy V muy marcados y diferentes: la zona martensítica exhibe los valores de impacto más pequeños, mientras la

zona sobrerrevenida presenta el mejor desempeño, y finalmente la zona fundida mostró valores de impacto un poco más bajos que la sobrerrevenida y resultados muy parecidos a los valores alcanzados en ensayos de impacto realizados al material base MIL A 46100 (23-31J).

Gráfico 6. Energía (J) de impacto absorbida en las diferentes zonas de soldadura



Los barridos de microdureza practicados en las probetas de observación metalográfica, según el esquema del Gráfico 7, se muestran en el Gráfico 8 para los cupones a tope, y en el Gráfico 9 para las probetas de CTS. Estos evidencian de la existencia las distintas zonas, y revelan un desempeño definido donde se muestra, después de la zona de fusión, aumento drástico de la dureza, incluso por encima del valor de dureza del metal base sin ser afectado por un ciclo térmico de soldadura. Esta zona corresponde a la denominada zona de grano grueso

(ZATGG), luego se exhibe un pequeño descenso de la dureza en la zona de grano fino (ZATGF), para proceder a una caída súbita en la zona afectada térmicamente sobrerrevenida (ZATSR), en donde se observa una disminución crítica de las propiedades del material base. Nótese que los gráficos 8(A) y 8(B) muestran que la recuperación de la dureza para los probetas a tope se presentan entre los 14 y 16mm, sin importar la entrada de energía, al igual que en las probetas CTS las cuales presentan un ancho de la ZAT de 8 a 11mm (Gráfico 9).

Gráfico 7. Esquema del barrido de microdurezas Vickers en las probetas de observación metalográfica

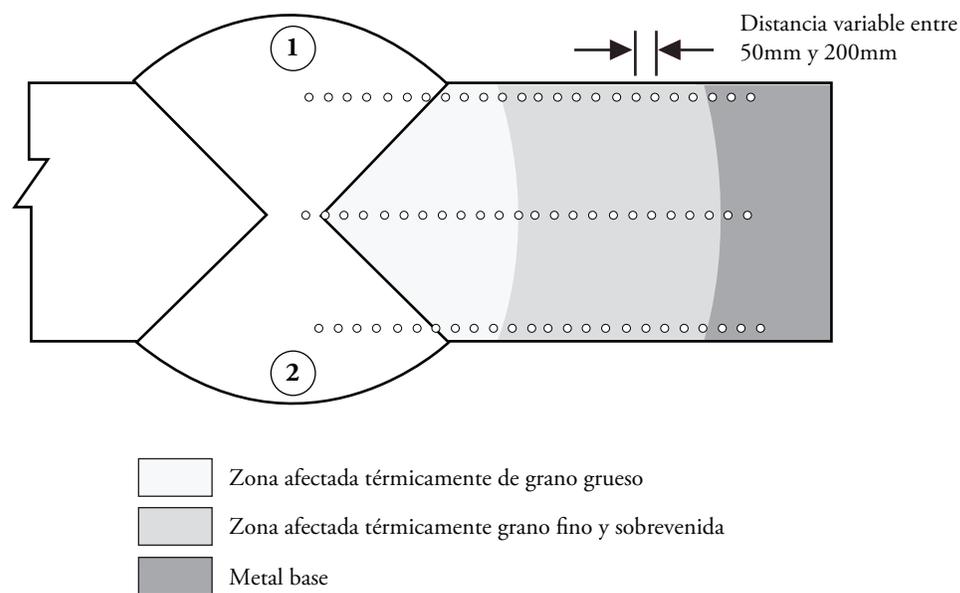
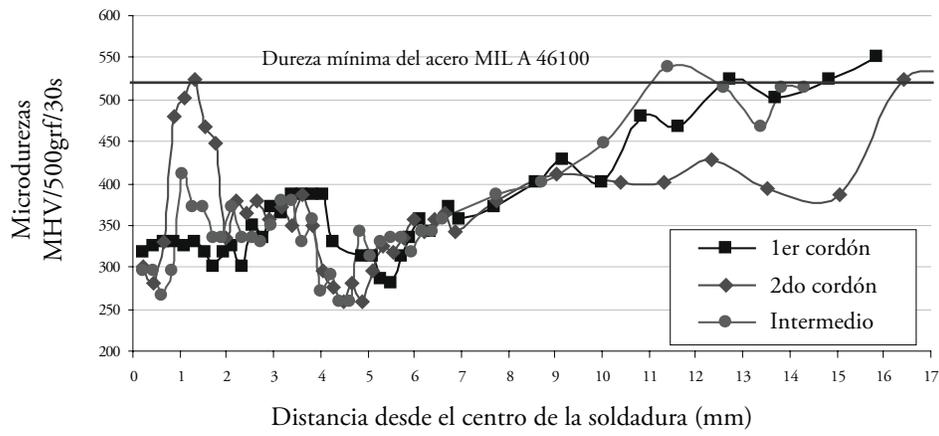
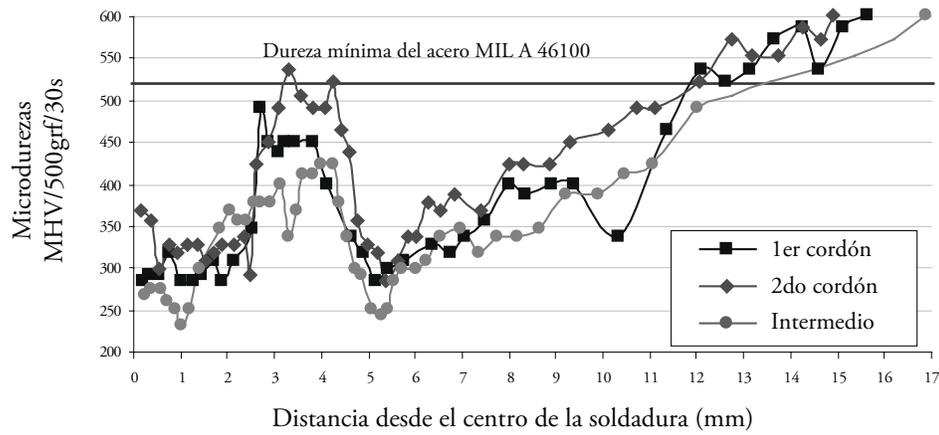


Gráfico 8. Barridos de microdurezas en las probetas a tope

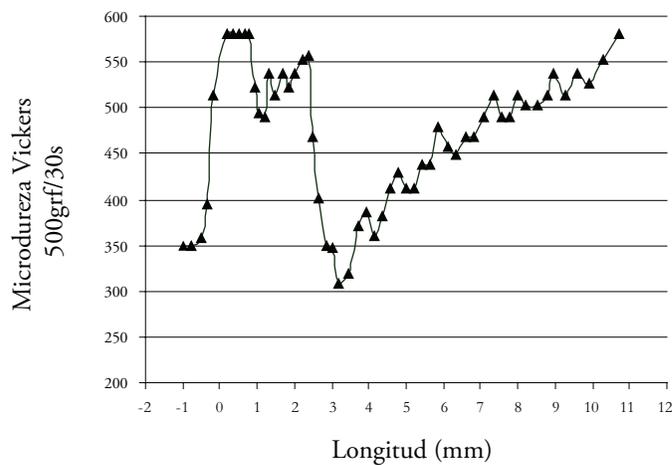


A. Alta entrada de energía

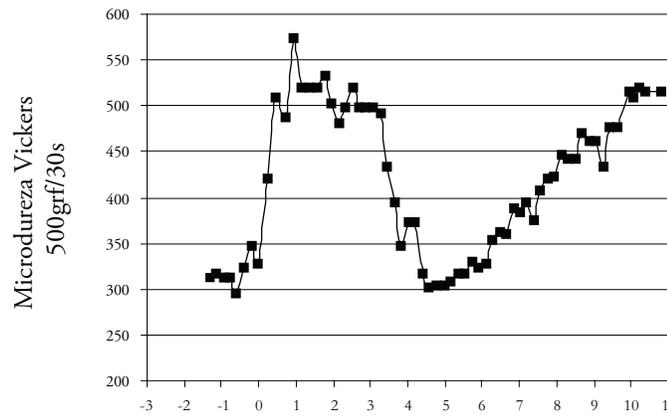


B. Baja entrada de energía

Gráfico 9. Barridos de microdurezas en las probetas CTS

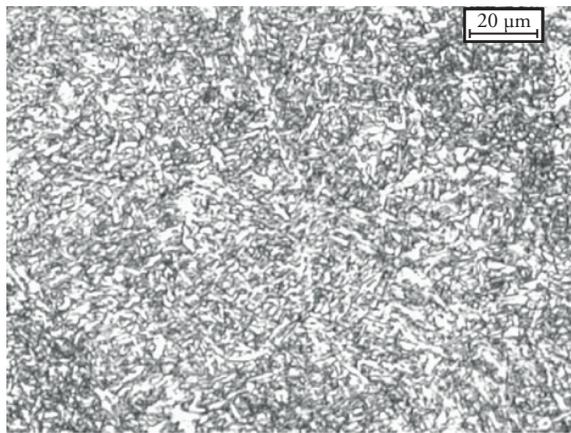


A. Alta entrada de energía



B. Baja entrada de energía

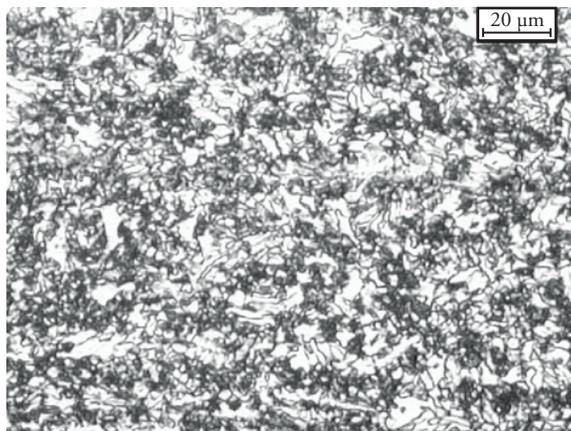
Gráfico 10. Microestructuras de las diferentes zonas de soldaduras obtenidas en las probetas a tope



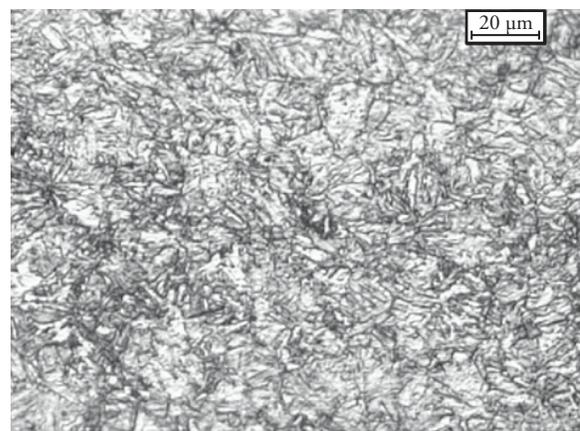
A. Zona de fusión



B. ZATGG



C. ZATSR



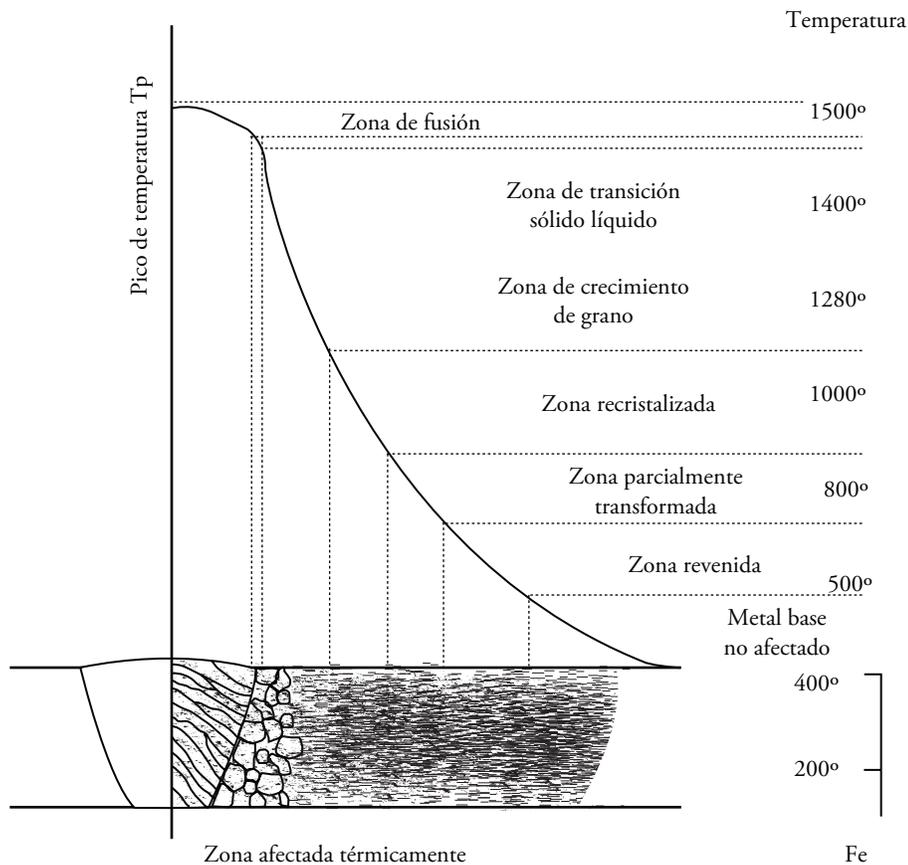
D. Zona afectada térmicamente sobrevenida de recuperación de dureza

### Microestructuras de las zonas de soldadura

Las microestructuras obtenidas en las diferentes zonas de soldadura en las probetas a tope se muestran en el Gráfico 10. La zona de fusión es primordialmente ferrita con algo de carburo de hierro ( $Fe_3C$  o cementita), debido a la dilución en la zona de fusión, la cual está entre el 40 y el 60% por el diseño de la junta usada (Gráfico 10(A)). La zona de grano grueso térmicamente afectada, corresponde a paquetes de listones de martensita no revenida de tamaño mayor al del metal base (Gráfico 10(B)). Esta estructura es típica de picos de temperatura altos ( $1300^{\circ}C$  o más donde se disuelven carburos de V, Nb y Ti, responsables de mantener el tamaño de grano fino) con enfriamientos muy rápidos.

En la ZAT sobrerrevenida (ZATSR) mostrada en el Gráfico 10(C), se puede advertir que hay descomposición de la martensita en fases más estables como ferrita y cementita a causa de las temperaturas pico alcanzadas en esta zona por el ciclo térmico experimentado, que incluye velocidades de enfriamiento más lentas que las de las zonas cercanas al cordón de soldadura. El Gráfico 11, muestra la relación de las transformaciones microestructurales de la zona afectada térmicamente con los picos de temperatura alcanzados en la misma, por la acción del proceso de soldadura. Nótese la correspondencia entre las zonas encontradas en la exploración metalográfica y las transformaciones exhibidas en este gráfico.

Gráfico 11. Transformaciones microestructurales en la ZAT de un acero debido a los picos de temperatura



### Susceptibilidad al agrietamiento en frío

Los ensayos realizados para establecer la susceptibilidad al agrietamiento en frío en este tipo de juntas, el ensayo CTS y el de la placa H, mostraron

que en ninguno de los casos de entrada de calor evaluados se presentaron grietas, ni en el depósito ni en la ZAT, a pesar de que estaban presentes algunas condiciones como: microestructura suscep-

tible (presencia de la martensita), restricciones en el cordón de soldadura y un carbono equivalente mayor al 0,6.

En ambos casos, los electrodos E11018M fueron tratados de manera adecuada: empaques bien sellados y cuidados y almacenamiento en hornos portátiles a 100°C antes de usarse, por lo cual se puede pensar que los niveles de humedad absorbidos por el revestimiento y las otras fuentes de hidrógeno no son tan considerables para generar una concentración suficiente de este para darse HIC.

#### Desempeño en servicio de las juntas

Con munición de 7.62mm, una velocidad inicial de 760m/s en el proyectil y condiciones establecidas según el estándar NIJ0108.01, se midieron las respuestas de las zonas de soldadura en las placas H a los impactos balísticos. Los resultados de las características de los impactos se muestran en el

Cuadro 7. Todos los datos fueron recopilados según lo establecido en el estándar de procedimientos de operaciones 2-2-711(TOP, 1994).

Puede observarse en el Cuadro 7, que solo las zonas ubicadas a 37 y 39 mm de la línea de fusión no resultaron atravesadas (no pasantes) por los proyectiles; estas corresponden a la ubicación, enteramente en zonas de alta dureza y resistencia, pero de mediana absorción de energía al impacto (MB) y al final de una de baja dureza y alta absorción de energía al impacto (ZATSR). Las demás zonas resultaron pasantes y en el metal base no afectado se conservaron las características de blindaje. La zona del cordón de soldadura, a pesar de la dilución presente, tiene durezas muy por debajo de las del metal base, ofreciendo una pobre tolerancia balística, en tanto que la zona adyacente al cordón, que toma gran parte de la ZATGG, también presenta un pobre desempeño balístico.

Cuadro 7. Resultados de las pruebas de impacto balístico en las placas H en distintas zonas de soldadura

N.º Impacto	Distancia desde el borde del cordón (mms)	Tipo de impacto	Observaciones del impacto en la placa H
1	5 mm	Pasante	Deformación plástica
2	15 mm	Pasante	Deformación plástica
3	5 mm	Pasante	Deformación plástica
4	39 mm	No pasante	Abolladura
5	Centro del cordón	Pasante	Limpio sin deformación
6	37 mm	No pasante	Deformación con descascaramiento en el cráter

Las respuestas a la penetración y choques de los impactos balísticos en las diferentes zonas de soldadura, evaluados en el Cuadro 7 no representan resultados sorprendidos. La resistencia a los impactos balísticos es una característica que los aceros pueden alcanzar a través de una combinación de resistencia a la tracción, buena energía de absorción al impacto y dureza (Mohandas, Madhusudhan y Satish Kumar, 1999), tal como las propiedades que

exhibe el MIL A46100. Las alteraciones microestructurales debidas al ciclo térmico de la soldadura en la ZAT, modifican de acuerdo con la intensidad de los picos estas características, a pesar de que el proceso *Smau* en combinación con algunas características de enfriamiento en las juntas soldadas con bajas entradas de energía, puede llegar a convertirlo en el proceso de soldadura que menos modifique el desempeño balístico de los

Cuadro 8. Tolerancia al servicio de cada zona de soldadura con las condiciones usadas frente a propiedades mecánicas de cada una de ellas y sus características microestructurales

Entrada de energía (J/mm)	Zona de soldadura	Microestructura	Dureza Vickers 500grf/30s	Impacto Charpy V @-40°C	Longitud (mm)	Desempeño balístico
720 (Baja)	Cordón	$\delta$ + Fe <sub>3</sub> C + Bainita	260-320	31,6	0	Pobre
	ZATGG	Martensita no revenida	420-530	3,9	1 a 2	Pobre
	ZATSR	$\delta$ + Fe <sub>3</sub> C (Globular)	250-490	21,6	9 a 11	Intermedio
926 (Alta)	Cordón	$\delta$ + Fe <sub>3</sub> C + Bainita	260-360	28,6	0	Pobre
	ZATGG	Martensita no revenida + Bainita	400-480	2,0	1 a 2	Pobre
	ZATSR	$\delta$ + Fe <sub>3</sub> C (Globular)	250-490	29,8	10 a 11	Intermedio

aceros para blindajes (Madhusudhan, Mohandas y Papukutty, 1998).

Si se contrastan los datos del desempeño balístico del Cuadro 7 con las propiedades obtenidas en las diferentes zonas de soldadura se observarán las relaciones entre las propiedades y el desempeño balístico, lo cual se muestra en el Cuadro 8. A partir del Cuadro 8 se puede inferir que a pesar de que el desempeño balístico de las zonas de soldadura se ve afectado por la entrada de calor, al reducir sus propiedades mecánicas, modificar la microestructura presente en el metal base y desmejorar el desempeño balístico, no hay diferencias significativas en ambos casos.

Al probarse la tolerancia balística del metal base por medio de la placa H en una zona no afectada, se promovió el desnarigamiento del proyectil, la resistencia del mismo a la penetración con respuesta de abolladura en su superficie con algo de deformación plástica, y el rebote con un ángulo igual al de impacto. Entre tanto, en las otras zonas puede explicarse el desempeño a partir de lo que ella misma en propiedades y constitución estructural tenga, por ejemplo, puede verse en el Cuadro 8, que la ZATGG a pesar de tener una dureza relativamente alta en comparación a otras zonas, y el pequeño valor de la energía absorbida al impacto, podría presentar buena resistencia a la penetración solo por los valores de dureza exhibidos, pero su estrecha longitud sumada a la contigüidad de unos alrededores con propiedades menores, hacen que su desempeño balístico sea pobre y se produzca el

desprendimiento no solo de la zona, sino también de fragmentos de las zonas aledañas, fallando por no tener una adecuada región alrededor para propagar la energía absorbida. De manera similar en el cordón de soldadura, la baja dureza a pesar de una alta absorción de energía por medio del impacto, redundó en el traspaso del proyectil limpio. La zona ZATSR, presenta un desempeño intermedio, explicable porque sus alrededores son bastante resistentes para propagar los altos impactos por su gran dureza y resistencia (ZATGG y metal base), y ella misma tiene una buena respuesta al impacto, similar y en algunos casos superior al del metal base.

Resultados similares han sido encontrados en otros estudios (Madhusudhan y Mohandas, 1994), los cuales sugieren que las entradas de calor pueden reducirse, con el ánimo de menguar el tamaño de la ZAT que es función del aporte calórico introducido, dirección en la cual deben apuntarse otras investigaciones, así como la modificación de la geometría de la junta de soldadura, que define los contornos térmicos y las líneas de isotransformación responsables de la geometría y dimensiones de la ZAT en la junta soldada (Andersen, Klucken y Grong, 1993).

## Conclusiones y recomendaciones

1. El ciclo térmico inherente a la soldadura modifica las propiedades y características de los aceros para blindajes en la norma MIL A

- 46100 con los diseños de junta estudiados en esta investigación, reduciendo drásticamente su desempeño balístico en las zonas afectadas.
2. La soldabilidad en las condiciones evaluadas en este trabajo, especialmente la susceptibilidad en el agrietamiento en frío, exhibieron un desempeño aceptable en las juntas de soldadura realizadas con el acero MIL A46100 y el electrodo AWS E11018M. Sin embargo, deben ser evaluadas entradas de calor más bajas y otras configuraciones de juntas para mejorar la distribución y forma de la ZAT.
  3. La manipulación y manejo de electrodos de alta resistencia y bajo hidrógeno, es crucial para la obtención de una buena soldabilidad en aceros de alta resistencia y microestructura susceptible.

## Referencias

- Ade. F. (1991, September), *Ballistic qualification of armor steel weldments*. Welding journal. pp. 53-58.
- Akselsen, O. M. Ø. Grong, N. Ryum and N. Christensen. (1986, September), *HAZ grain growth mechanisms in welding of low carbon microalloyed steels*. *Acta Metallurgica*, vol. 34, Issue 9, pp. 1807-1815.
- Andersen, I.; A. O. Kluken and Ø. Grong (1993, November), *The origin of microstructure and hardness gradients within As-deposited steel weld metals*. Welding Journal, pp. 63-68.
- ANSI/AWS B4.0-98: "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds" (1997, December), American Welding Society, pp. 62-64.
- Ballistic testing of armor weldments. Test Operations Procedure (TOP) 2-2-711. WU A268445. January 1994.
- Código ASME IX, Sección II parte C: Electrodos y materiales de aporte. Norma AWS A5.5-81.
- David L. Olson; Stephen Liu & Glen R. Edwards. *Role of solidification on HSLA steel weld metal chemistry*. *Proceedings of HSLA weldments*. 1990.
- Gangopadhyay, K. and P. K. Das. (1989, April) *Selection of electrodes for welding of armor plates and procedure for approval*. Indian welding Journal, pp. 483-487.
- Losz, J. M. and K.D. Challenger. HAZ Microstructures in HSLA steel Weldments.
- Madhusudhan Reddy G. and Mohandas T. *Ballistic performance of high strength low-alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 57 (1994), pp. 23-30.
- Madhusudhan Reddy G., Mohandas T. and K. K. Papukutty. *Effect of welding process on the ballistic performance of high strength low alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 74 (1998), pp. 27-35.
- Madhusudhan Reddy G. & Mohandas T. *Ballistic performance of high strength low-alloy steel weldments*. Journal of materials processing technology 57 (1994), pp. 23-30.
- MIL STD 1941 "Ballistic Qualification of armor steel welding".
- Mohandas T., Madhusudhan Reddy G. and B. Satish Kumar. (1999) *Heat-affected zone softening in high strength low-alloy steels*. Journal of materials processing technology 88, pp. 284-294.
- N. Yurioka. *Weldability of modern high strength steels*. First United States-Japan Symposium on Advances in welding metallurgy. Junio 1990, pp. 51-64.
- Sindo Kou. (2003) *Welding Metallurgy* 2<sup>nd</sup> edition, Cap. 17 pp. 405-407.
- Surian E. S. y L. A. de Vedia. *All-Weld-Metal Design for AWS E10018M, E11018M and E12018M Type Electrodes*. Welding Journal. 217-s-228-s Junio 1999.

Standard NIJ 0108.01: Ballistic Resistant Protective materials. U.S. Department of Justice. National Institute of Justice.

Vercesi, Jose& Estela S. Surian. *The effect of welding parameters on high strength SMAW All-weld metal Part 1: AWS E11018M*. Welding Journal. June 1996. 191s-196s.

# Avances en la estimación de la resistencia de catamaranes

Marcos Salas<sup>a</sup>  
Prasanta K. Sahoo<sup>b</sup>  
Richard Luco<sup>a</sup>

## Resumen

Los cascos tipo catamarán han sido usados desde tiempos remotos, sin embargo, casi siempre han estado restringidos a embarcaciones menores. Recientemente se ha constatado un crecimiento masivo de este tipo de embarcaciones en la industria de ferris, naves deportivas y de placer. El uso de materiales compuestos y de aluminio, sumado a mayor potencia, han permitido que los rangos de operación se desarrollen en velocidades altas. Uno de los desafíos que deben enfrentar los arquitectos navales que proyectan estas naves, es estimar con suficiente exactitud la resistencia de los cascos al avance, una tarea para nada trivial pues hasta hoy subsiste un cierto grado de incertidumbre, particularmente debido a la interacción que es posible constatar entre ellos.

En el presente trabajo se muestran los progresos en los métodos de evaluación de la resistencia al avance en embarcaciones multicasco, particularmente la de un catamarán, obtenida por dinámica de fluidos computacional –CFD–, y por ensayo en canal de pruebas hidrodinámicas realizado por la Universidad Austral de Chile. Además, se presenta un método basado en ecuaciones de regresiones para el cálculo del coeficiente de resistencia de olas de catamaranes con cascos redondos en un régimen de velocidad de semidesplazamiento.

**Palabras clave:** Catamarán, resistencia al avance, CFD.

## Abstract

The catamaran type hulls have been used since remote times; however, they have almost always been restricted to minor ships. A massive growth of these kinds of vessels has been noted recently in the ferry industry, for sporting vessels and pleasure. The use of compound materials and of aluminum, added to greater power, has allowed that the ranges of operations are developed at high speeds. One of the challenges which naval architects who project these vessels must face, is to estimate with enough precision, the hull resistance to drag, a task which is not trivial at all because until today, a certain degree of uncertainty remains, particularly due to the interaction that is possible to notice between them.

In the present study, the progresses in the methods of evaluation of the drag in multi-hull ships, particularly that of a catamarans, obtained by computational fluids dynamics –CFD–, and through tests in a hydrodynamic testing canal carried out by the Universidad Austral of Chile. Besides, a method based on equations of regressions is presented for the calculation of the drag coefficient of waves for catamarans with round hulls in a regime of semidisplacement speed.

**Key Words:** Catamaran, resistance, CFD.

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2008  
Fecha de aceptación: 11 de abril de 2008

<sup>a</sup> Universidad Austral de Chile. Departamento de Ingeniería Naval.  
<sup>b</sup> Australian Maritime College.  
Autor correspondiente: msalas@uach.cl

## Introducción

Los catamaranes se usan crecientemente en la flota mundial de ferris; las características inherentes a este tipo de casco, gran área de cubierta y estabilidad de formas, han sido explotadas con ventaja en diseños avanzados. Lo anterior pone en evidencia la necesidad de contar con métodos eficientes de estimación de su resistencia al avance, la cual, como se sabe, tiene dos componentes principales: resistencia viscosa y generación de olas. El primero puede ser calculado con bastante exactitud con el método dado por la *ITTC –International Towing Tank Conference–* de 1957, usando un factor de forma apropiado, mientras el segundo, la resistencia por generación de olas, permanece como un desafío para los investigadores, particularmente al considerar el problema de interacción de los trenes de olas generados por ambos cascos. Se entiende que son necesarias diferentes fórmulas para distintas configuraciones de cascos, por lo que no es posible generalizar el problema.

Las ecuaciones de tipo matemático que gobiernan el movimiento de un fluido alrededor de una embarcación son conocidas desde el siglo XIX, aunque las que rigen el fenómeno en aquellos casos que tienen un interés práctico no pueden ser abordadas de una forma analítica. Sin embargo, y pese a que ya en ese tiempo aparecen las primeras referencias sobre el cálculo aproximado de la resistencia por formación de olas en buques, este problema sigue desafiando a matemáticos e hidrodinámicos.

Recientemente, gracias al desarrollo de códigos *CFD*, las ecuaciones del problema pueden resolverse de forma aproximada por algoritmos numéricos, proporcionando información sobre los movimientos y las sollicitaciones sobre la embarcación, en las diferentes etapas de diseño.

Actualmente los métodos de elementos de contorno o de singularidades son la base de la mayoría de los algoritmos numéricos para la predicción del mapa de olas de buques que avanzan con velocidad uniforme. Estos esquemas numéricos pueden clasificarse en dos categorías, dependiendo de la elección de la singularidad utilizada en la superficie

libre, base del método. La primera clase de esquemas usa fuentes de Kelvin como singularidad elemental. La ventaja de estos métodos es que el campo de velocidades generado satisface la condición de superficie libre de Kelvin, eliminando así la integración sobre ella (que no está panelizada) y que la condición de radiación se satisface de manera natural. Estos esquemas tienen en contra la imposibilidad de incluir efectos no lineales en la formación de las olas.

La segunda clase usa fuentes de Rankine, distribuidas sobre la superficie libre, como singularidad elemental. El más conocido de estos esquemas fue presentado originalmente por Dawson y está basado en el método de Hess y Smith para la resolución del flujo alrededor de un cuerpo sumergido, usando una distribución de fuentes sobre los paneles que discretizan el casco. Este método ha sido y es ampliamente aplicado para la predicción de la resistencia por formación de olas. Códigos tan conocidos como *Dawson, Rapid, Splash* o *Shipflow* pertenecen a este tipo. Frente a su sencillez y robustez, estos métodos tienen el gran inconveniente de la importante dependencia de la solución de parámetros como el tamaño del dominio y de la discretización.

La dinámica de fluidos computacional es utilizada crecientemente como medio de cálculo de la resistencia al avance. En este trabajo se ha recurrido a los códigos *Shyne* y *Shipflow*, disponibles en el ámbito naval; el primero se usó para calcular la resistencia de un catamarán menor y compararlo con ensayos experimentales, el segundo se utilizó para obtener resultados de resistencia por formación de olas de distintas configuraciones de cascos, y sobre la base de estos resultados generar regresiones que puedan representarse como ecuaciones para el cálculo de la resistencia a las olas de cascos de formas típicas.

## Comparación de *CFD* y métodos experimentales

Se han registrado rápidos avances en el cálculo teórico de la resistencia de olas mediante códigos *CFD*. En esta sección se muestra como ejemplo la comparación del resultados de resistencia al avance de un catamarán, obtenida mediante el código

*Shyne* y experimentos con un modelo a escala realizado en el canal de pruebas hidrodinámicas de la Universidad Austral de Chile.

La nave en estudio corresponde a un multicasco construido en materiales compuestos por Astilleros Alwoplast Ltda. (Chile).

Las características principales de la embarcación se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características del catamarán

Esloza total	16,76 m
Manga máxima	6,0 m
Puntal de diseño	2,4 m
Calado	0,8 m
Desplazamiento	19 ton

El código *CFD Shyne* fue desarrollado utilizando técnicas de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, que son las que gobiernan el movimiento del fluido alrededor de un cuerpo. El fundamento teórico del código, es presentado de forma general por García et al. (2002).

En los últimos años la aparición de esquemas numéricos para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, ha permitido un enfoque más realista del problema de predicción de la resistencia por formación de olas. Los esquemas numéricos para la resolución de estas ecuaciones se enfrentan a las siguientes dificultades:

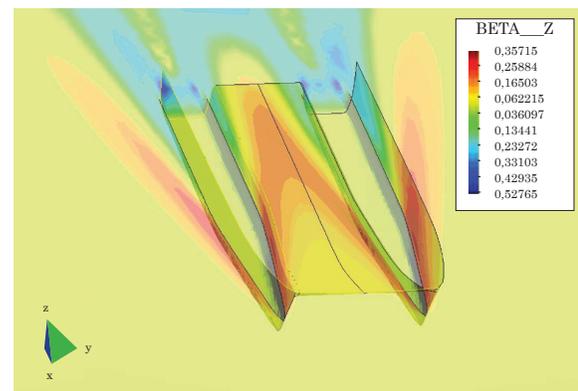
- El carácter no lineal de las ecuaciones de Navier Stokes ocasiona que los esquemas de integración tradicionales presenten importantes problemas de inestabilidad.
- La resolución precisa de la ecuación de la superficie libre, que restringe el movimiento de las partículas a una superficie fluida, de posición a priori desconocida.

Los esquemas más exactos desarrollados incluyen un algoritmo para la resolución del flujo incompresible tridimensional acoplado a un esquema bidimensional para la resolución del transporte en la

superficie libre. En el presente artículo se presenta un procedimiento estabilizado basado en el método de los elementos finitos que pretende solventar cada uno de los problemas anteriores. La metodología se fundamenta en la modificación de las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos que gobiernan el flujo viscoso incompresible y el movimiento de la superficie libre, mediante la aplicación del cálculo finitesimal *-CF-*.

En el código *Shyne* las ecuaciones modificadas son resueltas usando un esquema de pasos fraccionados semiimplícito y el método de los elementos finitos *-FEM-*. Los efectos de la superficie libre, tras calcular su última posición, son tenidos en cuenta de manera simplificada mediante la imposición de una presión sobre la misma, obtenida de la denominada ecuación dinámica de superficie libre. La generación de olas mediante el código *CFD* se muestra en el Gráfico 1.

Gráfico 1. Generación de olas,  $V=28$  Kn

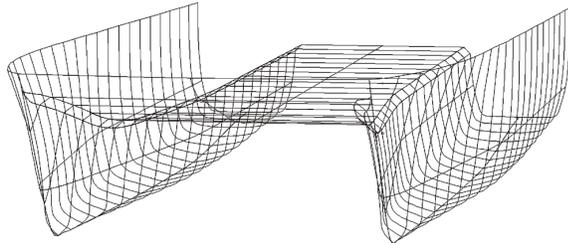


Para realizar los ensayos experimentales, es decir, ensayos de remolque en el laboratorio de hidrodinámica naval del Instituto de Ciencias Navales y Marítimas de la Universidad Austral de Chile, se construyó un modelo de plástico reforzado con fibra de vidrio a una escala de 1/17. Las formas del modelo ensayado se muestran en el Gráfico 2.

Las condiciones de ensayo fueron especificadas en el rango de operación de la embarcación, es decir, se utilizó como desplazamiento el de plena carga que corresponde a 19 toneladas y un rango de velocidades que varía entre los 10 y 30 nudos.

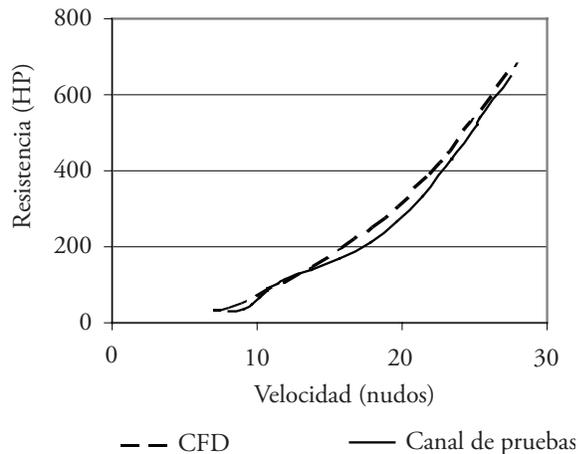
El método de correlación utilizado fue el método de Froude y la línea de fricción la de la *ITTC* de 1957.

Gráfico 2. Formas del catamarán



Una comparación gráfica de las curvas de resistencia al avance se observa en el Gráfico 3, del que se concluye que existe una diferencia de aproximadamente 4,5% entre lo obtenido mediante los ensayos de canal y los ensayos numéricos.

Gráfico 3. Comparación de resistencia



En la curva correspondiente a los ensayos de canal se observa el fenómeno natural de sustentación, que se produce entre los 10 y 14 Kn, siendo una zona de transición entre el régimen de semiplaneo y el de planeo. Este fenómeno no se refleja en la curva de los ensayos numéricos, debido a la condición del método utilizado, que si bien corresponde a un código viscoso no tiene en consideración los parámetros de cambio de trimado. En códigos de última generación este problema ya ha sido resuelto, pudiendo representarse fielmente este fenómeno.

## Cálculo del coeficiente de resistencia de olas

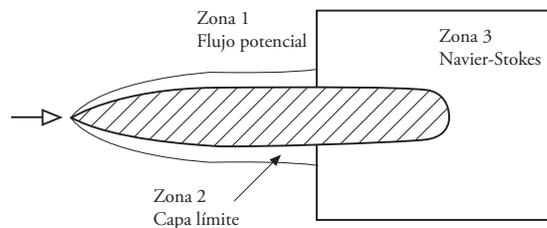
La resistencia al avance de un catamarán básicamente reside en calcular adecuadamente la resistencia por formación de olas, la cual puede estimarse a partir del coeficiente calculado por métodos experimentales o *CFD*. En esta parte del trabajo se ha usado el programa *Shipflow* para establecer los valores del coeficiente de resistencia de olas, y a partir de estos obtener ecuaciones de regresión que permitan contar con una herramienta útil en la estimación de la resistencia al avance de catamaranes.

Para obtener el coeficiente de resistencia de olas,  $C_{wv}$ , se divide el dominio fluido en tres regiones, dependiendo del modelo que pueda representar más eficientemente el tipo de flujo predominante en cada región. De esta forma las ecuaciones del flujo pueden ser resueltas de tal modo que se pueda maximizar la eficiencia computacional, tal como es descrito por Larsson (1993).

El Gráfico 4 representa esta aproximación por regiones del dominio fluido. El código *CFD* se basa en tres métodos diferentes para cada zona:

- Zona 1: Método del flujo potencial
- Zona 2: Método de la capa límite
- Zona 3: Método de Navier-Stokes

Gráfico 4. Distribución de zonas de flujo



El método del flujo potencial es usado para analizar el fluido en la capa externa a la capa límite, designada como zona 1 en el Gráfico 4. En esta zona el flujo es tratado en forma de líneas de corriente continuas empezando desde la proa del buque y extendiéndose hacia la popa. La región que describe

la delgada capa límite es definida como zona 2, la naturaleza del flujo cambia en esta región a medida que se avanza desde proa hacia popa. El flujo laminar empieza desde el punto de estagnación, diverge gradualmente a medida que avanza hacia popa hasta que alcanza el punto de transición donde las fuerzas viscosas no son suficientemente fuertes como para mantener el flujo en líneas de corriente paralelas; consecuentemente el flujo pasa a ser turbulento.

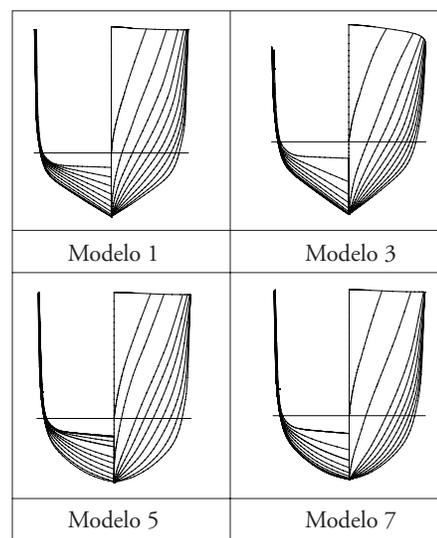
La región de popa descrita como zona 3 representa la región fluida donde el flujo es completamente turbulento y se genera la estela del buque. Esta incluye la región de la capa límite hacia popa del punto de transición donde el flujo pasa a ser turbulento, usualmente ubicado en la mitad del buque. Las ecuaciones de Navier-Stokes son aplicadas en esta región para calcular la energía y por lo tanto la correspondiente resistencia inducida. Para tomar en cuenta las olas creadas es necesario modelar la superficie libre, extendiéndose desde antes de la proa hasta bastante a popa del casco, aproximadamente dos longitudes de ola, y también hacia ambas bandas del casco.

Una de las mayores limitaciones de *Shipflow* es su incapacidad para modelar problemas que incluyan *spray* de olas u olas que rompen, lo que usualmente sucede a velocidades altas, por tal razón el estudio se limitó a velocidades con número de Froude hasta 1,0, considerado el límite superior para que el fenómeno no se presente.

### Serie de catamaranes de casco redondo

La serie sistemática desarrollada es representativa de formas de catamaranes de alta velocidad usados

Gráfico 5. Formas representativas de la serie.



Fuente: Sahoo, Browne y Salas (2004)

como ferris como se puede apreciar en el Gráfico 5. Para producir las formas deseadas de semicascos se usó un procedimiento de transformación paramétrica.

El Cuadro 2 presenta los parámetros geométricos de semicascos usados para generar la serie. Para cada modelo se obtuvieron las características hidrostáticas las cuales se muestran en el Cuadro 3 incluyendo parámetros relevantes usados en el análisis de regresión.

La serie sistemática producida fue restringida a un rango de separación de cascos  $s/L$  entre 0,2 y 0,4 y la velocidad se mantuvo en el rango de  $F_n$  entre 0,2 y 1,0. Las ecuaciones de regresión obtenidas para determinar el coeficiente de resistencia de olas se presentan en las ecuaciones (1) y (2).

El Cuadro 4 presenta las constantes requeridas para la ecuación de cálculo del coeficiente de resistencia

Cuadro 2. Serie sistemática de catamaranes

Model	1	2	3	4	5	6	7
L/B	15,00	15,00	15,00	15,00	12,50	12,50	10,00
B/T	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	2,50	2,50
$C_B$	0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,45	0,45
$L/\nabla^{1/3}$	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Cuadro 3. Características hidrostáticas de la serie sistemática

Modelo	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	$\Delta$ (ton)	$i_E$ (grad)	$\beta_M$ (grad)	$S_W$ (m <sup>2</sup> )	LCB (m)	LCF (m)
1	50,00	3,33	2,22	151,93	5,43	42,99	246,10	22,30	20,70
2	50,00	3,33	2,22	170,91	7,18	44,32	256,20	22,27	21,54
3	50,00	3,33	1,33	113,90	7,03	24,94	195,89	22,34	21,41
4	50,00	3,33	1,33	91,08	4,00	23,32	181,97	22,29	19,99
5	50,00	4,00	2,67	246,10	8,60	44,11	307,57	22,27	21,54
6	50,00	4,00	1,60	147,69	8,60	30,37	231,71	22,27	21,54
7	50,00	5,00	2,00	230,77	10,71	30,37	289,80	22,27	21,54

$$C_{Wdem} = e^{C_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C_2} (C_B)^{C_3} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{C_4} (i_E)^{C_5} (\beta)^{C_6} \tag{1}$$

$$C_{Wcat} = e^{C_1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C_2} \left(\frac{B}{T}\right)^{C_3} (C_B)^{C_4} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{C_5} (i_E)^{C_6} (\beta)^{C_7} \left(\frac{s}{L}\right)^{C_8} \tag{2}$$

Cuadro 4. Coeficientes de regresión y R<sup>2</sup> para semicascos en la ecuación (1)

Fn	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	R <sub>2</sub>
0,2	3,001	-0,159	0,515	-3,666	-0,194	0,000	0,967
0,3	1,221	0,000	0,815	-3,445	0,218	0,000	0,985
0,4	3,180	-0,702	0,377	-3,114	-0,390	0,000	1,000
0,5	2,519	0,396	-0,775	-4,175	0,000	-0,410	0,999
0,6	2,031	-0,239	0,000	-3,402	-0,138	-0,091	0,999
0,7	1,130	-0,220	0,000	-3,221	-0,043	-0,081	0,999
0,8	0,600	-0,272	0,000	-3,079	0,000	-0,063	0,999
0,9	-0,216	0,000	-0,228	-3,158	0,173	-0,178	0,999
1,0	-1,086	0,000	-0,396	-2,965	0,300	-0,203	0,998

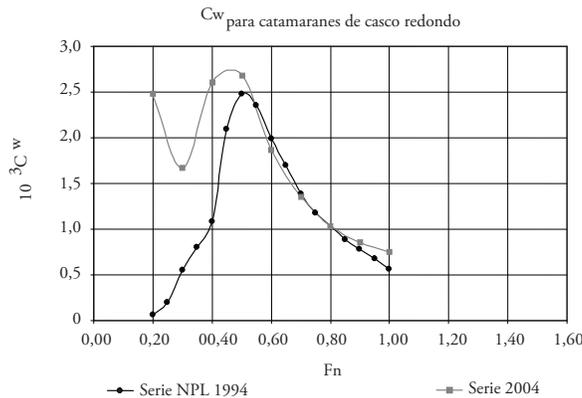
Cuadro 5. Coeficientes de regresión y R<sup>2</sup> para catamaranes en ecuación (2)

Fn	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	R <sub>2</sub>
0,2	2,571	0,436	0,000	0,000	-4,124	-0,039	-0,199	0,037	0,995
0,3	0,585	0,000	0,000	0,945	-3,282	0,246	0,087	-0,089	0,989
0,4	3,324	0,000	-0,471	-0,963	-3,523	0,000	-0,688	-0,035	0,984
0,5	2,439	0,379	0,000	-0,600	-4,262	0,000	-0,337	-0,368	0,999
0,6	1,809	-0,110	0,000	0,000	-3,625	-0,061	-0,095	-0,314	0,997
0,7	1,055	0,000	0,082	-0,025	-3,617	0,000	-0,064	-0,181	0,997
0,8	0,603	0,222	0,266	0,000	-3,869	0,000	0,000	-0,069	0,998
0,9	-0,466	0,049	0,162	0,000	-3,322	0,128	0,000	-0,006	0,999
1,0	-1,221	0,000	0,117	0,000	-3,046	0,264	0,000	0,075	0,995

de olas del semicasco de (1) y el Cuadro 5 presenta las constantes necesarias para la evaluación del coeficiente de resistencia de olas del catamarán de (2). En ambos casos,  $R^2$  representa un parámetro de evaluación de la correlación de las curvas de regresión, 0 indica que no hay correlación y 1 indica que la correlación es de 100%.

El Gráfico 6 muestra los coeficientes de resistencia de olas obtenidos por el método de regresión descrito comparados con resultados experimentales de Molland et al. (1994) para la serie NPL. La serie NPL está basada en monocascos dispuestos en configuración de catamarán. El valor de la astilla muerta en la sección media del casco y la mitad del ángulo de entrada del plano de flotación se han considerado constantes en 7 y 30 grados respectivamente.

Gráfico 6. Coeficientes de resistencia de olas para catamaranes de casco redondo



Fuente: Molland et al. (1994) y resultados del estudio

## Conclusiones

La comparación de resultados de resistencia al avance de un catamarán obtenida mediante CFD y experimentos en canal de pruebas muestra que un análisis numérico puede actualmente estimar la resistencia al avance con precisión aceptable para el caso estudiado.

La factibilidad de poder realizar numerosos ensayos, sin incurrir en costos elevados (de ejecución de modelos) hacen del método numérico una alternativa de selección de formas a la hora de encarar

un nuevo diseño o de mejorar uno ya existente. Si bien los métodos numéricos son una alternativa de alta viabilidad, no se pretende, con lo detallado en este trabajo, plantear un reemplazo de los canales de pruebas, sino un complemento entre ambos métodos.

En cuanto a la estimación por regresión lineal del coeficiente de resistencia de olas, se puede observar en el Gráfico 6, que los resultados de las dos series, sobre  $Fn$  0,5 y hasta  $Fn$  igual a 1,0, son muy cercanos lo que hace concluir que el método presentado es válido para estimar el coeficiente de resistencia de olas de un catamarán de casco redondo en este rango de velocidades.

Es interesante analizar el peso relativo de los parámetros utilizados en las ecuaciones de regresión de un semicasco y la configuración catamarán. Del análisis de las ecuaciones se concluye que el parámetro que tiene mayor influencia en la resistencia de olas es la relación de esbeltez dada por la eslora y el volumen de la carena ( $L/\nabla^{1/3}$ ). A continuación se deduce que el ángulo de entrada, de astilla muerta, y la separación entre los cascos, son también importantes. La relación entre la manga y el calado son importantes solo cuando se alcanzan velocidades altas.

Los resultados obtenidos muestran que el método de regresión puede ser empleado satisfactoriamente en la estimación de la resistencia de olas de un catamarán, sin embargo los parámetros usados deben estar en el rango utilizado en la serie.

## Nomenclatura

B	Manga de semicasco en la flotación
B/T	Relación manga/calado
$C_w$	Coeficiente de resistencia de olas
$C_{w\text{demi}}$	Coeficiente de resistencia de olas de semicasco
$C_{w\text{cat}}$	Coeficiente de resistencia de olas de catamarán
$F_n$	Número de Froude
$i_E$	Semiángulo de entrada
L	Eslora en flotación
L/B	Relación eslora/manga (de semicasco)

$L/\nabla^{1/3}$	Relación de esbeltez
LCF	Posición longitudinal del centro de flotación (desde el espejo)
LCB	Posición longitudinal del centro de empuje (desde el espejo)
s	Separación de cascos (medida entre crujías de semicascos)
s/L	Relación de separación de cascos
$S_w$	Superficie mojada
V	Velocidad
$\beta_M$	Astilla muerta al centro
$\Delta$	Desplazamiento
$\nabla$	Volumen de la carena

## Referencias

- García, J.; Luco, R.; Salas, M.; López, M.; and Oñate, E. (2002), "An Advanced finite element method for fluid-dynamic analysis of America's Cup boat". Auckland, New Zealand 2002.
- Larsson, L. (1993), Resistance and Flow Predictions Using Shipflow Code. 19th Wegemt School, Nantes, France.
- Molland, A. F., Wellicome, J. F. and Couser, P. R. (1994), "Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draft Ratio", *Ship Science Report n.º 71*, University of Southampton, UK.
- Sahoo P. K., Browne N. and Salas M. (2004, september), "Experimental and CFD Study of Wave Resistance of High-Speed Round Bilge Catamaran Hull Forms". Proceedings of 4th International Conference on High Performance Marine Vehicles, Rome, Italy.

# Análisis de requerimientos mediante la aplicación de *AHP* como base para el desarrollo del diseño conceptual de un buque tipo *LCU*

Luis E. Aranibar<sup>a</sup>  
Rafael L. Callamand<sup>a</sup>

## Resumen

Este artículo resume el estudio de los requerimientos y necesidades que se tienen en cuenta en el desarrollo del diseño conceptual de un buque de desembarco (*LCU*, por sus siglas en inglés), en el que se usó la metodología de análisis jerárquico *AHP*, con el fin de calificar y clasificar lo solicitado por la Armada de la República de Colombia (ARC), que será la usuaria del buque. De esta manera se logró establecer la importancia que tiene para el armador cada una de las necesidades expuestas, con el fin de incluirlas directamente dentro del proceso de diseño.

**Palabras clave:** *Landing Craft Utility (LCU)*, desembarco, diseño preliminar, *AHP*.

## Abstract

This article summarizes the study of the requirements and necessities which are taken into consideration in the development of the conceptual design of a Landing Craft Utility (LCU), in which the *AHP* hierarchic analysis methodology was used, in order to qualify and classify the requested by the Colombian Navy (ARC), which will be the user of the ship. This way, it was possible to establish the importance which each of the necessities exposed has for the shipbuilder, in order to include them directly in the design process.

**Palabras clave:** Landing Craft Utility (LCU), landing, preliminary design, *AHP*.

Fecha de recepción: 13 de marzo de 2008

Fecha de aceptación: 12 de mayo de 2008

<sup>a</sup>Cotecmar. Departamento de Arquitectura Naval.  
Autor corresponsal: [laranibar@cotecmar.com](mailto:laranibar@cotecmar.com)

## Introducción

Este proyecto surge como respuesta a la necesidad de la Armada de Colombia, de incorporar a su flota un buque con capacidad para realizar diferentes operaciones de apoyo logístico y transporte de tropa en las costas y ríos navegables del país. Estas operaciones son realizadas por embarcaciones tipo *LCU (Landing Craft Utility)* clase 1466, construidas por Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial, que por su largo periodo de vida presentan limitaciones dado el deterioro en sus equipos y en la estructura del casco, lo cual dificulta el cumplimiento de la misión asignada.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de requerimientos con el fin de clasificar y calificar cada una de las necesidades de la Armada, para orientar el diseño de un buque del tipo *LCU*. Con ese objetivo, se implementó la metodología de proceso de análisis jerárquico *AHP* (Saaty, 1990), por sus siglas en inglés, la cual permite identificar los criterios, que desde el punto de vista del armador (Armada Nacional) y de los usuarios

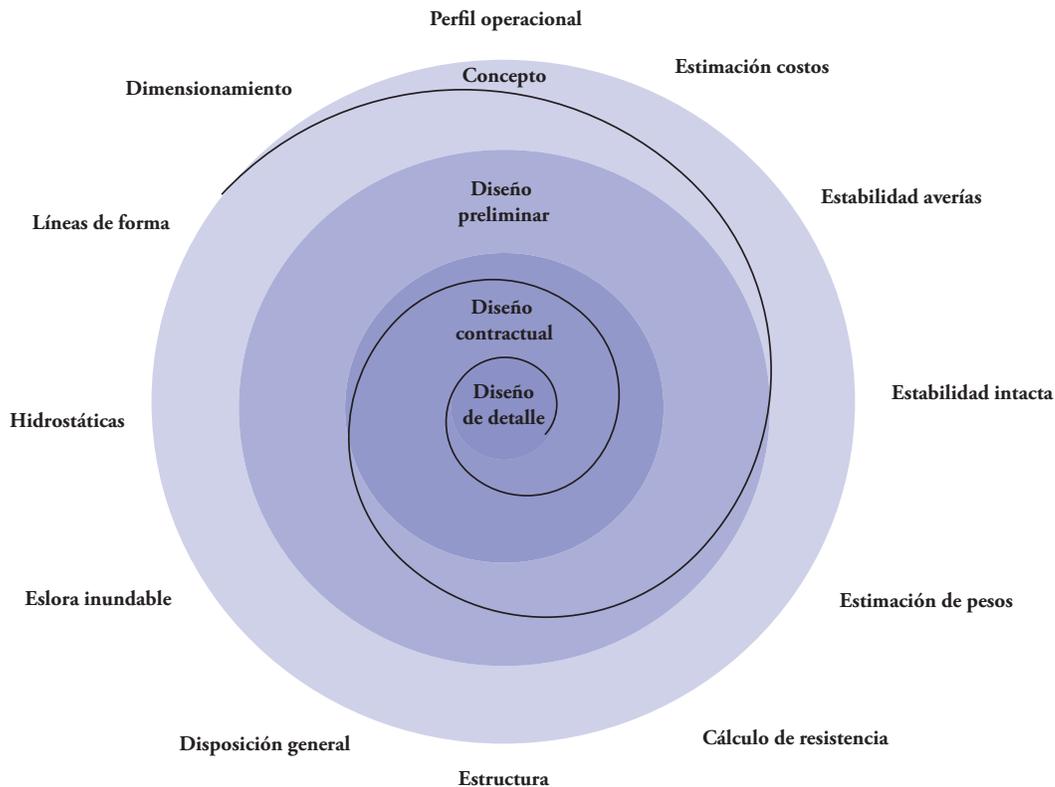
(tripulación) del buque, presentan un mayor grado de importancia en el nivel de satisfacción final, y emplear estos resultados como base para desarrollar el diseño de un buque que cumpla con las expectativas del usuario.

Para el desarrollo del proyecto de diseño preliminar del buque se siguió la estructura de la espiral de diseño, abarcando los siguientes temas: análisis de requerimientos, dimensionamiento, estimación de pesos, estructura del casco, cálculo de potencia, disposición general, armamento y estabilidad.

## Proceso de decisión

En el ámbito mundial se encuentran gran cantidad de modelos de buques de desembarco desarrollados por diferentes astilleros que pueden ser adaptados a la necesidad existente, sin embargo, la utilización del proceso de análisis jerárquico permite obtener resultados que facilitan la realización de un diseño preliminar, enmarcado en el cumplimiento de las necesidades propias de la Armada de Colombia.

Gráfico 1. Espiral de diseño



Pensando en lo anterior se decidió emplear el método de decisión multicriterio *AHP* (*Analytical Hierarchy Process*) el cual permite, mediante la construcción de un modelo jerárquico, organizar de manera eficiente y gráfica, la información respecto al problema, descomponerla y analizarla por partes.

La metodología *AHP* establecida por Saaty (1990), es un método de decisión multicriterio, el cual permite visualizar la comprensión del problema mediante la construcción de un modelo jerárquico compuesto de tres niveles: objetivo, criterios y alternativas.

Al construir el modelo jerárquico es posible realizar comparaciones entre criterios, subcriterios y alternativas, dentro de las cuales se le asigna, por parte de cada uno de los participantes en el proceso, valores numéricos que representan las preferencias desde el punto de vista de los evaluadores.

Los valores asignados permiten medir el grado de influencia de cada elemento en el nivel superior del cual se desprende; para ello se emplean escalas de razón, en cuanto a preferencia, importancia y probabilidad, sobre la base de una escala numérica que abarca del 1 al 9.

El *AHP* se fundamenta en:

- La construcción del modelo jerárquico
- Priorización de los elementos del modelo
- Comparaciones binarias entre los elementos
- Evaluación de los elementos mediante la asignación de pesos
- *Ranking* de las alternativas de acuerdo con los pesos dados
- Síntesis
- Análisis de sensibilidad

## Caso de estudio

En este caso en especial, en el cual se desea realizar el diseño de un buque de desembarco para la Armada Nacional de Colombia, que cumpla con sus expectativas y requerimientos, es fundamental

que el diseñador tenga el conocimiento suficiente para determinar los factores o características que deben ser tenidos en cuenta dentro del proceso de diseño.

### Recolección de datos

Dentro de cualquier proceso de toma de decisiones, la calidad y cantidad de información con la que cuente el decisor, tiene un papel de gran importancia debido a que de esto, sumado a otros factores que serán analizados más adelante, depende la racionalidad y el grado de acierto al momento de escoger una u otra alternativa.

Dentro del campo de operación de un buque de la Armada Nacional, se debe tener en cuenta que, durante su periodo de servicio estará sometido a frecuentes cambios de tripulación y variaciones en sus prioridades de operación. Con el fin de disminuir al máximo este factor de incertidumbre se organizaron diferentes grupos de individuos, denominados grupos focales (Reyes, 2004), que de una u otra forma tienen relación con la operación del buque, compuestos por oficiales y suboficiales en diferentes grados, que abarcan las áreas de operación más importantes, tales como mantenimiento a bordo, apoyo logístico y soporte de mantenimiento en tierra.

Para recolectar la información de la manera más eficiente posible se realizaron un total de 45 entrevistas a individuos de los cuatro grupos focales establecidos anteriormente, en las que se les plantearon diversos interrogantes encaminados, en primer lugar, a que los participantes pudieran reflejar de una manera cuantificable las experiencias vividas en la operación de los buques tipo 1466, y por otro lado se brindó la posibilidad de que las tripulaciones plantearan, desde su punto de vista, recomendaciones con el fin de mejorar el desempeño de los *LCU*.

Del análisis de las entrevistas se desprende que los conceptos de operación, para el mismo tipo de buque, varían notablemente entre la Costa Pacífica colombiana y el Litoral Caribe debido principalmente a la falta de medios de aprovisionamiento disponibles, por lo cual los buques *LCU* 1466 que

operan en el Pacífico presentan más dificultades al momento de solucionar problemas de mantenimiento.

Por otra parte, es importante resaltar que 95% de los entrevistados se mostró inconforme con el espacio en los buques del tipo 1466, destinado a las áreas de descanso y labores.

### Misión

Adicionalmente a las entrevistas, se realizó el análisis estadístico de los informes de operación y cuadros de consumo de los buques en los últimos cuatro años. Debido al carácter confidencial estos datos no se presentan detalladamente (Gráfico 2). Con el fin de determinar la misión asignada a estos buques y para la cual se realizará el diseño, la información fue complementada por la programación de las operaciones proyectadas y la necesidad operacional establecida por la Armada Nacional, con lo que se determinó:

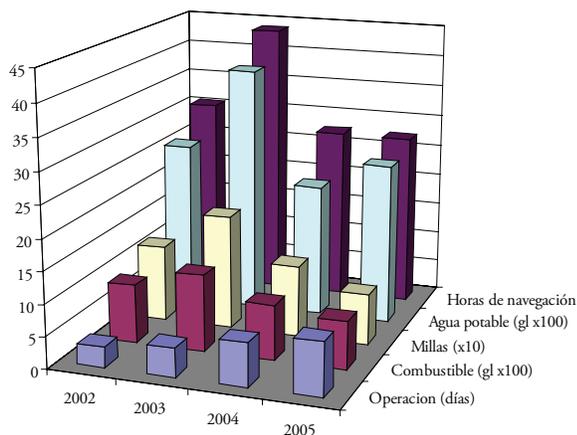
#### *Misión principal*

Realizar operaciones de apoyo (Nato, 2004) logístico a bases en tierra de la Armada y realizar transporte de tropa para operaciones militares.

#### *Misión secundaria*

Vigilancia y control sobre costas y ríos.

Gráfico 2. Promedios 2002-2005



### Análisis de requerimientos

Una vez recolectada la información necesaria, el paso siguiente es su análisis, con el fin de determinar

las prioridades hacia las cuales estará enfocado el diseño.

Para analizar y ponderar los requerimientos, debido a la gran variedad de opiniones existentes sobre las características que debe tener este buque, fue fundamental determinar la importancia de cada uno para la Armada, y con ese objetivo se recurrió al *AHP*, de tal suerte que, en primer término, el producto final cuente con las características que satisfagan las necesidades del armador, y en segundo lugar sea posible realizar la evaluación final del diseño conceptual de la *LCU* con relación a las *LCU* 1466.

El punto clave en cualquier proceso de decisión, es identificar claramente el orden jerárquico en el que se establece el objetivo o meta, y los criterios de clasificación de los requerimientos que en nuestro caso se convierten en las alternativas, tal como se define a continuación.

### Objetivo

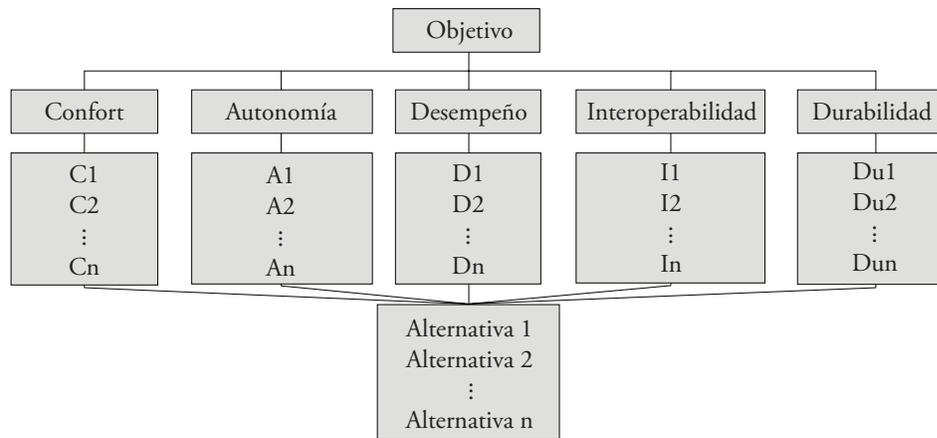
Evaluar las necesidades operacionales presentadas por la Armada para la construcción de un buque de desembarco, de acuerdo con la importancia que representan para el cumplimiento de la misión establecida.

Para el análisis de todos los requerimientos, se conformaron inicialmente grupos denominados afinidades (Tague, 1995), las cuales permiten organizar muchas ideas en grupos naturales, según criterios establecidos por el equipo de trabajo. Debido a que cada grupo de requerimientos asociado a una afinidad característica, afectaba de una manera particular el desarrollo del diseño y las decisiones que al respecto se debían tomar, estas afinidades fueron presentadas como criterios dentro del marco jerárquico del proceso y los requerimientos entregados por la Armada fueron organizados como subcriterios.

### Criterios

Son los aspectos o características que se consideran influyentes, en mayor o menor grado, para cumplir con la toma de la decisión. Se deben incluir aspectos tanto cualitativos como cuantitativos (Toscano, 2005).

Gráfico 3. Estructura jerárquica



*Confort (C)*

Características del buque que permite brindarle comodidad y bienestar a su tripulación.

*Subcriterios asociados*

- Capacidad de alojamiento
- Espacio de máquinas
- Capacidad de baños
- Cocina y capacidad de despensas
- Áreas de esparcimiento y descanso

*Autonomía (A)*

Características que permiten al buque aumentar su periodo de operación sin requerir de aprovisionamiento.

*Subcriterios asociados*

- Capacidad de combustible
- Capacidad de agua
- Capacidad de víveres
- Consumo de combustible
- Consumo de agua

*Desempeño (D)*

Característica del buque que le permite realizar satisfactoriamente el trabajo o la misión para la cual fue diseñado.

*Subcriterios asociados*

- Velocidad
- Tipo de navegación
- Calado máximo

Capacidad de carga en cubierta  
Aprovisionamiento de líquidos

*Interoperabilidad (I)*

Capacidad del buque para realizar operaciones conjuntas con elementos pertenecientes a otras fuerzas (Ejército, Fuerza Aérea o Policía).

*Subcriterios asociados*

- Sistemas de comunicaciones
- Transporte de tropa sobre cubierta
- Tipo de motores
- Seguridad durante la operación
- Sistema de desembarco

*Durabilidad (DU)*

Característica del buque que le permite cumplir con su función por largo tiempo sin necesidad de ser reparado.

*Subcriterios asociados*

- Material de construcción
- Material de acabados
- Calidad de los materiales
- Protección ante la corrosión
- Equipos de seguridad

Una vez determinada la jerarquía del proceso se desarrolló una matriz de comparación entre los criterios con respecto a la satisfacción del objetivo, y entre los subcriterios con respecto a la satisfacción de cada uno de los criterios. En total fueron eva-

luados 35 requerimientos por parte de diferentes grupos de personas, entre tripulantes y personal de apoyo logístico, denominados grupos focales, que abarcan las diversas áreas de trabajo que tienen influencia en la operación del buque y que cuentan con la experiencia obtenida en las operaciones a bordo de las LCU clase 1466 pertenecientes a la Armada de Colombia.

Para evaluar los subcriterios y criterios se realizaron 25 entrevistas a personal de diferentes áreas de trabajo: tripulación de operaciones, de mantenimiento a bordo, personal de apoyo logístico, personal de planeamiento y oficiales de nivel comando de buque.

Cada uno de los criterios, se comparó con los cinco restantes y contra él mismo, contestando la pregunta: ¿El criterio (X), es más o es menos importante que el criterio (Y), al ser tenido en cuenta en el diseño de un buque tipo LCU?, y se le asignaron valores a cada una de las comparaciones de acuerdo con la escala definida para este propósito (Saaty, 1980), que se puede ver en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Escala de valores de Saaty

Escala	Explicación
1	X y Y tienen la misma importancia
3	X es ligeramente más importante que Y
5	X es más importante que Y
7	X es mucho más importante que Y
9	X es extremadamente más importante que Y

Es así como cada uno de los integrantes de los diferentes grupos de expertos, realizaron la comparación entre los criterios asignándole un valor de la escala Saaty a cada comparación.

A manera de ejemplo seguiremos el cálculo desarrollado a la matriz de comparación de criterios realizada por parte de uno de los integrantes de la tripulación de la LCU 1466<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Dentro del proceso de cálculo de prioridades se contó con la participación de los oficiales y suboficiales de los buques tipo LCU 1466 asignados a las Fuerzas Navales del Pacífico y del Caribe.

Cuadro 2. Matriz de comparación de criterios

Criterios	C.	A.	D.	I.	Du
Confort	1,0	3,0	3,0	5,0	5,0
Autonomía	0,3	1,0	1,0	5,0	0,3
Desempeño	0,3	1,0	1,0	5,0	3,0
Interop.	0,2	0,2	0,2	1,0	0,3
Durabilidad	0,2	3,0	0,3	3,0	1,0

La comparación entre criterios genera una matriz de comparaciones pareadas de la cual es posible el cálculo de la prioridad de cada uno de los elementos por medio de una sinterización. Para este procedimiento se requiere la normalización de las comparaciones por medio de la división de cada elemento de la matriz de comparación por la suma de todos los elementos de la columna correspondiente y así obtener la matriz de comparación normalizada, (Cuadro 3), la cual permite calcular el vector de prioridad de los elementos comparados mediante el cálculo del promedio de los elementos de cada fila.

Cuadro 3. Matriz normalizada

Criterios	C.	A.	D.	I.	Du
Confort	0,44	0,34	0,511	0,238	0,492
Autonomía	0,14	0,11	0,170	0,238	0,033
Desempeño	0,14	0,11	0,170	0,238	0,295
Interop.	0,08	0,02	0,034	0,048	0,033
Durabilidad	0,08	0,34	0,057	0,143	0,098

Prioridades/criterios	0,4
	0,14
	0,19
	0,04
	0,14
	0,07

Al analizar y comparar con detenimiento las evaluaciones realizadas por cada uno de los grupos se pudo corroborar claramente la existencia de diversas preferencias entre ellos. Sin embargo, el resultado final, es decir, la priorización de los criterios, dio una preferencia igual para los grupos conformados por tripulantes, mantenimiento y operaciones, y continuó marcando la diferencia el

grupo conformado por los encargados del apoyo logístico en tierra, para el cual presenta una mayor importancia la durabilidad.

Cuadro 4. Matriz de comparación

Confort	A	B	C	D	E
A	1,0	0,2	0,1	0,5	0,5
B	5,0	1,0	2,0	5,0	1,0
C	7,0	0,5	1,0	5,0	2,0
D	2,0	0,2	0,2	1,0	0,1
E	2,0	1,0	0,5	7,0	1,0

Una vez obtenidas las prioridades de los criterios con respecto al objetivo global fue necesario obtener de las prioridades de los subcriterios con respecto al criterio asociado; esto se logró con el mismo procedimiento anteriormente descrito, aplicando la comparación mediante matrices. El Cuadro 4 muestra la matriz de comparación de los subcriterios con respecto al confort.

A cada una de las matrices de comparación le fue verificado su nivel de consistencia por medio del cálculo de la razón de consistencia (Saaty, 1980), la cual se mantuvo por debajo de 0,1, considerado aceptable.

A continuación se presentan los vectores de prioridades de cada uno de los subcriterios con respecto a los criterios principales.

Cuadro 5. Matriz de prioridades subcriterios

	C.	A.	D.	I.	DU
A	0,30	0,30	0,37	0,36	0,31
B	0,23	0,35	0,31	0,34	0,25
C	0,22	0,20	0,12	0,07	0,23
D	0,15	0,02	0,09	0,08	0,11
E	0,10	0,13	0,11	0,15	0,09

El paso siguiente dentro del proceso de análisis jerárquico debería ser la evaluación de cada una de las alternativas ante los criterios ya determinados, sin embargo, debido a que el propósito final del tra-

bajo es el diseño conceptual del buque, se decidió desarrollarlo sobre la base de las prioridades determinadas por los participantes.

Al término de este trabajo y una vez se cuente con el diseño conceptual debidamente desarrollado, se empleará el modelo jerárquico presentado para examinar alternativas con buques ya diseñados y construidos y el diseño del LCU de este trabajo.

## Diseño conceptual

En esta primera fase se logra determinar la viabilidad del proyecto. Para dar inicio a esta etapa, definida la misión del buque y la importancia de los criterios evaluados, se tendrá presente la información obtenida mediante el modelo jerárquico y se trabajará estrechamente con el armador (Armada Nacional).

Con el fin de dar a conocer las características iniciales del proyecto, luego de estudiar los requerimientos recolectados en las reuniones llevadas a cabo con el personal que compone los grupos focales para este proyecto, se exploraron alternativas a escala internacional, de buques similares, principalmente en las flotas de las diferentes armadas del mundo, empleados tanto en operaciones de desembarco de tropas como para transporte y suministro logístico en lugares de difícil acceso. Esto se convierte en una herramienta bastante útil para reafirmar las dimensiones propuestas, estableciendo la similitud a partir de las regresiones estadísticas obtenidas.

La eslora y la manga fueron establecidas como dimensiones críticas, debido a su influencia determinante sobre las demás características del buque y a la necesidad de que este cuente con una suficiente capacidad dimensional sobre cubierta para realizar transporte de maquinaria pesada y de botes de elementos de combate fluvial.

Las tendencias de las relaciones adimensionales marcadas por la población de buques analizados permitieron ubicar en un espacio determinado el diseño del nuevo LCU.

Gráfico 4. L/B vs L

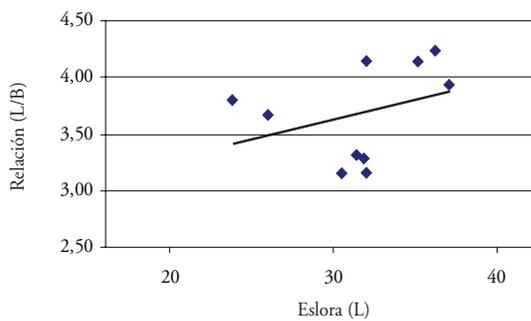
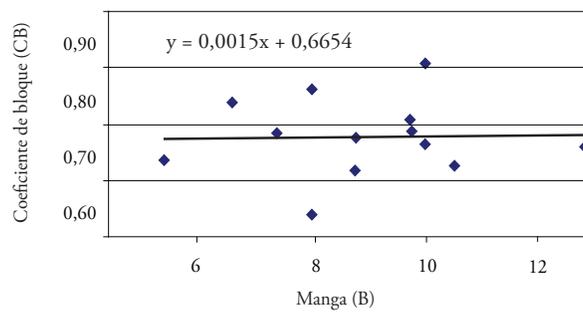


Gráfico 5. CB vs Manga (B)



### Dimensiones críticas

Teniendo en cuenta la necesidad de que el buque pueda realizar el transporte de material logístico y de botes de los elementos de combate fluvial, se determinaron las dimensiones críticas que rigieron el dimensionamiento inicial de la siguiente manera:

#### Esloza

Está regida por el espacio de la cubierta de carga, la cual debe contar por lo menos con 20 metros de espacio disponible para recibir los botes de los elementos de combate con sus respectivos tráileres. Adicionalmente se contempló 20% de la eslora total para maniobras de desembarco y 30% para la superestructura, teniendo en cuenta el valor de prioridad asignado al confort de la tripulación dentro del proceso de *AHP*. Considerando lo anterior se propuso una eslora total de 45 metros.

#### Manga

Por las mismas razones tenidas en cuenta para la eslora se debe contar con una manga mínima de 11 metros.

#### Calado

Dadas las características de las playas en las costas Caribe y Pacífica del país, al igual que las profundidades de los ríos navegables de la región, se determinó un promedio de 6 pies (1,8 m) el calado de entrada a los puertos y bahías con la marea media.

Basados en lo anterior y de acuerdo con lo mostrado por buques similares, se propondrá un calado de 1,7 m con el fin de cumplir con las restricciones expuestas.

Una vez definidas las dimensiones críticas dentro de las cuales se debe enmarcar el diseño, se define el dimensionamiento del buque basado en las tendencias de las relaciones adimensionales descritas anteriormente en los gráficos 1 y 2, de donde se derivan las siguientes relaciones:

$$L/B = 0,0342L + 2,5633$$

$$B/T = 0,3487B + 2,1884$$

Las tendencias encontradas anteriormente, junto con la eslora como dato de entrada y el calado como parámetro crítico en el diseño del buque, permite generar una base de combinaciones de parámetros y dimensiones principales relacionados con diferentes medidas de la eslora, que sirven para definir las características principales, de manera que se encasillen dentro de las necesidades del armador.

### Características generales

Teniendo en cuenta el propósito de este trabajo y las prioridades establecidas por el personal de expertos participantes en el proceso de análisis jerárquico, a continuación se definen algunas de las características generales que alcanzaron la ponderación más alta, con las que el buque deberá contar y que serán detalladas en una etapa posterior.

#### Capacidad de carga

Dentro del marco de operaciones se espera que el buque realice misiones de apoyo logístico a las diferentes bases en tierra, transportando maquinaria pesada, equipos y materiales de intendencia. Este aspecto se vio reflejado en la priorización de criterios de los participantes. Debido a lo anterior el buque deberá contar

Cuadro 6. Dimensiones propuestas

$L_{OA}$ (m)	B (m)	T (m)	L/B (1)	B/T (2)	CB (3)	Lpp (m)	Despl ton
44,00	10,82	1,70	4,07	5,96	0,88	43,00	555,09
45,00	10,97	1,70	4,10	6,01	0,88	40,95	536,31

con el espacio y equipos necesarios para poder transportar los volúmenes de carga deseados.

#### *Acomodaciones*

El confort fue uno de los aspectos prioritarios para el personal, por lo tanto se consideró la inclusión de camarotes individuales para oficiales, con capacidad necesaria para recibir un oficial femenino dentro de la tripulación permanente, también contará con una cámara para la tripulación y espacios de esparcimiento para la tropa.

#### *Velocidad*

Si bien este factor no fue dominante dentro de la exploración de conceptos, se pudo apreciar la inconformidad con la velocidad actual desarrollada por los LCU 1466. El nuevo LCU tendrá la propulsión necesaria para alcanzar un mínimo de nueve nudos.

#### *Personal sobre cubierta*

La dificultad existente para transportar sobre cubierta, personal de infantería de marina o tropa en general, con las condiciones de comodidad mínimas para afrontar las inclemencias del clima, es un factor importante en el grado de insatisfacción presente en los LCU 1466. Con el ánimo de solucionar esta falencia el nuevo diseño cuenta con un sistema de techo corredizo (telescópico).

## Evaluación de alternativas

La evaluación de las alternativas se hizo teniendo en cuenta los LCU existentes en el ámbito internacional, la gran mayoría al servicio de las Armadas de diferentes naciones. La información disponible en internet fue la base para este

análisis; a continuación se exponen algunas de las características más importantes de los buques analizados.

Cuadro 7. Alternativas

	Eslora (m)	Manga (m)	Calado (m)	Despl. (t)
LCU 1466	33,25	10,5	1,6	360
LCU Tenix	33,25	8	1,8	374
LCU 1600	37,41	8,8	1,7	390
LCU M42	38,22	9,75	1,75	450
LCU 2000	48,23	12,8	2,6	1087

La intención fue emplear la exploración de concepto realizada inicialmente con miras a obtener una valoración final del diseño realizado con respecto a los buques del mismo tipo que se encuentran en operación, por tal motivo se incluyeron aquellos cuyas características de operación eran similares a las requeridas por el concepto.

Esta evaluación fue realizada por un grupo de ocho personas entre oficiales y suboficiales, pertenecientes a la tripulación de los LCU 1466 y a los grupos de apoyo en tierra, a los cuales se les entregó toda la información disponible sobre cada uno de los buques, incluyendo el concepto realizado.

Contando con las prioridades obtenidas anteriormente para cada uno de los criterios y subcriterios, el paso siguiente es determinar la prioridad de cada una de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios. En el Cuadro 7 se puede apreciar la matriz de comparación de cada una de las alternativas con respecto al criterio “capacidad de alojamientos”.

Cuadro 8. Matriz de comparación alternativa

	I	II	III	IV	V
I	1,0	0,3	0,3	0,5	0,1
II	3,0	1,0	3,0	5,0	0,5
III	3,0	0,3	1,0	5,0	1,0
IV	2,0	0,2	0,2	1,0	0,1
V	7,0	2,0	1,0	7,0	1,0

I: LCU 1466; II: Concepto; III: LCU Tenix; IV: LCU 1600, y V: LCU 2000.

El siguiente es el vector de prioridades de las alternativas con respecto al criterio capacidad de alojamiento.

$$\text{Prioridades} = \begin{matrix} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \\ \text{V} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0,06 \\ 0,29 \\ 0,22 \\ 0,06 \\ 0,37 \end{bmatrix}$$

La evaluación se realizó para cada uno de los cinco subcriterios que hacen parte del criterio confort. La siguiente es la matriz de prioridades de las alternativas con respecto al confort.

Cuadro 9. Matriz de prioridades alternativas/subcriterios

	A	B	C	D	E
I	0,06	0,11	0,34	0,07	0,08
II	0,29	0,07	0,11	0,35	0,05
III	0,22	0,10	0,06	0,27	0,23
IV	0,06	0,33	0,09	0,21	0,32
V	0,37	0,38	0,40	0,10	0,31

Cada una de estas matrices resultantes se multiplican por el vector de prioridades de los subcriterios con respecto al criterio superior. Este producto matricial arroja como resultado el vector de prioridades de las alternativas con respecto al confort.

$$\text{Alternativas/confort} \begin{bmatrix} 0,137 \\ 0,184 \\ 0,167 \\ 0,176 \\ 0,331 \end{bmatrix}$$

Para el cálculo de la prioridad global de las alternativas se realiza el producto de la matriz formada por cada uno de los vectores de prioridad de alternativas con respecto a los criterios, por el vector de prioridades de los criterios con respecto a la meta global.

Cuadro 10. Matriz de prioridades alternativas/criterios

	C	A	D	I	DU
I	0,137	0,13	0,12	0,05	0,09
II	0,184	0,3	0,33	0,38	0,23
III	0,167	0,22	0,21	0,12	0,15
IV	0,176	0,04	0,03	0,2	0,23
V	0,331	0,31	0,31	0,25	0,31

El anterior cálculo permitió ponderar cada una de las alternativas con respecto al objetivo global, de la siguiente manera.

Cuadro 11. Pesos globales

LCU 1466	0,10233
Concepto	0,21908
LCU Tenix	0,14873
LCU 1600	0,13573
LCU 2000	0,27359

Con los resultados obtenidos se pudo determinar la preferencia por parte del usuario referente al confort, principalmente por las malas experiencias tenidas durante la operación de los buques LCU 1466.

En el proceso de evaluación de alternativas se destacó con la prioridad más alta la LCU 2000 de la Armada estadounidense, que se caracteriza por contar con grandes espacios de carga y disponibilidad de áreas amplias para el uso de la tripulación, sin embargo, este buque no cuenta con la adecuación necesaria para transporte de tropa sobre cubierta, ya que está diseñada especialmente para operaciones de apoyo logístico.

El diseño conceptual realizado sobre la base de la priorización de requerimientos obtuvo una prio-

riedad de 0,219, que lo ubica por encima de los otros modelos analizados, con excepción de la LCU 2000.

## Características principales

- Material casco  
Acero ASTM 131 grado A
- Características tácticas  
Velocidad: 9-10 nudos  
Autonomía: 1850 Mm@9.5 nudos
- Dimensiones principales  
Eslora Total: 44.5 m  
Manga: 11 m  
Calado medio: 1.55 m  
Desplazamiento: 641 ton
- Capacidades  
Diesel: 10.200 gal  
Agua: 10.386 gal
- Propulsión  
2 x Caterpillar C18  
350 bkw@1800 rpm  
2 x bombas Schootel SPJ82
- Personal  
Tripulación: 2 oficiales  
10 suboficiales  
Tropa: 74 Infantes de Marina.

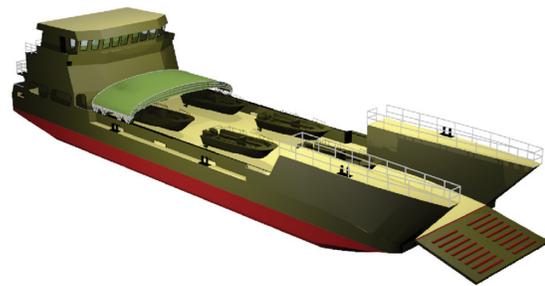
## Conclusiones

La metodología de análisis de AHP, permitió estudiar los requerimientos de la Armada colombiana para el diseño conceptual de un buque tipo LCU. La interacción con los futuros usuarios del buque, sirvió para conocer el peso de cada una de las demandas expresadas, y determinar la necesidad de mejorar las condiciones de habitabilidad y alojamiento de la tropa, junto con la capacidad de carga, como los puntos más importantes que deben ser tenidos en cuenta durante el proceso de diseño.

Como resultado del análisis AHP y de la priorización de criterios, se logró establecer la importancia de factores como el confort y la interoperabilidad, que fueron tenidos en cuenta para la escogencia de los diferentes equipos y configuraciones del buque.

Con el diseño conceptual de esta LCU se buscó un buque que permita la realización de importantes operaciones de desembarco y apoyo logístico, sin las falencias de los LCU 1466. En este diseño se incorporó la instalación de un sistema de techo abatible sobre la cubierta de carga, el cual brinda protección al personal que se transporta sobre cubierta, contra la exposición directa al sol y al agua lo cual es una limitante en las LCU 1466.

Gráfico 6. Vista LCU



## Referencias

American Society for Testing and Materials, F1166-95a2000, *Standard Practice for Human Engineering Design for Marine Systems, Equipment and Facilities*.

David G. M. Watson, *Practical Ship Design*, vol. 1, Elsevier Ocean Engineering Book Series.

Holtrop, J. and G. G. Mennen, A Approximate Power Prediction Method.

Kamal M. Al-Subhi Al-Harbi (1999, 19 May), *Application of the AHP in project management*, Department of Construction Engineering and Management, King Fahd University of Petroleum & Minerals.

Lloyd's Register (1999 July), Provisional Rules for the Classification of Naval Ships, vol. 1, Pt 4, cap. 2.

NATO Naval Group 6 Specialist Team on Small Ship Design (2004, May), "NATO/PfP Working Paper on Small Ship Design", pp. 3.

- Navsea, (1996, August), Naval Ship's Technical Manual, Weights and Stability, S9086-C6-STM-010/CH-096R1.
- NES 109 (2000, April) *Stability Standard for Surface Ships*. U. K. Ministry of Defense, Issue 1.
- Reyes, Tomás (2004), "Métodos Cualitativos de investigación, los grupos focales y estudio de caso".
- Saaty, T. L. (1980), "The Analytical Hierarchical Process", J Wiley, New York.
- Saaty, T. L. (1990) *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. European Journal of Operational Research. North-Holland; 48: 9-26.
- Tague, Nancy R. (1995), "The Quality Toolbox", ASQC Quality Press, Estados Unidos.
- The Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1995, June) Barge Model Resistance data Sheets.
- Toscano Hurtado, Gerard (2005), *El proceso de análisis jerárquico como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*, Lima.

# Nuestros autores

## **Luis Aranibar Campo**

Teniente de navío del Cuerpo Ejecutivo Ingeniero. Actualmente se desempeña como analista del Departamento de Arquitectura Naval, en la Dirección de Investigación Desarrollo e Innovación de Cotecmar. El artículo corresponde al resumen del trabajo presentado para optar al título de Ingeniero Naval de la Escuela Naval Almirante Padilla de Cartagena, en 2008.

## **Carlos Rodríguez Jaraba**

Ingeniero mecánico, investigador del Grupo de Energías Alternativas y Fluidos “Eolito” de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Autor de artículos y ponencias en el área de acondicionamiento de aire, entre los que se encuentra el *Diagnóstico energético de los sistemas de aire acondicionado y refrigeración de un buque tipo nodriza fluvial*.

## **Iván Castilla Hernández**

Ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Medellín, coinvestigador en el proyecto “Estudio de la soldabilidad de aceros microaleados para la reparación y construcción de buques” realizado por esa universidad y Cotecmar, con el apoyo de Colciencias. Se ha desempeñado como jefe de sección de soldadura de nuevas construcciones en Cotecmar. Actualmente ocupa el cargo de gerente de proyecto de nuevas construcciones en la misma empresa.

## **Marcos Salas Inzunza**

Magíster en Ciencias en Ingeniería Oceánica de la Universidad Federal de Río de Janeiro, y Ph. D. (Ship Science) de la Universidad de Southampton, Inglaterra. Consejero del Instituto Panamericano de Ingeniería Naval (bienio 2006-2007), director de la Escuela de Ingeniería Naval de la Universidad Austral de Chile (desde 2003), ha trabajado en investigaciones sobre hidroelasticidad y dinámica de estructuras navales y estabilidad dinámica de embarcaciones.



# Norma editorial a los autores para la presentación de trabajos

## Temática

La revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acepta para su publicación contribuciones originales a la ingeniería sobre temas relacionados con diseño de buques, hidrodinámica, dinámica del buque, estructuras y materiales, vibraciones y ruido, tecnología de la construcción naval, ingeniería marina, normativa y reglamentación, ingeniería oceánica e infraestructura portuaria, que sean resultado de proyectos de investigación científica y tecnológica. Cada artículo será sometido a consideración del Consejo Editorial de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, el cual decidirá acerca de la pertinencia de su publicación.

## Tipología

La revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acepta publicar artículos clasificados dentro de la siguiente tipología (Colciencias 2006):

- *Artículo de investigación científica y tecnológica.* Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- *Artículo de reflexión.* Documento que presenta resultados de investigación terminada desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
- *Artículo de revisión.* Documento resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.

## Formato

Todos los artículos deben ser remitidos al editor de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques* acompañados de una comunicación del autor con la solicitud de publicación. Cada artículo debe ser redactado utilizando procesador de texto Microsoft Word a espacio sencillo y enviarse en medio magnético. La redacción de artículos no debe exceder 9.000 palabras (7 cuartillas). El archivo debe contener todo el texto y cualquier tabulación y ecuaciones matemáticas; no deben incluirse gráficos en este archivo. Adicionalmente, deben crearse todas las ecuaciones matemáticas usando el Editor de Ecuaciones incorporado en Microsoft Word. No se deben incluir gráficos en el archivo de texto.

## Contenido

Cada artículo debe contener los siguientes elementos, los cuales deben aparecer en el mismo orden mostrado:

### Título

Debe ser conciso, con las palabras apropiadas para brindar al lector una idea somera del contenido del mismo.

### Autor y afiliaciones

El nombre del autor debe estar compuesto de la siguiente manera: nombre, inicial del segundo nombre y apellidos. Las afiliaciones del autor deben estar compuestas de la siguiente forma, y en el orden mostrado:

- Empresa o institución (incluyendo al departamento o división a la que pertenece).
- Dirección postal.
- Ciudad, (Provincia/Estado/Departamento).
- País.
- Teléfono, fax, y dirección electrónica.
- Debe especificarse el nombre y dirección electrónica de un autor corresponsal.

### **Resumen**

Es un escrito corto no mayor a ciento cincuenta (150) palabras que contiene el objetivo del trabajo, su alcance, y los resultados. Debe estar redactado de tal manera que en él aparezcan las ideas claves del documento.

### **Palabras claves**

Se deben identificar palabras y/o frases que faciliten la recuperación de ideas relevantes en un índice.

### **Introducción**

El texto debe ser expositivo, y en él deben predominar la claridad, sencillez, precisión y originalidad a la hora de presentar las ideas. Asimismo, debe estar organizado en una secuencia lógica de partes o secciones, con subtítulos que den claridad y guíen al lector. La primera parte del documento es la introducción cuyo objetivo es presentar el tema, los objetivos y una justificación de porqué se eligió. Igualmente, debe contener las fuentes consultadas y la metodología empleada así como una breve alusión al estado de la investigación si es del caso, y la forma como está estructurado el resto del artículo.

### **Cuerpo del artículo**

Consta de marco teórico que sustenta el estudio, el planteamiento del tema, el estado de la cuestión con su análisis, los resultados obtenidos y las conclusiones.

### **Ecuaciones, tablas, cuadros y gráficos**

Todos estos elementos deben estar enumerados por orden de aparición de acuerdo con su tipo y tener a pie es decir exactamente debajo del cuadro, gráfico o fotografía, la fuente de donde se tomaron los datos y quien lo elaboró.

Las ecuaciones se deben enumerar hacia el extremo derecho de la columna que lo contiene, en la misma línea y entre paréntesis. En el cuerpo del texto se deben referenciar como "(Ecuación x)". Cuando la referencia a una ecuación comienza una oración debe hacerse así: "La ecuación x".

Las ecuaciones deben ser escritas de manera que se pueda distinguir claramente las mayúsculas de las minúsculas, y tener cuidado para evitar confusiones

entre la "l" (ele) minúscula y el numeral uno, o entre el cero y la "o" minúscula. Todos los subíndices, superíndices, letras griegas, y otros símbolos deben estar indicados claramente. En todas las expresiones y los análisis matemáticos, debe explicarse cualquier símbolo (y la unidad en que se mide) no definido previamente en la nomenclatura. Si el trabajo es sumamente matemático en su naturaleza, puede ser recomendable desarrollar las ecuaciones y fórmulas en apéndices en vez de incluirlos en el cuerpo del texto.

Los gráficos (dibujos lineales, cuadros, fotografías, etc.) se deben enumerar de acuerdo con su orden de aparición, y tener una nota que incluya el número del gráfico entre paréntesis y una breve descripción. Al igual que las ecuaciones, en el cuerpo del texto se deben referenciar como "(Gráfico X)", y cuando la referencia a un gráfico comienza una oración debe hacerse así: "El Gráfico x".

Los cuadros, gráficos e ilustraciones, deben enviarse en formato de archivo vectorial modificable (Microsoft Excel, Microsoft PowerPoint y/o Microsoft Visio). Las fotografías, deben enviarse en archivos de formato Tif, separados del documento principal en una resolución mayor a 1000 dpi.

### **Notas de pie de página**

Se recomienda su uso cuando se requiera identificar información adicional. Se deben numerar en orden de aparición a lo largo del texto.

### **Reconocimiento**

Los reconocimientos se pueden hacer a personas o a instituciones de quienes se considera han hecho una contribución importante, y no han sido mencionados en otra parte del artículo.

## **Referencias bibliográficas**

### **Citas**

Pueden realizarse de dos formas: al final del texto citado, en cuyo caso se colocarán entre paréntesis el apellido del autor seguido de coma, el año de publicación seguido de coma y el número de la página, de la siguiente manera: "Con la modernidad

se inició un afán de exactitud, de precisión y de demostración ‘segura’ de todos los ámbitos de la vida humana” (Cianciardo, 2004, p. 30).

La otra forma es: Cianciardo (2004, p. 30) manifiesta que “Con la modernidad se inició un afán de exactitud, de precisión y de demostración ‘segura’ de todos los ámbitos de la vida humana”.

### Lista de referencias

La presentación de referencias bibliográficas a las fuentes originales para el material citado, se deben enumerar todas al final del artículo en orden alfabético y de acuerdo con los siguientes parámetros:

#### Libros

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguido de punto, entre paréntesis el año de publicación del libro seguido de coma, título de la publicación en bastardilla y sin comillas seguido de coma, ciudad donde se publicó seguido de coma, y nombre de la editorial sin abreviaturas como Ltda. S. A. ni la palabra “editorial”.

Forma básica:

Apellido, I. N. (año), *Título de la publicación*, Ciudad, Editorial.

Ejemplo:

Echeverry, J. C. (2002), *Las claves del futuro. Economía y conflicto en Colombia*, Bogotá, Oveja Negra.

El autor debe recordar que los títulos de los libros en inglés, a diferencia del español van con todas sus letras iniciales en mayúscula, salvo los conectores.

Por ejemplo:

Kirzner, I. M. (1996), *Perception, Opportunity and Profit*, Chicago, University of Chicago Press.

En caso de más de un autor se separan con comas y el último con “y” o “e” según el caso. Si son más de cuatro autores se pone el apellido e iniciales del primero y se escribe la abreviatura “et al.”.

#### De un autor corporativo

Se escribe completo el nombre de la entidad y se siguen las demás normas.

Forma básica:

Institución (año), Título de la publicación, Ciudad, editorial.

Ejemplo:

Fundación Compartir (2005), *Nuestros mejores maestros. Experiencias educativas ejemplares*, Bogotá, la Fundación.

Nótese que si la misma entidad es la que edita el libro, se repite, o se pone su sigla o acrónimo. En caso de que el trabajo lo haya hecho una empresa editorial diferente va como el primer ejemplo.

Cuando un libro o cualquier publicación tienen por autor una entidad estatal se pone primero el nombre del país.

Forma básica:

País, entidad estatal (año), *Título de la publicación*, Ciudad, Editorial.

Ejemplo:

Colombia, Departamento Nacional de Planeación (2003), *Construcción de un futuro para Colombia desde sus territorios*, Bogotá, DNP.

#### Artículo de revista

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguidos de punto, entre paréntesis el año y meses separados por un guión. Si la publicación especifica días, también se ponen. Sigue coma, el título del artículo en redondas y entre comillas sencillas, la palabra “en” seguida del nombre de la publicación en bastardilla y sin comillas, sigue coma, luego el año, el volumen, (si los hay) el número y las páginas que abarca el artículo.

Forma básica:

Apellido, I. N. (año, mes-mes), ‘Título del artículo’, en *Nombre de la publicación*, año, v, n.º xx, pp. yy-zz.

Ejemplo:

Samper, D. (2006, septiembre-noviembre), 'La lengua está quebrada... ¿con qué la curaremos?', en *Número*, n.º 50, pp. 30-32.

*Sin autor forma básica*

*Nombre de la publicación*, (año, fecha-fecha), 'Título del artículo', n.º xx, pp. yy-zz.

Ejemplo:

*Semana* (2006, 31 de julio-7 de agosto) 'Odisea en La Macarena', n.º 1.265, pp. 40-43.

### Trabajo de grado

Apellido del autor seguido de coma, inicial(es) de nombre(es) seguido de punto, entre paréntesis el año que presentó o sustentó la tesis seguido de coma, título del trabajo en bastardilla y sin comillas seguido de coma; entre corchetes y en minúscula se escribe el tipo de trabajo (monografía de grado, tesis de maestría, etc.), sigue coma, ciudad donde está la universidad seguida de coma, nombre completo de la universidad seguido de coma y nombre completo de la carrera.

Forma básica:

Apellido, I. N. (año de sustentación), *Título del trabajo*, [tipo de trabajo], Ciudad, Universidad, Programa académico.

Ejemplo:

Salazar, N. (2006), *Inseminación artificial en jaguares*, [trabajo de grado], Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Carrera de Veterinaria.

### Internet

Apellido del autor seguido de coma, inicial del nombre seguido de punto, entre paréntesis el año de publicación, es decir, cuando se "colgó" en la red (si lo hay) seguido de coma, título en redondas y comilla sencilla seguido de coma, entre corchetes la expresión "en línea" seguido de coma, la expresión "disponible en" con dos puntos, la dirección com-

pleta de la página, sigue coma, la palabra "recuperado" seguida de dos puntos y la fecha completa de cuando se consultó.

Forma básica:

Apellido, I. N. (año), 'Título del artículo', [en línea], disponible en: <http://www.direccioncompleta.com>, recuperado: dd de mes de año.

Ejemplo:

*Semana* (2006, 11 de noviembre), 'Conocer la sociedad nacional en su reinado', [en línea], disponible en: [http://www.semana.com/wf\\_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125](http://www.semana.com/wf_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125), recuperado: 5 de mayo de 2007.

### Aceptación

Los artículos deben ser remitidos al editor de la revista Ciencia & Tecnología de Buques por correo electrónico a [revista@cytbuques.com](mailto:revista@cytbuques.com), o en CD a la dirección postal de la revista, acompañado de la "Declaración de originalidad del trabajo escrito" que se incluye en esta revista. De su recibo se informará por correo electrónico al autor. Los comentarios y las evaluaciones hechas por parte de la revista se mantendrán confidenciales. La recepción de artículos por parte de la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, no constituye necesariamente su aceptación para publicarlo. Si un artículo no es aceptado, será devuelto a su respectivo autor.

Las opiniones y declaraciones expresadas por los autores en los artículos son responsabilidad exclusiva de estos y no de la revista. La aceptación de artículos otorga a la revista *Ciencia & Tecnología de Buques* los derechos de impresión y reproducción sobre estos, no obstante, será atendida cualquier petición razonable por parte del autor para obtener permiso de reproducción de sus contribuciones.

# Editorial Regulations for Authors

## Thematic

The *Ship Science and Technology* Magazine accepts for publication original engineering contributions on ship design, hydrodynamics, dynamics of ships, structures and materials, vibrations and noise, technology of ship construction, marine engineering, standards and regulations, oceanic engineering and port infrastructure, results of scientific and technological researches. Every article shall be subject to consideration of the Editorial Council of *The Ship Science and Technology* Magazine deciding on pertinence of its publication.

## Typology

The *Ship Science and Technology* Magazine accepts publishing articles classified within following typology (Colciencias 2006):

- *Scientific and technological research article.* Document presenting detailed original results of finished research projects. Generally, the structure used contains for important parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- *Reflection Article.* Document presenting results of a finished research as of an analytical, interpretative or critical perspective of author, on a specific theme, resorting to original sources.
- *Revision Article.* Document resulting from a finished research in the field of science or technology in which published or unpublished results are analyzed, systemized and integrated in order to present advances and development trends. It is characterized for presenting an attentive bibliographic revision of at least 50 references.

## Format

All articles must be sent to editor of *The Ship Science and Technology* Magazine accompanied by a letter from author requesting its publication. Every article must be written in Microsoft word processor in single space and sent in magnetic form. Articles must not exceed 9,000 words (7 pages). File must contain all text and any tabulation and mathematical equations; this file must not contain graphs. Additionally, all mathematical equations must be made in Microsoft Word Equations Editor. File must not include graphs.

## Content

All articles must contain following elements that must appear in the same order as follows:

### Title

It must be concise with appropriate words so as to give reader a slight idea of content.

### Author and Affiliations

Author's name must be written as follows: name, initial of second name and surnames. Affiliations of author must be specified in following way and order:

- Business or institution (including department or division to which he/she belongs).
- Mail address.
- City (Province/State/Department).
- Country.
- Telephone, fax and e-mail.
- Specify name and e-mail of correspondent author.

### **Summary**

Short essay of no more than one hundred fifty (150) words specifying content of work, scope and results. It must be written in such a way so as to contain key ideas of document.

### **Key Words**

Identify words and/or phrases that help recover relevant ideas in an index.

### **Introduction**

Text must be explanatory, clear, simple, precise and original in presenting ideas. Likewise, it must be organized in a logic sequence of parts or sections, with clear subtitles that guide reader. The first part of document is the introduction. Its objective is to present the theme, objectives and justification of why it was elected. Likewise, it must contain sources consulted and methodology used as well as a short explanation of status of research if it were the case and form in which the rest of article is structured.

### **Body Article**

It is made up of the theoretical framework supporting the study, statement of theme, status of its analysis, results obtained and conclusions.

### **Equations, Tables, Charts and Graphs**

All of these elements must be numbered in order of appearance according to its type and have at the foot, that is, exactly underneath of chart, graph or picture, the source from where data was taken and who made it.

Equations must be numbered on the right hand side of column containing it, in the same line and in parenthesis. Body of text must make reference of it as "(Equation x)". When the reference starts a sentence it must be made as follows: "Equation x".

Equations must be written so that capital letters can be clearly differentiated from small letters. Avoid confusions between letter "l" and number one or between zero and small letter "o". All subindexes, superindexes, Greek letters and other symbols must be clearly indicated.

All expressions and mathematical analysis must explain all symbols (and unit in which it is measured) that have not been previously defined in the nomenclature. If work is extremely mathematical by nature, it would be advisable to develop equations and formulas in appendixes instead of including them in body of text.

Graphs (lineal drawings, tables, pictures, etc.) must be numbered according to order of appearance and should include the number of graph in parenthesis and a brief description. As with equations, in body of text, reference as "(Graph X)", and when reference to a graph is the beginning of a sentence it must be made as follows: "Graph x".

Charts, graphs and illustrations must be sent in modifiable vector file format (Microsoft, Excel, Microsoft Power Point and/or Microsoft Visio). Pictures must be sent in Tif format files, separate from main document in a resolution higher than 1000 dpi.

### **Foot Notes**

We recommend their use as required to identify additional information. They must be numbered in order of appearance along the text.

### **Acknowledgment**

Acknowledgments may be made to persons or institutions considered to have made an important contribution and not mentioned in any other part of the article.

## **Bibliographic References**

### **Quotations**

They may be made in two ways: at the end of text, in which case last name of author followed by a comma, year of publication followed by a comma and number of page, in the following manner:

"With modernity there was eagerness for accuracy, preciseness and 'clear' demonstration of all human life scopes" (Cianciardo, 2004, p.30).

The other way is:

Cianciardo (2005, p.30) manifests that “With modernity there was eagerness for accuracy, preciseness and ‘clear’ demonstration of all human life scopes”.

### List of References

Bibliographic references of original sources for cited material must be numbered at the end of article in alphabetical order and according to following parameters:

#### Books

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name followed by a period, the year of publication of book in parenthesis followed by a comma, title of publication in italics and without quotation marks followed by a comma, city where published followed by a comma and name of editorial without abbreviations such as Ltd., Inc. or the word “editorial”.

*Basic Form:*

Last name, I.N. (Year), *Las claves del futuro. Economía y conflicto en Colombia*, Bogota, Oveja Negra.

Author must remember that differently from Spanish, titles of books in English have all initial letters in capital letters, except for connectors. For example:

Kirzner, I.M: (1996), *Perception, Opportunity and Profit*, Chicago, University of Chicago, Press.

In the event of more than one author, separate by commas and the last one by an “and”. If there are more than four authors write the last name and initials of first author and then the abbreviation “et al.”.

*If a corporate author*

Write complete name of entity and follow the other standards.

*Basic form:*

Institution (year), *Title of publication*, city, editorial.

*Example:*

Fundacion Compartir (2005), *Nuestros mejores maestros. Experiencias educativas ejemplares*, Bogota, la Fundación.

Please note that if it is the same entity who edits book, you repeat name or write its abbreviation by initials or acronym. In the event that work has been made by a different editorial, follow the first example.

When book or any publication have as author an entity pertaining to the state, write name of country first.

*Basic form:*

Country, entity pertaining to the state (year), *Title of publication*, City, Editorial.

*Example:*

Colombia, Departamento Nacional de Planeación (2003), *Construcción de un futuro para Colombia desde sus territorios*, Bogota, DNP.

#### Magazine Article

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year and months separated by a hyphen in parenthesis. If publication specifies days write them too, followed by a comma, title of article in round letters and with simple quotation marks, the word “in” followed by name of publication in italics and without quotation marks, followed by a comma and then the year, volume (if any) number and pages of article.

*Basic form:*

Last name, I.N. (year, month-month), ‘Title of article’, in *Name of publication*, year, v, n.º, xx, pp. yy-zz.

*Example:*

Samper, D. (2006, September-November), ‘La lengua esta quebrada... ¿con que la curaremos?’, in *Number*, n.º 50, pp. 30-32.

*Without author. Basic form*

*Name of publication*, (year, date-date), ‘Title of article’, n.º xx, pp. yy-zz.

*Example:*

*Semana* (2006, July 31-August 7) 'Odisea en La Macarena', n.º 1.265, pp. 40-43.

### Graduation Work

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year when thesis was defended in parenthesis followed by a comma, title of work in italics and without quotation marks followed by a comma; between brackets and in small letters write the type of work (graduation monograph, master's degree thesis, etc.), followed by a comma, city where university is located followed by a comma, complete name of university followed by a comma and complete name of career.

*Basic form:*

Last name, I.N. (year when defended), *Title of work*, [type of work], City, University, Academic Program.

*Example:*

Salazar, N. (2006), *Inseminación artificial en jaguares*, [type of work], Bogota, Universidad Nacional de Colombia, Veterinary Career.

### Internet

Last name of author followed by a comma, initial(s) of name(s) followed by a period, year of publication in parenthesis followed by a comma, that is, when it was "put up" in the network (if there is one) followed by a comma, title of work in round letters and simple quotation marks followed by a comma, "on-line" in between brackets followed by a comma, the expression "available at" with colon, complete address of page, followed by a comma, the word "recovered" followed by a colon and complete date when it was looked up.

*Basic form:*

Last name, I.N. (year), 'Title of article', [on-line], available at: <http://www.direccion completa.com>, recovered: day of month of year.

*Example:*

*Semana* (2006, November 11), 'Conocer la sociedad nacional en su reinado', [on-line], available at: [http://www.semana.com/wf\\_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125](http://www.semana.com/wf_InfoArticulo.aspx?IdArt=98125), recovered: 5 November of 2007.

### Acceptance

Articles must be sent by e-mail to editor of *The Ship Science and Technology Magazine* to [revista@cytbuques.com](mailto:revista@cytbuques.com) or in CD to mail address of magazine, accompanied of the "Declaration of Originality of Work Written" included in this magazine. Author shall receive acknowledgement of receipt by e-mail. Comments and evaluations made by the magazine shall be kept in confidentiality. Receipt of articles by *The Ship Science and Technology Magazine* does not necessarily constitute acceptance for publishing. If an article is not accepted it shall be returned to the respective author.

Opinions and declarations stated by authors in articles are of their exclusive responsibility and not of the magazine. Acceptance of articles grants *The Ship Science and Technology Magazine* the right to print and reproduce these; nevertheless, any reasonable petition by author to obtain permission to reproduce his/her contributions shall be attended.

### Declaración de originalidad del trabajo escrito

Título del trabajo que se presenta

---

---

---

Por medio de esta comunicación, certifico que el trabajo que presento para posible publicación en la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, de la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítma y Fluvial Cotecmar, es de mi entera autoría, ya que sus contenidos son producto de mi directa contribución intelectual. Todos los datos y referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

Por todo lo anterior declaro que todos los materiales presentados para posible publicación están totalmente libres de derechos de autor y, en consecuencia, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con Derechos de Propiedad Intelectual.

En caso de que el artículo sea elegido para ser publicado por la revista *Ciencia & Tecnología de Buques*, manifiesto que cedo plenamente a la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítma y Fluvial Cotecmar los derechos de reproducción del mismo. Como contraprestación de la presente cesión, declaro mi conformidad de recibir cinco ejemplares del número de la revista donde aparezca mi artículo.

Para constancia de lo anteriormente expuesto, se firma esta declaración a los \_\_\_\_\_ días, del mes de \_\_\_\_\_, del año \_\_\_\_\_, en la ciudad de \_\_\_\_\_.

Nombre y firma:

Documento de identificación:

---

---



# CIENCIA & TECNOLOGÍA DE BUQUES SHIP SCIENCE & TECHNOLOGY

## Statement of Originality of Written Work

Title of work submitted

---

---

---

I hereby certify that work submitted for publication in The *Ship Science and Technology* magazine, of Science and Technology for the Development of Naval, Maritime and Riverine Industry Corporation, Cotecmar, was written by me, given that its content is product of my direct intellectual contribution. All data and references to material already published are duly identified with its respective credit and included in the bibliographic notes and quotations highlighted as such.

I therefore declare that all materials submitted for publication are completely free of copyrights; consequently, I make myself responsible for any lawsuit or claim related with Intellectual Property Rights thereof.

In the event that article is chosen for publication by The *Ship Science and Technology* magazine, I hereby state that I totally transfer reproduction rights of same to Science and Technology for the Development of Naval, Maritime and Riverine Industry Corporation, Cotecmar. In retribution for present transfer I agree to receive five issues of the magazine where my article is published.

In witness thereof, I sign this statement on the \_\_\_\_\_ day of the month of \_\_\_\_\_ of year \_\_\_\_\_, in the city of \_\_\_\_\_.

Name and signature:

Identification document:

---

---



