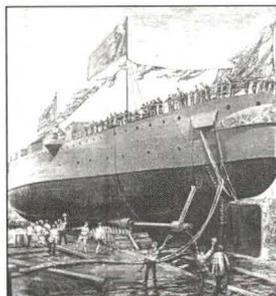


MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION DE BUQUES

Raúl Ortúzar Maturana *



Antes de 1850 el principal material para la construcción de buques, puentes y otras estructuras era la madera. Es así como en los siglos XVIII y XIX, los buques de

madera tenían una vida útil de 50 años o más. Pero, desde el punto de vista de los materiales, sus cascos poseían escasa resistencia a la tracción y compresión, y estaban expuestos a gran desgaste y/o deterioro. Es así como el cambio de gran cantidad de madera estaba en manos de los carpinteros de ribera en tierra o del carpintero de a bordo.

A mediados del siglo XIX, los cascos de hierro desplazaron a los de madera debido al gran desarrollo de la industria siderúrgica surgido como consecuencia de importantes logros tecnológicos. A su vez éste fue substituido por el acero a partir de 1880, material que corresponde a una aleación de hierro y carbono más otros elementos aleantes. El acero tiene las ventajas de tener un bajo costo, ductilidad, resistencia mecánica, adecuadas dimensiones, facilidad para trabajar y buenas condiciones para unir con remaches o soldadura; lo anterior, permite el laminado en frío o en caliente para la producción de planchas entre otros procesos de conformado.

En un comienzo, su principal desventaja era su baja resistencia a la corrosión, por lo

que no es accidental que varias de las principales compañías fabricantes de pinturas se establecieron con la producción del acero, las cuales no solamente ofrecieron productos anticorrosivos, sino también antincrustantes, ya que eran problemas que se agravaron con los cascos ferrosos.

A partir de entonces otros materiales de construcción han sido desarrollados, pero es el acero el que más amplia variedad de aplicaciones posee tanto en buques como en grandes estructuras. El acero ha reinado supremamente durante una centuria como el único material importante para construcción de buques de travesía, siendo la madera todavía empleada para embarcaciones pequeñas tal como en las embarcaciones de pesca; y las aleaciones de aluminio para embarcaciones de alta velocidad, en las cuales la reducción del peso del casco es primordial en la relación peso-potencia.

Por otra parte, otro material ha sido desarrollado para la construcción de cascos, como es la fibra reforzada, cuya aplicación está limitada para buques menores a 60 metros de eslora. Sus aplicaciones varían desde buques anti-minas, en las cuales sus propiedades no magnéticas son importantes, a yates y/o embarcaciones de placer masivamente construidas.

En esta última década se ha introducido en la construcción de submarinos de alta profundidad, especialmente de investigación, cascos de presión de titanio, de forma esférica, principalmente, por su mejor resistencia al colapso.

* Capitán de Corbeta, Ingeniero Naval Mecánico. Magíster en Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.

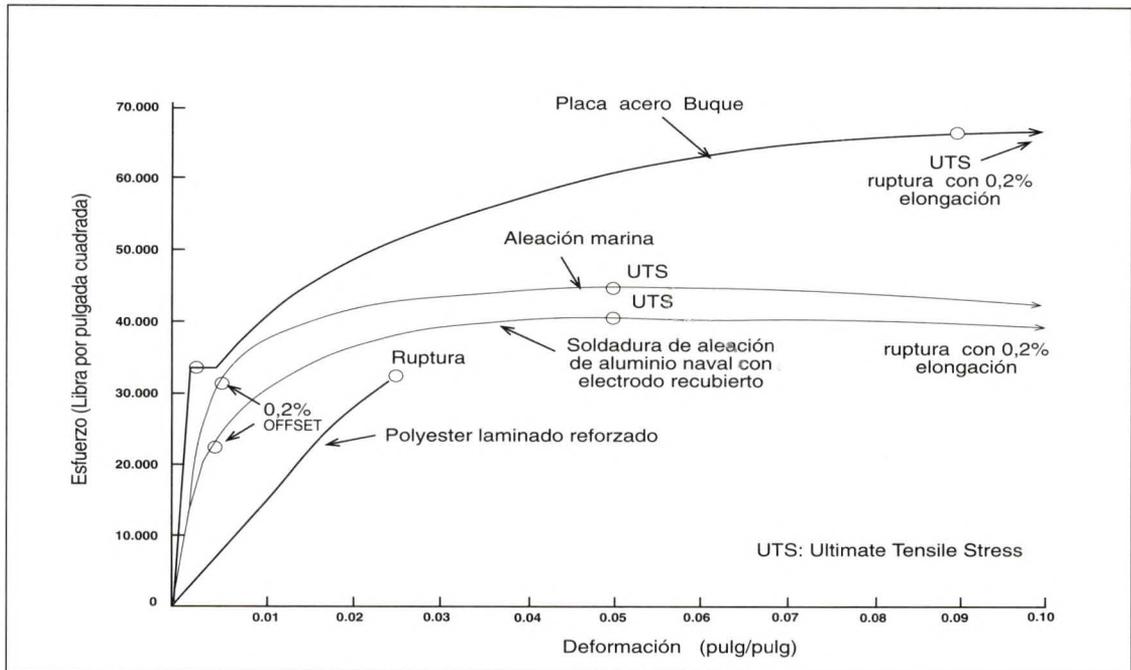


Gráfico 1: Curva de esfuerzo-deformación materiales de uso naval

Las características de esfuerzo-deformación de un ensayo de tracción de alguno de los materiales empleados en construcción

de cascos se visualizan en el gráfico 1. A su vez el desarrollo en el tiempo de la implementación de tales materiales se visualiza claramente en el gráfico 2.

Año	Acontecimiento	Material Buque
1776 1800	Independencia USA	MADERA
1776	Guerra Civil USA	HIERRO
1900	I. Guerra Mundial	ACERO
1950	II. Guerra Mundial	ALUMINIO
	Guerra Vietnam	TITANIO
2000	Guerra del Golfo	TITANIO

Gráfico 2: Desarrollo de los materiales empleados en construcción naval.

Inicio de Estructuras navales soldadas.

A comienzos de la década de los años 40, EE.UU. inició, por primera vez, la producción en serie de barcos soldados, llamados clase Liberty, ante la urgente necesidad de construir buques para la guerra. Hasta entonces, si bien la técnica de unión por soldadura de planchas era de regular dominio, no ocurría lo mismo con el diseño y fabricación de las grandes estructuras soldadas y poco o nada era lo que se sabía acerca de sus características de fractura.

Es así como la construcción de los primeros buques de acero soldados, después de una época de cascos remachados, trajo consigo serios problemas estructurales por la aparición de grandes grietas que colapsaban la estructura, situaciones que fueron atribuibles a fractura frágil, o que simplemente agrietaban cubiertas y mamparos sin una explicación clara de lo ocurrido.

Las catastróficas fallas comenzaron en el invierno de 1942 y 1943, teniendo un saldo, al final de la II Guerra Mundial y después de la construcción de más de 5000 buques, de 250 buques fracturados totalmente, 20 se partieron literalmente en dos y en 1000 de ellos se detectaron más de 1300 fallas estructurales de variada magnitud. Se debe considerar que muchos de esos barcos tenían menos de 3 años desde su construcción.

Se pensaba que el incremento del porcentaje de carbono en los aceros era el más económico e importante elemento de aleación requerido para alcanzar altas propiedades de resistencia en el acero. Sin embargo, éste aumento, como veremos más adelante, afecta sensiblemente las propiedades de soldabilidad del acero y muy especialmente la tenacidad de éste; o sea la capacidad para resistir mayor cantidad de esfuerzo sin deformarse plásticamente.

Los informes y textos que detallan y explican estos grandes defectos son innumerables, concluyendo que las principales razones fueron:

1. Diseño inadecuado de uniones, lo que produjo concentradores de esfuerzos.
2. Fracturas producidas por el comportamiento frágil del acero a baja temperatura.
3. Defectos en la soldadura.
4. Geometría inadecuada de los detalles en el diseño de las soldaduras.

El origen de las fallas de acuerdo con la investigación estadística de fallas de buques americanos durante la II Guerra Mundial, alrededor del 50% de las fallas fueron originadas por discontinuidades estruc-

turales, incluyendo vértices en ángulo recto, extremos de quillas laterales, etc. Alrededor del 40% de las fallas comenzaron desde defectos de soldadura tales como grietas superficiales del cordón, grietas bajo cordón y deficiente unión de la soldadura con el metal base. El remanente 10% son atribuidos a defectos metalúrgicos del acero tales como zonas afectadas térmicamente por la soldadura y ranuras en los extremos de los bordes de planchas. En otras palabras todas las fallas originadas en ranuras son causadas por concentraciones severas de esfuerzos.

Además, de que los factores de seguridad convencionales eran basados en las propiedades del esfuerzo máximo UTS (Ultimate tensile strength) del acero, que el valor máximo en un ensayo de tracción y que era hasta ese momento empleado satisfactoriamente. Luego, no se consideraba los modos de fractura ni los concentradores de esfuerzos.

En 1948, la American Bureau of Shipping especificó como resultado de las primeras investigaciones requerimientos de pruebas de impacto para aceros de buques y procedimientos de fabricación; siendo las pruebas de impacto una medida de la capacidad de un material para resistir un impacto que suele llamarse tenacidad. Al mismo tiempo se especificaron técnicas de soldadura y especificaciones para minimizar los defectos. Como resultado de estas modificaciones en los diseños, materiales y fabricación, el número de fracturas frágiles ocurridas en estructuras soldadas o parcialmente soldadas en la posguerra disminuyó drásticamente, pero no desapareció completamente.

Aceros de alta resistencia.

Los aceros de bajo carbono han sido utilizados en múltiples aplicaciones; sin embargo, los aceros de alta resistencia (high-strength) han experimentado un significativo aumento de sus usos. En el gráfico 3 se muestra como los esfuerzos de fluencia de los aceros empleados en la construcción de

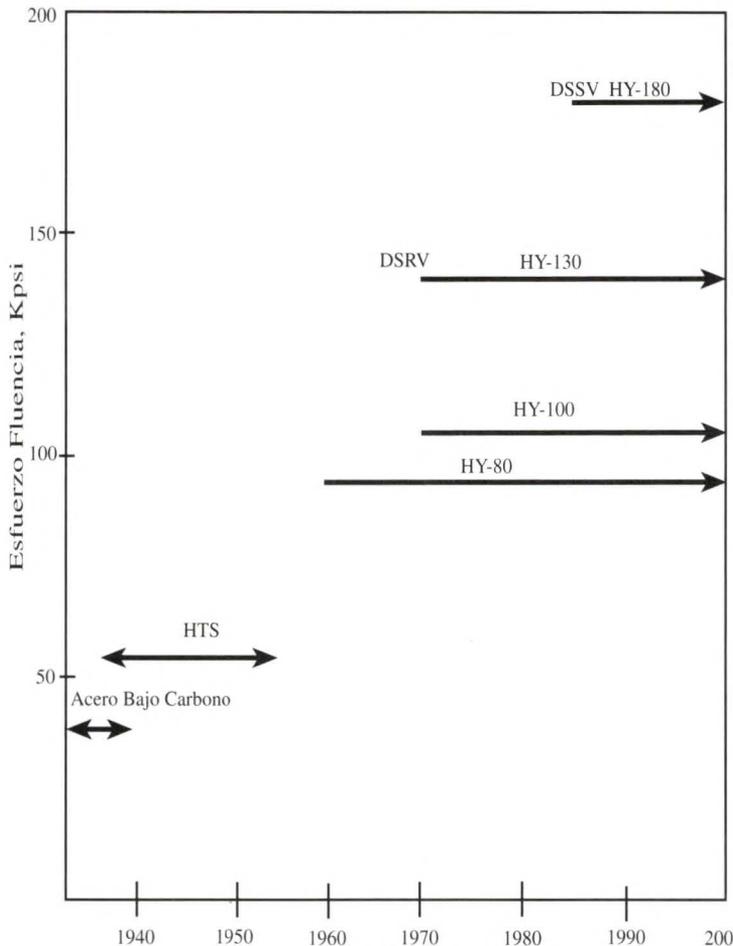


Gráfico 3: Aceros en la construcción de submarinos.

los submarinos en la U.S. Navy, se ha incrementado significativamente.

Los aceros de alta resistencia más corrientes de que hoy se dispone para construcción naval incluye los HTS, HY-80 y HY-100. Debido a que el HY-80 fue el primer acero que superó a los denominados HTS y en cierto modo constituye el punto de referencia para los aceros modernos, resulta interesante describir brevemente su historia.

Anterior a 1940, los submarinos de combate eran ampliamente fabricados con aceros de bajo carbono, un material con límites de fluencia de alrededor de 32.000 psi

(22,4 Kg/mm²). Entre 1940 y 1958 los aceros de resistencia a la tracción (HTS), de aleación carbono manganeso con 50.000 psi (35,2 Kg/mm²), fueron los más utilizados en estructuras de submarinos.

En 1958 el acero HY-80, templado y revenido con una fluencia mínima de 80.000 psi, 56.2 (kg/mm²), fue introducido por primera vez en los cascos de submarinos. Años más tarde el HY-100, acero con 100.000 psi, 70,3 (Kg/mm²), de esfuerzo de fluencia mínimo y muy similar al HY-80 fue introducido. Hoy en día el HY-80 y el HY-100 son los aceros básicos de fabricación para casco de submarinos.

El punto de referencia del desarrollo del HY-80 lo representa un acero fabricado por la Krupp a comienzos de siglo, que consideraba la adición de níquel y cromo para aumentar la resistencia. El HY-80 adicionalmente contempla un proceso de templado y revenido (Q & T) donde la combinación de los elementos de aleación contribuye a balancear su alta resistencia compatible con una buena tenacidad. El contenido de manganeso está destinado a control de los sulfuros y el molibdeno a minimizar la fragilización por temple. El níquel se utiliza para aumentar la tenacidad del acero. Además, el efecto combinado del níquel y el molibdeno contribuyen a mejorar su templeabilidad.

En 1951 se construyó el primer buque de guerra con HY-80 el USS *Albacore*, y en 1952 lo sigue el USS *Forrestal*. A partir de 1956, comienza una amplia aplicación del HY-80, sin embargo en 1958 y en los años siguientes varias fallas en las soldaduras fueron detectadas, que hicieron recomendables

los submarinos en la U.S. Navy, se ha incrementado significativamente.

disponer de precauciones especiales en el control de tales defectos.

De esta manera el panorama en el desarrollo de los aceros de alta resistencia para construcción naval muestra la siguiente cronología, al menos en el caso de sumergibles, que serán lo más representativo en exigencias para estos aceros.

El otro acero en esta línea es el HY-130, llamado originalmente HY-140; sin embargo, más tarde se descubrió que sólo podía garantizar 130.000 psi, 91,4 (Kg/mm²), de fluencia cuando se utiliza en estructuras soldadas.

En 1969, el primer vehículo de rescate submarino para grandes profundidades, DSRV, fue fabricado por la Lockheed Missile and Space Co., usando el HY-130. Este vehículo es capaz de descender hasta profundidades de 1800 mts. (6.000 pies). Es así como la Armada estadounidense ha planificado el empleo del acero HY-130 para la construcción de nuevos submarinos; también, ha desarrollado un vehículo de investigación, DSSV, capaz de descender 6100 mts. (20.000 pies) con un acero en HY-180.

Las aplicaciones de aceros de alta resistencia a estructuras comerciales, incluidos buques, puentes y vasijas de presión, ha ocurrido desde hace varios años, estando la mayoría de estas aplicaciones limitada a valores de esfuerzo de fluencia bajo 120.000 psi, 84,4 Kg/mm². Sin embargo, la aplicación más corriente de estos tipos de acero, templados y revenidos, está limitada a aceros navales como HY-80 y HY-100 y otros comerciales como ASTM A 514/517, teniendo estos aceros una excelente resistencia a la fractura a bajas temperaturas.

En contraposición a estos aceros templados y revenidos, que basan su alta resistencia en una estructura de tipo Martensítica surgen los aceros de tipo Ferrítico, de características fácilmente soldables. Estos aceros denominados HSLA tienen potencialmente la misma o mejor resistencia y tenacidad que los HY, pero son obtenidos por una combinación de acero altamente limpio, cantidades pequeñas y seleccionadas de elementos

microaleantes (0.15%), siendo el cobre y el níquel sus principales componentes de aleación.

El resultado ha sido, que a causa de su bajo contenido de carbono, son extremadamente soldables sin las exigencias y restricciones que se requiere para el HY. La clave de su ventaja está en que no requiere precalentamiento previo, estimándose que la reducción de costo sólo por este concepto alcanza entre US\$ 0.40 a US\$ 0.90 por libra.

Es así como se desarrolló un acero denominado HSLA-80, un material que obtiene sus propiedades por endurecimiento de precipitación en lugar de aquellos más convencionales templados y revenidos. Como resultado de un intensivo programa conducente a caracterizar sus propiedades y determinar los procesos límites para una soldadura exitosa, el HSLA-80 fue utilizado en la construcción de cruceros de la clase "Ticonderoga".



Crucero "Ticonderoga".

Requerimientos en la selección de los materiales.

A continuación se enumeran las propiedades de los materiales más importantes de los miembros resistentes de la estructura de un buque:

- a) Relación Resistencia v/s peso: El peso específico de un material es frecuentemente una característica crítica, así el

peso estructural es una de las de mayor consideración en el diseño. En muchos casos, esto no es así absolutamente sino que también la razón resistencia/peso, representada por la relación entre el esfuerzo de fluencia del material y el peso específico de éste. Este parámetro es usualmente empleado en casos en donde se desea mantener un cierto nivel de resistencia mecánica para un mínimo peso estructural.

- b) Tenacidad a la fractura: Corresponde a la habilidad del material para absorber energía de deformación plástica antes de fracturarse. Este factor comienza a ser un problema crítico cuando una estructura está sometida a bajas temperaturas.
- c) Resistencia a la Fatiga: Cargas las cuales no causan fractura en una simple aplicación pueden resultar en fractura cuando son aplicadas repetidamente. El mecanismo de falla por fatiga es complejo pero básicamente involucra la iniciación de pequeñas grietas, usualmente en la superficie y el subsecuente crecimiento bajo el mecanismo de repetición de cargas.
- d) Resistencia a la corrosión: Los materiales usados en componentes estructurales expuestos al agua de mar y otros ambientes deben tener una adecuada resistencia al inicio de la corrosión. La corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con el ambiente. El agrietamiento por corrosión esfuerzo es por otra parte la fractura del material bajo la presencia de ambos, esfuerzo y ciertos ambientes nocivos.
- e) Otras propiedades: Otras características del material que deben ser consideradas son:
 - Fácil fabricación.
 - Soldabilidad.
 - Durabilidad.

- Mantenimiento.
- Confiabilidad.
- Costo.

Factores de diseño en la selección de materiales.

Paralelamente al desarrollo de los aceros utilizados en buques comerciales, la industria naval ha tenido su propio desarrollo. En este caso, como ningún otro, el peso de la estructura de un barco es un elemento crítico en el diseño. Para obtener la máxima eficiencia de la planta propulsora de un buque el peso debe ser optimizado. Por otra parte, las mejoras tecnológicas permanentes en sus sistemas de armas, puede originar que el equipo instalado sobre un buque deba ser alterado o reemplazado con nuevos diseños. El factor primario a considerar en este tipo de análisis de reemplazo es el impacto que ello pueda tener sobre el desplazamiento del buque.

Así, si un nuevo sistema implica un aumento de peso, de manera tal, que requiera una reducción de éste en el diseño, entonces la fuente más importante para reducción del desplazamiento incrementado será el reemplazo de materiales de baja resistencia por otros de menor espesor y altamente resistentes.

El objeto al cual se orienta en general el desarrollo de aceros para construcción naval es reducir el costo de construcción a través de un mejoramiento de los procesos de soldadura, los materiales, la tecnología y los procedimientos; mientras, simultáneamente, se mejora la calidad, resistencia y tenacidad del acero. Específicamente, existen cuatro problemas que podríamos denominar genéricos dentro de este campo y son:

- a) La soldadura representa un alto costo tanto en proceso como en mano de obra.
- b) La mano de obra calificada del soldador suele ser escasa o muy competitiva.
- c) Los aceros de alta resistencia requieren mayores habilidades y toleran pocos defectos en las soldaduras.

Tipo	30.000 a 49.000 Esfuerzo de fluencia Min.					50.000 a 79.000 Esfuerzo de fluencia Min.					
	ABS Class B	ASTM A-255 Grade A	ASTM A-242	ASTM A-441	MIL-S- 16113C Grade HT	CA C-Mn.	ASTM A-302 Grado B	C.M.V. (o Cb.)	C-Mn-V (o Cb.)	CB C-Mn	MIL-S- 13326 70.000
Composición											
Carbon, %	0,21	0,18	0,22	0,22	0,18	0,22	0,23	0,24	0,24	0,20	-
Manganeso, %	0.80-1.10	1,45	1,25	1,25	1,30	1,35	1.15-1.50	1,40	1,40	1,40	-
Fósforo, %	0,05	0,035	-	0,04	0,04	0,040	0,035	0,040	0,040	0,040	0,040
Sulfuro, %	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,040	0,040	0,050	0,050	0,050	0,040
Silicio, %	-	0.15-0.30	-	0.030	0.15-0.35	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30	0.15-0.30	-
Cromo, %	-	-	-	-	0.15	-	-	-	-	-	(a)
Niquel, %	-	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-
Molibdeno, %	-	-	-	-	0.06	-	0.45-0.60	-	-	-	-
Vanadio, %	-	0.08-0.14	-	0.02 (b)	0.02 (b)	-	-	0.02 (b)	0.02 (b)	-	-
Cobre, %	-	-	-	0.02 (b)	0.35	-	-	-	-	-	-
Titanio, %	-	-	-	-	0.005	-	-	-	-	-	-
Tratamiento Térmico	laminado	laminado	laminado	laminado	laminado	laminado	laminado	laminado	laminado	Q & T	Q & T
Resist. Tracción min., psi	58,000	70,000	67,000	67,000	80,000 (c)	70,000	80,000	65,000	70,000	80,000	90,000
Esfuerzo Fluencia min., psi	32,000 (c)	40,000	46,000	46,000	47,000	50,000	50,000	50,000	55,000	60,000	70,000
Elongación (in 8 in.) %	28	17	19	19	20	19	15	18	15	19	17
Approx. NTD range, °F	-20° a +40°	+20° a +90°	-20° a +40°	0° a +70°	-60° +20°	-10° a +40°	-20° a +50°	-60° a +30°	-40° a +40°	-75° a -40°	-65° a -30°
Soldabilidad	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Especial	Especial	Especial	Buena	Especial
Espesor disponible, in.	1/2" - 1"	3/16" - 4"	3/16" - 4"	3/16" - 4"	Sin Límite	3/16" - 1.1/4"	1/4" min	3/16" - 1.1/2"	3/16" - 1.1/4"	3/16" - 4"	3/16" - 2"
Costo relativo	1	1.77	1.20	1.20	1.67	1.12	1.77	1.12	1.15	1.43	1.80

(a) Puede variar dependiendo del proveedor (b) Mínimo (c) Máximo Q & T: Templado y revenido

Tabla 1: Composición química y propiedades de algunos aceros estructurales, bajo 80.000 psi.esf.fluencia.

d) Los aceros de alta resistencia son caros y en ocasiones difíciles de obtener.

Aceros estructurales.

Por muchos años el acero ASTM A7 fue el acero al carbono básico y fue producido para un esfuerzo de fluencia mínimo igual a 33.000 psi para estructuras soldadas. También el acero ASTM A373, con un esfuerzo de fluencia mínimo de 32.000 psi, fue frecuentemente usado. En 1960 el acero ASTM A36 fue introducido con un esfuerzo de fluencia de 36.000 psi e IMPROVED soldabilidad que el acero A7. Con respecto a los buques de guerra de los Estados Unidos, éstos fueron construidos de acuerdo a especificaciones militares.

Igualmente, la sociedad clasificadora American Bureau of Shipping, ABS, reguló los requerimientos de aceros para buques en reglas, clasificando a los aceros

en grados. Para los aceros de bajo carbono como: A, B, D, E, DS y CS; y para aceros de alta resistencia como: AH32, DH32, EH32, AH36 y EH36. Las características químicas y mecánicas se pueden encontrar en "Analysis of Welded Structures", citado en la bibliografía. La Tabla 1 muestra un listado de varios aceros usados en estructuras de buques que tienen un esfuerzo de fluencia menores a 80.000 psi y en la Tabla 2, los aceros de más de 120.000 psi de esfuerzo de fluencia.

Conclusiones.

En los últimos 40 años se ha extendido el uso de aceros de alta resistencia en la construcción de buques, siendo utilizado especialmente en los buques más grandes, pero que requieren de normas más específicas de diseño y construcción.

Asimismo, muchas normas de construcción y especificaciones de los aceros han debido revisarse e incorporarse en el

Tipo	Grados de Propiedad	MIL-S-16216 HY-80	ASTM A-543 Clase 1	ASTM A-543 Clase 2	ASTM A-517-67	MIL-S-13326 Clase 90	MIL-S-16216 HY-100	MIL-S-13326 Clase 120
Composición								
Carbon, %	0,21	0,18	0,23	0,23	0,21		0,20	
Manganeso, %	-	0.10-0.40	0,40	0,40	-		0.10-0.40	
Fósforo, %	0,040	0.025	0,035	0,035	0,035		0.025	
Sulfuro, %	0,040	0.025	0,040	0,040	0,040	(a)	0.025	(a)
Silicio, %	-	0.15-0.35	0.20-0.35	0.20-0.35	-		0.15-0.35	
Cromo, %	-	1.00-1.80	1.50-2.00	1.50-2.00	-		1.00-1.80	
Níquel, %	-	2.00-3.25	2.60-3.25	3.00-4.00	-		2.25-3.50	
Molibdeno, %	-	0.20-0.60	0.45-0.60	0.45-0.60	-		0.20-0.60	
Vanadio, %	-	-	0.03	0.03	-		-	
Tratamiento Térmico	Q & T	Q & T	Q & T	Q & T	Q & T	Q & T	Q & T	Q & T
Resist. Tracción mín., psi	(b)		105,000	115,000	115,000			
Esfuerzo Fluencia mín., psi	80,000	80,000	85,000	100,000	100,000	90,000	100,000	120,000
Elongación (in 8 in.) %	18	20	16	16	16		18	
Approx. NTD range, °F	-40° ó + bajo	-130° ó + bajo	-120° ó + bajo	-90° ó + bajo	-50° ó + bajo	-40° ó + bajo	-100° ó + bajo	-20° ó + bajo
Soldabilidad	Especial	Especial	Especial	Especial	Especial	Especial	Especial	Especial
Espesor disponible, pulg.	3/16" - 2.1/2"	3/16" - 8"	3/16" - 4"	4"	3/16" - 2.1/2"		3/16" - 3"	
Costo relativo (c)	2.0	3.5	3.0	3.0	2.0	2.0	3.5	3.5
(a) No especificado		(b) De acuerdo a cada tipo de acero			(c) Relacionado con acero ABS clase B			

Tabla 2: Composición química y propiedades de algunos aceros estructurales, con 80.000 a 120.000 psi esf.fluencia.

tiempo, a fin de evitar errores importantes derivados del conocimiento de ciertas propiedades del acero y de las estructuras soldadas.

Mejorar la resistencia del acero sin afectar su tenacidad, ha sido entonces el principal desafío para los metalurgistas en todo el mundo. Para ello se ha recurrido a dos principios básicos: Reducir el contenido de carbono tanto como sea posible

y en su reemplazo incorporar elementos tales como manganeso, níquel y cromo, asociados con tratamientos de templado y revenido. Posteriormente, controlar el tamaño de grano en los aceros estructurales y permitir la precipitación de ciertos compuestos, no sólo para lograr un buen límite de fluencia sino que también para desarrollar una adecuada resistencia al impacto y excelente soldabilidad.

BIBLIOGRAFIA

- Analysis of Welded Structures, K.Masubuchi, MIT, USA, 1980.
- Apuntes Ship Technology Vol.1. Royal Navy, U.K., 1995.
- Apuntes "Comportamiento Mecánico de los Materiales", UTFSM, Valparaíso, 1996.
- Especificación Militar MIL-S-22698 C, 1994.